



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



## AGRADECIMIENTOS

“A mi familia

A mis compañeros y amigos

A mi tutor F. Javier Martínez Solano”



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



## RESUMEN

El estudio realizado con este trabajo consiste en la remodelación de la red de suministro de agua potable de la ciudad colombiana de Santa Marta con el fin de solucionar el problema de desabastecimiento al que ha de hacer frente, y así satisfacer su demanda hidráulica con unos niveles de calidad y presión de servicio satisfactorios en todos los consumos. Concretamente, el proyecto se centra en optimizar la parte de la red correspondiente a la urbanización de Gaira, al Sur de la ciudad. Gaira dispone de tres fuentes de suministro de los que puede adquirir el agua necesaria: Toribio (principal fuente de suministro de toda la ciudad) y El Roble que cubren sus demandas gracias al uso de depósitos de regulación, y la captación desde el río Gaira, el cual se encuentra situado al nivel del mar y dispone por tanto de una estación de bombeo que le permita distribuir el agua a sus nudos correspondientes, situados a una cota más elevada. Para el estudio llevado a cabo se ha partido de una solución previa de funcionamiento que implicaba una cierta sobreexplotación de la fuente situada en el embalse de Toribio. Por su parte, las fuentes de Gaira y El Roble no conseguían maximizar su producción. Sobre dicha solución se proponen una serie de acciones correctoras, dirigidas principalmente a aumentar la capacidad de producción tanto de El Roble como de la estación de bombeo de Gaira. De esta forma, el caudal proveniente de Toribio quedará disponible para alimentar otras zonas de Santa Marta.

Así, el trabajo incluye las siguientes fases:

- Estudio diagnóstico del funcionamiento actual.
- Propuesta de reordenación de los distritos de consumo de la urbanización de Gaira.
- Proyecto de modificaciones en la estación de bombeo de Gaira.
- Evaluación del funcionamiento hidráulico de la red tras la inclusión de las modificaciones.

**Palabras Clave:** Abastecimiento, bombeo, Epanet.



## ABSTRACT

The study carried out with this work consists of the remodeling of the potable water supply network of the Colombian city of Santa Marta in order to solve the problem of shortages that it has to face, and thus satisfying its hydraulic demand with the required quality and service pressure levels in all the consumptions. Specifically, the project focuses on optimizing the part of the network corresponding with the region of Gaira, to the south of the city. Gaira has three supply sources from which it can obtain the necessary water: Toribio (main supply source for the whole city) and El Roble which cover its demands thanks to the use of regulation tanks, and the catchment from Gaira river, which is located at sea level and therefore it has a pumping station that allows it to distribute the water to its corresponding nodes, located at a higher level. For the study carried out, it has been considered as starting point a previous working solution that implied a certain overexploitation of the source located in the reservoir of Toribio. On the other hand, Gaira and El Roble sources were unable to maximize their production. From this solution, a series of corrective actions are proposed, mainly aimed at increasing the production capacity of both El Roble and Gaira pumping station, leaving the water coming from Toribio available for feeding other areas of Santa Marta.

Thus, the work includes the following phases:

- Diagnostic study of the current operation.
- Reorganization proposal of the consumption districts of Gaira urbanization.
- Evaluation of the hydraulic operation of the network after the inclusion of the modifications.

**Keywords:** Supplying, pumping, Epanet.



## RESUM:

L'estudi realitzat amb aquest treball consisteix en la remodelació de la xarxa d'abastament d'aigua potable de la ciutat colombiana de Santa Marta per tal de solucionar el problema de desproveïment a què ha de fer front, i així satisfer la seva demanda hidràulica amb uns nivells de qualitat i pressió de servei satisfactoris en tots els consums. Concretament, el projecte se centra en optimitzar la part de la xarxa corresponent a la urbanització de Gaira, al Sud de la ciutat. Gaira disposa de tres fonts de subministrament dels que pot adquirir l'aigua necessària: Toribio (principal font de subministrament de tota la ciutat) i El Roble que cobreixen les seves demandes gràcies a l'ús de dipòsits de regulació, i la captació des del riu Gaira, el qual es troba situat al nivell del mar i disposa per tant d'una estació de bombament que li permeti distribuir l'aigua als seus nusos corresponents, situats a una cota més elevada. Per a l'estudi dut a terme s'ha partit d'una solució prèvia de funcionament que implicava una certa sobreexplotació de la font situada a l'embassament de Toribio. Per la seua banda, les fonts de Gaira i El Roble no aconseguien maximitzar la seva producció. Sobre aquesta solució es proposen un seguit d'accions correctores, adreçades principalment a augmentar la capacitat de producció tant del Roble com de l'estació de bombament de Gaira. D'aquesta manera, el cabal provinent de Toribio quedarà disponible per alimentar altres zones de Santa Marta.

Així, el treball inclou les següents fases:

- Estudi diagnòstic del funcionament actual.
- Proposta d'ordenació dels districtes de consum de la urbanització de Gaira.
- Projecte de modificacions a l'estació de bombament de Gaira.
- Avaluació del funcionament hidràulic de la xarxa després de la inclusió de les modificacions.

**Paraules Clau:** Proveïment, bombament, Epanet.



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



## ÍNDICE DEL TRABAJO

### **MEMORIA:**

1. INTRODUCCIÓN
2. ANÁLISIS DE LA RED HIDRÁULICA DE SANTA MARTA
3. PROPUESTA DE MEJORA DEL EQUIPO DE LA UNIVERSIDAD
4. PROPUESTA DE ACTUACIÓN
5. FUNCIONAMIENTO DE LA RED TRAS LA REMODELACIÓN
6. PLANIFICACIÓN TEMPORAL
7. RESUMEN DEL PRESUPUESTO
8. CONCLUSIONES
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### **PRESUPUESTO:**

1. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS
2. MEDICIONES
3. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

### **PLANOS:**

1. Localización de Magdalena en Colombia y localización de Santa Marta en Magdalena
2. División de la red hidráulica en función de la procedencia de caudal con la solución propuesta por el equipo de la universidad
3. División de la red hidráulica en función de la procedencia de caudal con la solución propuesta con este trabajo
4. Localización de la zona Sur de la red hidráulica correspondiente con la urbanización de Gaira
5. Localización de las tuberías que son abiertas para deshacer la sectorización realizada por el equipo de la universidad
6. Localización de las tuberías que son cerradas para realizar una nueva sectorización de la red hidráulica
7. Localización de las tuberías que son cerradas para maximizar el caudal aportado por el depósito de regulación número 14
8. Localización de las tuberías que son abiertas y cerradas con el fin de disminuir el caudal aportado por el depósito 14 y garantizar así la recursividad del mismo



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)

# MEMORIA



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



## ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1 Justificación y alcance .....	1
1.2 Antecedentes .....	2
1.3 Objetivos .....	5
2. ANÁLISIS DE LA RED HIDRÁULICA DE SANTA MARTA .....	7
3. PROPUESTA DE MEJORA DEL EQUIPO DE LA UNIVERSIDAD .....	11
3.1 Consideraciones previas .....	11
3.2 Solución final aportada por el equipo de la universidad .....	14
3.3 Funcionamiento de la red con la solución de la universidad .....	18
4. PROPUESTA DE ACTUACIÓN .....	23
4.1 Acciones previas.....	25
4.2 Acciones sobre Sur II.....	28
4.3 Acciones sobre Sur I.....	41
4.3.1 Parada de la bomba 1 durante las horas pico.....	43
4.3.2 Implementación de una válvula limitadora de caudal .....	44
4.3.3 Implementación de un variador de velocidad .....	45
4.3.4 Medidas para garantizar la recursividad del depósito 14.....	51
5. FUNCIONAMIENTO DE LA RED TRAS LA REMODELACIÓN.....	57
5.1 Comprobación general .....	57
5.2 Comprobaciones específicas .....	58
5.2.1 Zona Sur II.....	58
5.2.2 Zona Sur I.....	61
6. PLANIFICACIÓN TEMPORAL .....	67
7. RESUMEN DEL PRESUPUESTO .....	71
8. CONCLUSIONES .....	73
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	75



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ríos que recorren Santa Marta .....</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Proyecto de la Universidad de los Andes (Saldarriaga, J, 2015) .....</i>	<i>4</i>
<i>Figura 3. Comunas de Santa Marta.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 4. Red hidráulica de Santa Marta.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 5. Detalle diámetros de las tuberías de la red.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 6. Embalses y depósitos de la red.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 7. Estaciones de bombeo de la red de Santa Marta.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 8. Diagrama operativo de un depósito de regulación .....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 9. Patrón de demanda correspondiente a la simulación durante 24 horas .....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 10. Zona Norte, procedencia El Curval.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 11. Zona Centro, procedencia Toribio .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 12. Zona Sur, procedencia El Roble .....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 13. Zona Centro, procedencia Universidad (dcha.) y Zona Sur, procedencia Gaira (izda.) .....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 14. División de Gaira por zonas.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 15. División realizada por el equipo de la universidad.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 16. Demandas y límites de extracción con la solución de la universidad .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 17. Red de transporte de Santa Marta .....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 18. Identificación de la tubería 7442.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 19. Red hidráulica de Gaira.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 20. Cierre de las tuberías 13690 y 4461 .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 21. Cierre de la tubería 6463 .....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 22. Situación de la zona antes del cierre de la tubería 13711 .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 23. Situación de la zona después del cierre de la tubería 13711 .....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 24. Problema de presión tras cortar alimentación de Toribio.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 25. Gráfico para la selección del modelo de bomba (IDEAL, 2017).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 26. Curvas características según el número de bombas.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 27. Diagrama del modelo de bomba 80-32H (IDEAL, 2017).....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 28. Introducción de la curva en Epanet.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 29. Introducción de las 3 bombas en Epanet .....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 30. Localización de los nudos 5809 y 6104 .....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 31. Selección del número bombas .....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 32. Controles para el número de bombas .....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 33. Tuberías cerradas para maximizar producción de El Roble .....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 34. Gráfico del caudal extraído de Gaira I y Gaira II .....</i>	<i>43</i>



<i>Figura 35. Controles para parar la bomba 1 .....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 36. Introducción de la válvula en la red hidráulica .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 37. Controles para la actuación de la válvula .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 38. Información de catálogo de la válvula (Bermad, 2017) .....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 39. Curvas características de la bomba 1 con y sin reducción de velocidad .....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 40. Controles para simular el variador de velocidad.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 41. Selección del modelo de variador (Power Electronics, 2017) .....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 42. Comparación de los sistemas de control de flujo (Power Electronics, 2017) ..</i>	<i>48</i>
<i>Figura 43. Caudal entrante y saliente del depósito 14 .....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 44. Cambio del valor de consigna de la válvula limitadora del tanque 14 .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 45. Demandas alimentadas directamente a través de El Roble .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 46. Caudal circulante por la tubería 12440.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 47. Situación de las tuberías próximas al tanque 14 antes de las medidas .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 48. Situación de las tuberías próximas al tanque 14 después de las medidas .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 49. Caudal circulante por la tubería 12440.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 50. Demandas y límites de extracción tras la solución propuesta .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 51. Comprobación de la presión mínima en el nudo 6104 tras las medidas .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 52. Estado de la red durante las horas pico tras las mejoras.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 53. Caudal bombeado por la bomba 1 de Gaira II a lo largo del día.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 54. Caudal bombeado por la bomba 2 de Gaira II a lo largo del día.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 55. Caudal bombeado por la bomba 3 de Gaira II a lo largo del día.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 56. Problemas de presión tras parar bomba 1.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 57. Comprobación del límite de extracción de Gaira tras implementar la válvula</i>	<i>62</i>
<i>Figura 58. Presiones en la zona Sur I tras la introducción de la válvula.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 59. Comprobación del límite de extracción de Gaira tras el variador .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 60. Presiones en la zona Sur I tras la introducción del variador .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 61. Caudal aportado por El Roble a lo largo del día.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 62. Comprobación del caudal medio extraído del tanque 14 .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 63. Comprobación de la recursividad del tanque 14.....</i>	<i>65</i>



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Límites de extracción de los embalses .....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 2. Capacidades de los tanques y máximo caudal que pueden aportar.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3. Demandas por zonas tras división realizada por la universidad.....</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 4. Tuberías cerradas para realizar la nueva sectorización .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 5. Nuevas demandas tras la sectorización propuesta.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 6. Obtención de la curva de consigna para el nudo 5809 .....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 7. Número de bombas necesarias en cada instante.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 8. Potencia consumida por la estación de bombeo sin regulación .....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 9. Potencia consumida por la estación de bombeo con regulación .....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 10. Tuberías cerradas para maximizar el caudal saliente del depósito 14 .....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 11. Potencia consumida por la bomba 1 en cada instante del día.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 12. Potencia consumida por la bomba 1 tras la instalación de la válvula.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 13. Potencia consumida por la bomba 1 con el variador de velocidad .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 14. Tuberías cerradas para garantizar 240 l/s de media en el tanque 14.....</i>	<i>55</i>



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Justificación y alcance

A día de hoy, la crisis por carencia de agua que sufre la región de Santa Marta, en Colombia, constituye una realidad y es que desde el año 2013, los habitantes de la ciudad turística conocida como la Perla de América han de soportar un desabastecimiento cercano al 60 por ciento, causado principalmente por la fuerte sequía que ha golpeado a esta región del país en los últimos años. La situación es insostenible y no puede prolongarse durante mucho más tiempo.

Cómo acción a largo plazo la Universidad de los Andes ha propuesto una solución que garantizaría el consumo de agua potable en Santa Marta y los municipios vecinos hasta el año 2064, pero a causa principalmente de su elevado coste aún no se ha podido proceder a su implantación. Mientras no comience a llevarse a cabo este proyecto definitivo, las autoridades de la ciudad han de contar con un sistema de abastecimiento de agua potable que sirva como solución transitoria.

El objeto del presente Trabajo Fin de Grado consiste en aportar una serie de medidas correctoras que puedan ser puestas en práctica de inmediato sobre una determinada zona de la actual red de distribución y transporte de agua potable de la ciudad, en concreto la zona Sur, correspondiente a la urbanización de Gaira, para conseguir satisfacer las necesidades de agua de sus habitantes durante los próximos años. Para llevarlo a cabo se partirá de una solución de funcionamiento previa sobre la red hidráulica aportada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València (Martínez-Solano et al., 2016), se estudiarán sus deficiencias y posteriormente se aportarán medidas para corregirlas. A la hora de desarrollar el proyecto, se empleará como documentación básica la suministrada por los tutores del TFG y la normativa vigente (Rossman, 2002). Decir además que en todo el trabajo se ha tomado el software libre Epanet como modelo de referencia para simular el funcionamiento hidráulico de la red tanto antes como después de las diversas medidas propuestas.

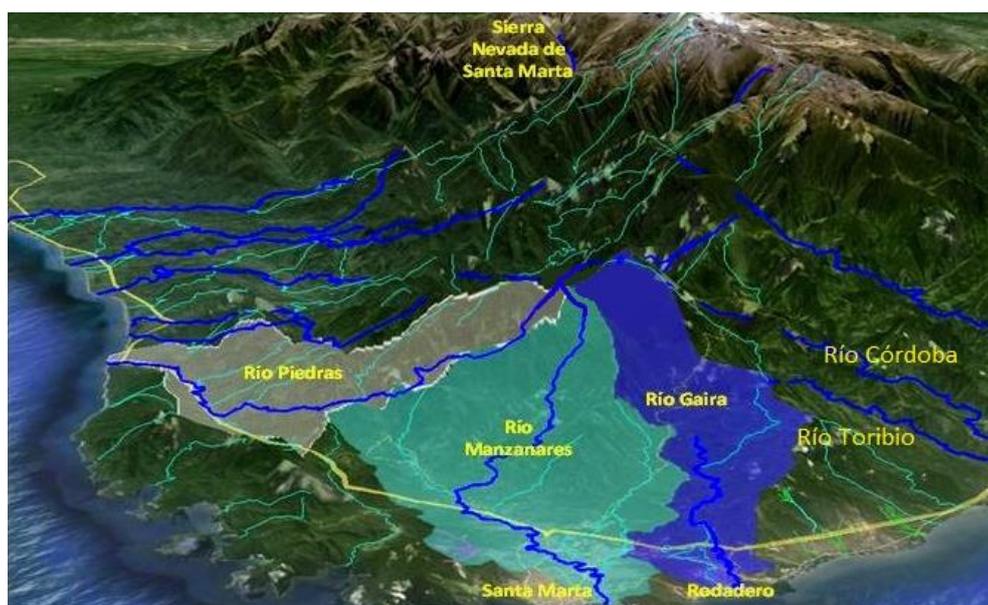
Este documento se estructura de la siguiente manera. En el primer capítulo se hablará acerca de la ciudad de Santa Marta, su problema con el suministro de agua y los antecedentes de los que se parten. Posteriormente se describirá de manera detallada la red hidráulica de la ciudad, así como la solución aportada por el equipo de la universidad para más tarde justificar el objeto del trabajo. La siguiente parte del documento está dedicada a enumerar y explicar detalladamente las diferentes medidas correctoras propuestas y en un capítulo posterior se procederá a comprobar su efectividad para comprobar si son soluciones válidas o no, describiendo el funcionamiento de la red tras la implantación de dichas medidas.

## 1.2 Antecedentes

Santa Marta es la capital del departamento de Magdalena, Colombia, y constituye la ciudad más antigua existente en el país y la segunda con más años de toda Sudamérica. Colombia se encuentra situada en la región noroccidental de América del Sur y al noreste del país, en la región Caribe, se sitúa Magdalena, tal y como se puede observar en los planos de localización adjuntos a esta memoria.

La ciudad está considerada como uno de los principales destinos turísticos del Caribe Colombiano gracias al atractivo que le aporta su privilegiada ubicación entre el Mar Caribe, en el Océano Atlántico, y la Sierra Nevada de Santa Marta. Además, disfruta de un clima tropical principalmente seco, con una temperatura anual promedio de 27° C y unas temperaturas máximas que pueden llegar a sobrepasar los 39° C. Un dato importante que se tendrá en cuenta a la hora de realizar el proyecto es el hecho de que, aunque a lo largo del año la temperatura media no varía mucho, Santa Marta posee una estación seca y una estación húmeda bien diferenciadas las cuales se van alternando. Mientras que junio, julio, septiembre y octubre son los principales meses de lluvia, los más secos ocurren desde diciembre hasta abril.

Físicamente, Santa Marta se encuentra atravesada por los ríos Manzanares y Gaira los cuales se originan en la Sierra Nevada de Santa Marta y en las afueras está bañada por los ríos Piedra, Toribio y Córdoba. Además, posee una reserva de aguas subterráneas alimentada de las aguas de los ríos Manzanares y Gaira principalmente, y de aguas de lluvias. Sin embargo, el deterioro sufrido por dichos ríos y sus cuencas en los últimos años, ha disminuido el nivel de este acuífero de Santa Marta, por lo que no se plantea la posibilidad de subsanar la crisis hidráulica de la ciudad con ayuda de estas reservas.



*Figura 1. Ríos que recorren Santa Marta*



Según datos disponibles correspondientes al año 2014, en Santa Marta viven unas 470 mil personas; la población flotante en temporada alta es de aproximadamente 49 mil personas y en temporada baja 19 mil, por lo que hay épocas del año, la mayoría de ellas además coincidentes con la estación seca, en las que la ciudad reúne a más de 500 mil habitantes y la demanda media de agua asciende aproximadamente a los 2000 litros por segundo. Sin embargo, a día de hoy Santa Marta solo recibe de sus fuentes aproximadamente 800 l/s, lo que representa un importante déficit de 1200 l/s, situación que si se mira con perspectivas al futuro se agrava aún más puesto que se estima que para el año 2064, siguiendo la tendencia de crecimiento demográfico actual, la capital de Magdalena llegará a requerir alrededor de 6000 l/s para abastecer a todos sus habitantes. No obstante, recalcar que esta crisis por falta de agua en la capital de Magdalena no es algo nuevo pues ha afectado a sus habitantes los samarios durante décadas y tiene su origen en la confluencia de una serie de factores como una inadecuada planificación, una infraestructura hidráulica obsoleta, la falta de lluvias, el deterioro sufrido por las cuencas hidrográficas de sus principales ríos, los ríos Gaira y Manzanares, y el crecimiento demográfico experimentado en los últimos años. A ello se le suma el malestar de los ciudadanos acerca del servicio de agua ya que en muchos lugares de la ciudad ésta no dispone de los niveles mínimos de calidad y no es potable.

Ante dicha situación, Metroagua, empresa con la que Santa Marta posee un contrato de arriendo de las redes de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado desde el año 1991, junto con la Financiera de Desarrollo Territorial -Findeter-, encargaron a la universidad colombiana de los Andes, conocida como Uniandes (Saldarriaga, J, 2015), el trazado de un plan maestro mediante el cual fuese posible garantizar el consumo de agua potable en Santa Marta y sus municipios vecinos hasta el año 2064. El proyecto llevado a cabo con el fin de determinar las acciones a tomar sobre la red hidráulica de la ciudad tuvo lugar entre junio del año 2014 y marzo del 2015 y se dividió en varias etapas: estimación de las necesidades sanitarias, análisis de alternativas de oferta hídrica para determinar las fuentes de suministro y por último optimización de la red de distribución de agua potable.

Según los primeros resultados del estudio realizado, los ríos Manzanares, Piedras y Gaira, que constituyen las fuentes de las que se alimenta la ciudad actualmente, se encontraban casi secas y sus cuencas presentaban un alto grado de afectación. La solución adoptada para paliar la situación actual hasta el año 2019 consistía en abastecer a Santa Marta ahora con la ayuda de los ríos Córdoba y Toribio, los cuales podían aportarle de 1000 a 2000 l/s. El plan incluiría la construcción de la planta de tratamiento Toribio para potabilizar el agua de estas dos fuentes.

Pero esta propuesta de solución es válida solo a medio plazo pues se calcula que, al igual que los ríos Manzanares, Piedras y Gaira, los caudales de los ríos Córdoba y Toribio disminuirán paulatinamente con el paso del tiempo debido al efecto del cambio climático.

Es por ello que para solventar la situación hasta el año 2064 se evaluaron diversas alternativas. La opción que arrojó un menor coste acompañado de una baja vulnerabilidad al cambio climático consistía en continuar con el plan de abastecimiento mediante los caudales de los ríos Toribio y Córdoba hasta 2019, y, una vez resultaran insuficientes, alimentarse del cauce del río Magdalena.

El Magdalena es el tercer río más importante de América por detrás del Amazonas y el Orinoco y prácticamente constituye una fuente inagotable de agua puesto que su caudal mínimo registrado a la altura de Barranquilla es de aproximadamente unos 2500 metros cúbicos por segundo mientras que el máximo registrado se elevaría hasta los 24 mil metros cúbicos por segundo.

El proyecto se llevaría a cabo mediante la introducción de una o varias conducciones submarinas de 45 km de longitud aproximadamente, fabricadas en polietileno de ultra alta densidad, más unos 18 km terrestres, desde el río Magdalena, que nace al suroeste de Colombia, en la cordillera de los Andes, hasta la nueva planta construida sobre el río Toribio.



*Figura 2. Proyecto de la Universidad de los Andes (Saldarriaga, J, 2015)*

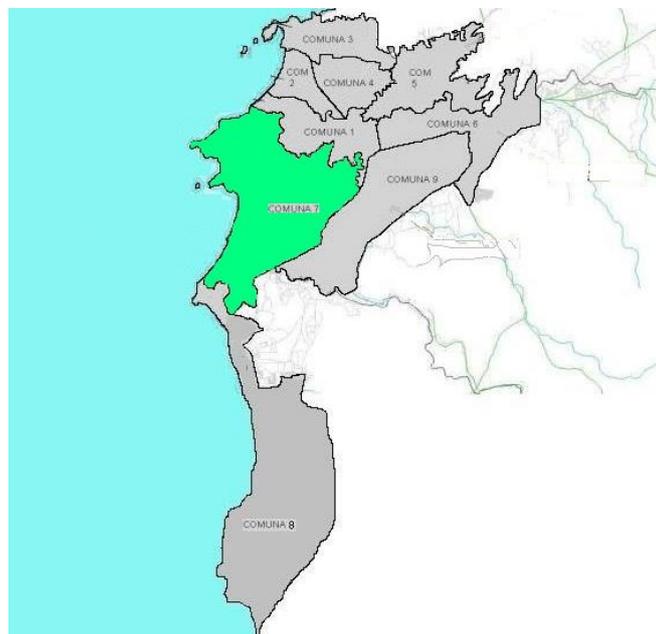
Con el presente Trabajo Final de Grado se pretende aportar una solución inmediata que sirva como medida correctora transitoria al problema que sufre la capital de Magdalena hoy en día hasta que el citado proyecto de mayor envergadura planteado por la universidad de los Andes consistente en la construcción de tuberías submarinas para trasvasar el agua desde el río Magdalena hacia el río Toribio pueda ser puesto en práctica.

### 1.3 Objetivos

El objetivo general de este documento consiste en introducir las modificaciones necesarias en la solución previa aportada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València con el fin de subsanar el problema de desabastecimiento de Santa Marta. Dicha solución, la cual será explicada con más detalle en un capítulo posterior, consistía en la sectorización de la red de distribución de agua potable de la ciudad mediante el cierre de una serie de tuberías y la instalación de válvulas reductoras de presión en puntos estratégicos.

Se pretende así conseguir satisfacer la demanda hidráulica de la ciudad con unos niveles de presión de servicio y calidad satisfactorios en todos sus nudos de consumo, pero sin exceder los límites de producción de ninguno de los diferentes embalses de los que se obtiene el agua.

Además, administrativamente Santa Marta se divide en comunas. Este trabajo se centrará en aportar las medidas correctoras pertinentes para una determinada zona de la actual red de distribución de agua potable de la ciudad, la zona Sur, correspondiente a la comuna de Gaira. Dicha parte de la red se concreta en uno de los planos de localización adjuntos a esta memoria. Gaira es la comuna 7 de las 9 en las que se organiza Santa Marta, se encuentra situada al noreste del distrito y posee una población aproximada de 60 mil habitantes.



*Figura 3. Comunas de Santa Marta*

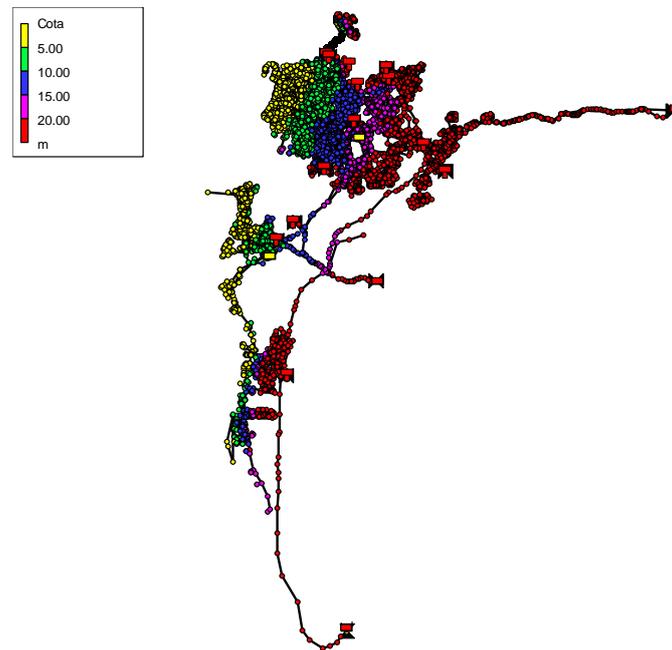
Una vez solucionada por completo la zona Sur se procederá a comprobar que las medidas correctoras que han sido tomadas en ella garantizan del mismo modo el correcto funcionamiento de la red de distribución de agua potable de Santa Marta en su conjunto.



## 2. ANÁLISIS DE LA RED HIDRÁULICA DE SANTA MARTA

Como consecuencia del estudio previo realizado por el equipo de la universidad, para el presente trabajo se cuenta con un modelo matemático de la red de distribución de agua potable de Santa Marta preparado para trabajar con él en Epanet.

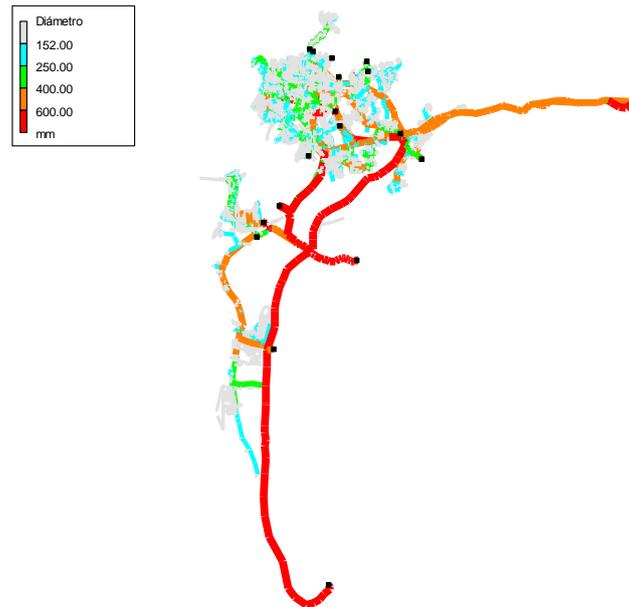
A continuación, se presenta en la siguiente figura dicho modelo de la red en el que se puede observar que existen importantes desniveles entre los distintos nudos de consumo. Esto es debido a que tal y como se mencionó anteriormente, la ciudad se encuentra ubicada entre la Sierra Nevada de Santa Marta, donde se encuentran las cotas más elevadas, y el mar Caribe, donde se localizan los nudos de consumos situados a cota cero.



*Figura 4. Red hidráulica de Santa Marta*

Concretamente, la red de suministro de la que se parte está compuesta por 13861 tuberías de diferentes longitudes, diámetros y rugosidades que en total suman 875 km de tuberías a lo largo de la red y que conectan 11042 nudos correspondientes a puntos de demanda.

Además, cuenta con 17 depósitos de regulación (a lo largo del presente documento se hablará indistintamente de tanque o depósito) localizados estratégicamente para abastecer a una determinada área de la ciudad, dos estaciones de bombeo: Gaira y Universidad, y 5 embalses o fuentes de suministro de los cuales se alimenta: El Curval, Universidad, El Roble, Gaira y Toribio.



*Figura 5. Detalle diámetros de las tuberías de la red*

El Curval, cuyas aguas provienen del río Manzanares, se encuentra situado en la zona noreste de la ciudad y tiene una cota de 200 metros. El embalse de Universidad, al norte de Santa Marta, se encuentra a nivel del mar y se abastece también gracias al río Manzanares. Gaira es otro embalse a nivel del mar que está situado en la zona central de la red hidráulica y cuyas aguas provienen del río Gaira. Por su parte, El Roble está localizado al este de la capital de Magdalena a una altura de 60 metros y se alimenta también a través del río Gaira. Y, por último, Santa Marta cuenta al sur de su red de distribución y transporte de agua potable con el embalse de Toribio, el cual constituye la principal fuente de suministro de toda la ciudad, posee una gran elevación de 125 metros y se abastece mediante el río con su mismo nombre.

Marcar que la diferencia entre embalse y depósito reside en que mientras el primero puede considerarse como una fuente inagotable de abastecimiento construida cerrando la boca de un valle a través de un dique que retiene las aguas de un río y que mantiene un nivel fijo de agua durante todo el tiempo de simulación, los depósitos se llenan y vacían constantemente para abastecer unos determinados consumos y son usados como elementos de almacenamiento temporal. Durante las horas en las que el caudal entrante al depósito supere a la demanda que ha de cubrir, éste se llenará y almacenará el agua para posteriormente entregarla en aquellos momentos del día en los que el caudal entrante no sea suficiente para satisfacer la demanda.

En la siguiente figura se muestra la localización dentro de la red de todos los embalses y depósitos de regulación de los que ésta dispone:



*Figura 6. Embalses y depósitos de la red*

Como ya se ha mencionado, existen problemas de escasez de agua que limitan la capacidad de las diferentes fuentes de suministro, especialmente durante los meses del año correspondientes con la estación seca. A continuación, se muestran los límites de extracción para cada uno de los distintos embalses que alimentan a la ciudad de Santa Marta:

<b>Embalse</b>	<b>Caudal medio en estación húmeda</b>	<b>Caudal medio en estación seca</b>
<b>El Roble WTP</b>	450 l/s	240 l/s
<b>El Curval WTP</b>	800 l/s	420 l/s
<b>Toribio WTP</b>	1600 l/s	900 l/s
<b>Gaira Pump Station</b>	-	206 l/s
<b>Universidad Pump Station</b>	-	314 l/s
<b>TOTAL</b>	2850 l/s	2080 l/s

*Tabla 1. Límites de extracción de los embalses*

Como se puede observar, el caudal máximo que son capaces de aportar cada una de las fuentes de suministro de la red viene marcado por límites distintos dependiendo de si se consideran los meses pertenecientes a la estación seca o a la estación húmeda. Mientras que para esta última la producción total puede alcanzar los 2850 litros por segundo, durante la estación seca se reduce hasta los 2080 l/s. Es por ello que la temporada seca es la más crítica en cuanto a suministro de agua y que por tanto los estudios realizados para resolver los problemas de desabastecimiento de la ciudad adoptarán las restricciones correspondientes al escenario de la estación seca. Una vez ésta quede resuelta se solventa la configuración de la red completa para todo el año.

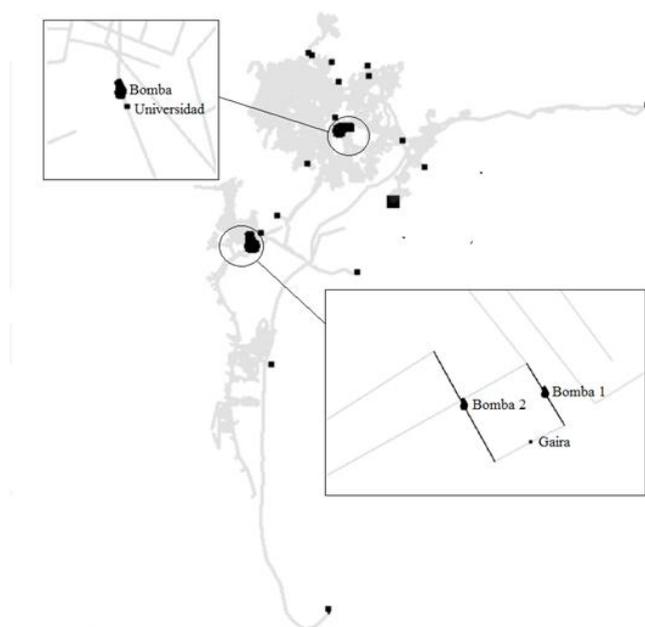
Con respecto a los requerimientos de caudal, la demanda media total de la red es de 1946.58 l/s, pero si se consideran los valores pico dados en las horas de mayor consumo, en este caso correspondientes al intervalo entre las 7:00 y las 8:00 horas, ésta se incrementa considerablemente hasta los 2997.73 l/s por lo que, al comparar los valores máximos posibles de producción mencionados anteriormente, con la demanda en horas pico se extrae que la red no es capaz de abastecer por sí misma dicha demanda. Se concluye por tanto en la necesidad de incorporar el uso de depósitos de regulación para el almacenamiento de agua en la solución adoptada los cuales podrán llenarse durante las horas de menor demanda para más tarde vaciarse durante las de mayor consumo. El funcionamiento de la red ha de ser tal que las fuentes de suministro disponibles alimenten a los depósitos presentes en la red para que estos más tarde cubran las demandas.

Gracias al potencial que les confiere el estar situados a una gran altura, las fuentes de El Curval, Toribio y El Roble cubren sus respectivas demandas mediante el uso de depósitos; sin embargo, Gaira y Universidad por su parte, al ser captaciones de los ríos Gaira y Manzanares respectivamente, se encuentran al nivel del mar y necesitan por tanto de una estación de bombeo para distribuir el agua a sus nudos correspondientes situados a una cota más elevada. La estación de bombeo situada en el embalse de Universidad está constituida por una única bomba definida por su curva característica:

$$H = 66.05 - 0.0001675 \times Q^2 \quad [1]$$

mientras que la de Gaira está compuesta por dos bombas idénticas cada una de las cuales viene definida por la curva característica:

$$H = 61.19 - 0.002253 \times Q^2 \quad [2]$$



*Figura 7. Estaciones de bombeo de la red de Santa Marta*



### 3. PROPUESTA DE MEJORA DEL EQUIPO DE LA UNIVERSIDAD

A la hora de optimizar una red de suministro de agua potable son varias las metodologías que se pueden usar: dimensionamiento de nuevas tuberías para sustituir o añadir a las ya existentes, instalación de nuevas bombas en las estaciones de bombeo o sustitución de las actuales, sectorización de la red, instalación de válvulas reductoras de presión (VRP) en puntos estratégicos para controlar la presión y reducir las pérdidas, etc.

El desabastecimiento que sufre Santa Marta ha ofrecido la oportunidad en los últimos años a diversos investigadores en el campo de la ingeniería hidráulica de subsanar dicho problema. Sin embargo, para conseguirlo tenían como restricciones previas impuestas por el cliente, en este caso la universidad colombiana de los Andes, la imposibilidad de cambiar las bombas existentes, instalar nuevas válvulas limitadoras de caudal ni nuevas tuberías o cambiar las ya existentes, con el fin de modificar lo menos posible la red actual y minimizar la inversión requerida, lo que dejaba un margen de actuación muy reducido.

#### 3.1 Consideraciones previas

El Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València quiso participar en la búsqueda de la solución al problema de suministro de agua presente en la capital de Magdalena y la alternativa escogida para ello consistió en la sectorización de la red mediante el uso de un algoritmo matemático. Mediante la sectorización se realiza una división de la red de distribución de agua potable en zonas o sectores de suministro autónomas, pero no independientes, alimentadas a través de los distintos depósitos o a través de los embalses directamente, que permita un control de caudales tanto en la entrega como en la distribución mediante el uso de válvulas limitadoras de caudal.

A la hora de realizar la sectorización se tuvieron en cuenta varias consideraciones. Con respecto al uso de depósitos en la red, éstos han de proporcionar tanto caudal como les sea posible y su correcto funcionamiento se ha de conseguir verificando la recursividad de los mismos, es decir, que a lo largo del día el caudal que los llena, iguale al caudal que se vacían, asegurándose así que ningún depósito sobrepasará su capacidad máxima y desbordará ni se vaciará por completo en ningún momento del día.

Primeramente, se realizó un análisis para determinar la capacidad de cada uno de los depósitos de regulación presentes en la red en el cual se considera una configuración estándar para los mismos mostrada en la figura siguiente y consistente en una entrada controlada por una válvula reguladora de caudal que permite la entrada al tanque de un determinado caudal constante,  $Q_{in}$ , seguida de una válvula de retención o anti-retorno que cierre por completo el paso del agua en sentido contrario, y una salida con un caudal variable según un patrón de demanda,  $c_m(t)$ , previamente definido,  $Q_{out}$ .

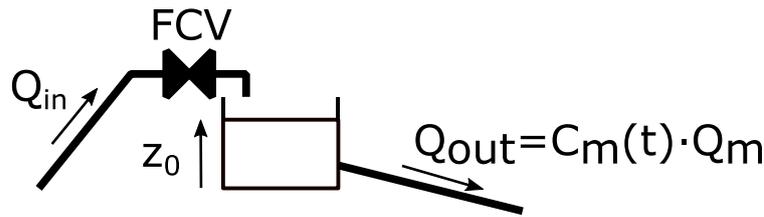


Figura 8. Diagrama operativo de un depósito de regulación

Este patrón se aplica a la demanda base acumulada de todos los nudos alimentados por el tanque,  $Q_m$ , y puesto que su valor medio es de  $\tau = 1.00375$ , y el caudal total entrante ha de igualar al total saliente, la relación entre  $Q_{in}$  y  $Q_m$  puede ser escrita como:

$$Q_{in} = Q_m \times \tau = Q_{out} \quad [3]$$

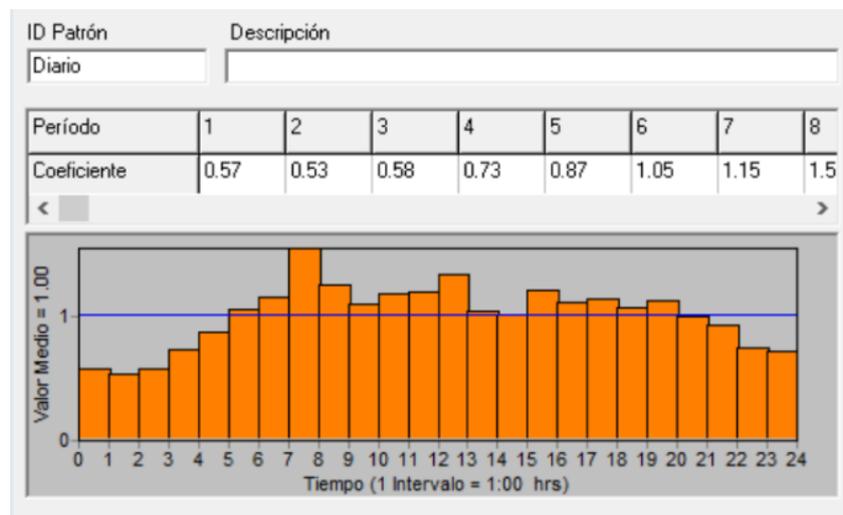
Tras el análisis se determinaron las capacidades de cada tanque, y una vez conocidas se procedió a determinar cuál era el máximo caudal medio que podía aportar cada uno de ellos basado en la posible ampliación de capacidad que pudiera ser llevada a cabo. Teniendo en cuenta la demanda que cada uno tenía que cubrir, si el caudal máximo que podían aportar sin necesidad de ninguna expansión era inferior a dicha demanda se requería una ampliación del tanque. En el caso de los depósitos 3, 5, 10, 12 y 14 las expansiones de capacidad fueron necesarias con el fin conseguir todo el caudal necesario para alimentar a las demandas correspondientes.

En la siguiente tabla se muestran las capacidades de cada tanque, la demanda que les ha sido asignada para cubrir y el caudal que pueden aportar según la ampliación de capacidad que se lleve a cabo en cada uno de ellos.

	Volumen (m <sup>3</sup> )	Expansión del depósito (m <sup>3</sup> )						Demanda (l/s)
		0	500	1000	2000	3750	5000	
Tank_1	6480	310.6	334.5	358.5	406.4	490.3	550.2	295
Tank_3	235	11.3	35.2	59.2	107.1	191	250.9	37.53
Tank_4	235	11.3	35.2	59.2	107.1	191	250.9	-
Tank_5	1842.8	88.3	112.3	136.2	184.2	268	328	105.75
Tank_10	700	33.5	57.5	81.5	129.4	213.3	273.2	47.1
Tank_11	8198.8	392.9	416.9	440.9	488.8	572.7	632.6	94.9
Tank_12	9000	431.3	455.3	479.3	527.2	611.1	671	532.9
Tank_14	3445.4	165.1	189.1	213.1	261	344.9	404.8	134
Tank_15	3628.2	173.9	197.9	221.8	269.7	353.6	413.5	82.37
Tank_16	10681.4	511.9	535.9	559.9	607.8	691.7	751.6	312
Tank_17	2706.5	129.7	153.7	177.6	225.6	309.4	369.3	90.29

Tabla 2. Capacidades de los tanques y máximo caudal que pueden aportar

Además, después de realizar el estudio preliminar se observó que el algoritmo tomaba demasiado tiempo para realizar los cálculos por lo que para simplificar el análisis se usó una simulación basada en diferentes escenarios en vez de la simulación de período extendido durante 168 horas (1 semana). Los escenarios seleccionados fueron tres concretamente, correspondientes al caudal máximo demandado por la red, que ocurre a las 7:00 horas con un patrón de demanda aplicado a la demanda base de cada consumo de 1.54 y donde en consecuencia las presiones que se dan en los diferentes nudos son mínimas; caudal diario, en el que se simula la situación de la red por un período de 24 horas, cada una con su patrón de demanda, y caudal medio, con un patrón de demanda de valor 1.00375.



*Figura 9. Patrón de demanda correspondiente a la simulación durante 24 horas*

Por último, la principal dificultad a la hora de definir los diferentes sectores residía en la restricción de presión mínima con la que el agua ha de llegar a los diferentes consumos. La presión de servicio existente en cada uno de los nudos de la red ha de ser superior a los 15 metros de columna de agua (mca). Además, puesto que el objetivo es minimizar las variaciones de presión en cada sector, aquellos nudos que presentan grandes diferencias de cota se excluyen de formar parte del mismo sector.

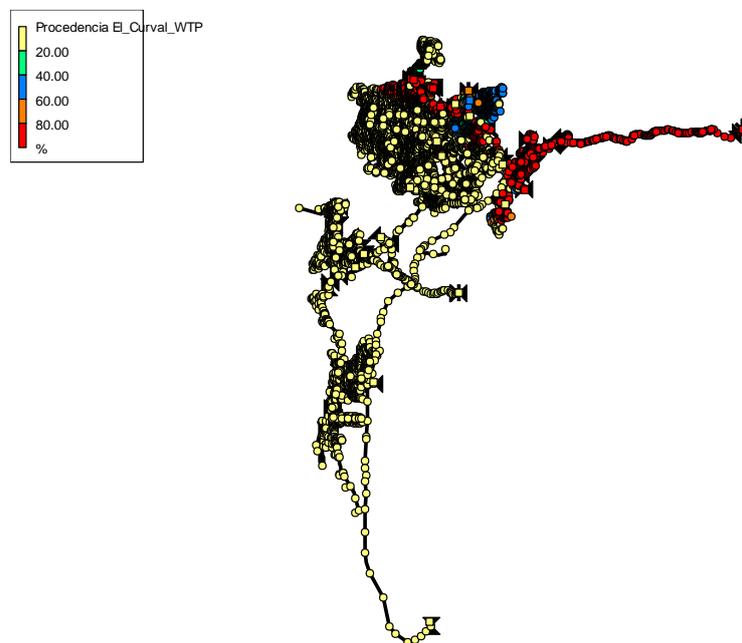
Esto, unido a la complejidad de la red en términos del caudal máximo aportado durante la estación seca, reduce considerablemente el número de soluciones posibles.

### 3.2 Solución final aportada por el equipo de la universidad

La solución final al problema propuesta por el equipo de la universidad se planteó en dos fases: primero se simplificó la red hidráulica de Santa Marta dividiéndola en tres grandes áreas, que más tarde fueron nuevamente subdivididas, y posteriormente se procedió a la segmentación de la misma mediante el cierre de una serie de tuberías escogidas a conciencia y la instalación de válvulas reductoras de presión en puntos estratégicos, buscando la solución que optimizara tanto la distribución de presiones como la de demandas a lo largo de la red hidráulica.

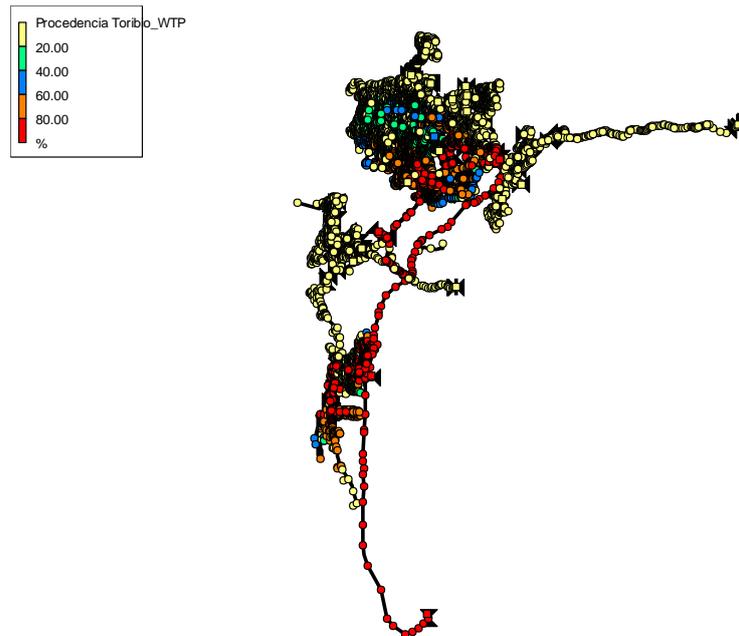
A la hora de realizar la sectorización se consideraron dos categorías dentro de la red de tuberías: aquellas de un diámetro superior a los 160 milímetros constituyen las tuberías para el transporte de agua a lo largo de la red y las destinadas a la distribución de la misma a todos los consumos serían las de diámetros inferiores a los 152 milímetros, unas 6 pulgadas aproximadamente (ver Figura 4). Con el fin de mantener el funcionamiento habitual de la red, solo era posible la apertura o cierre de las tuberías de distribución.

En la primera fase del estudio la red se dividió en tres áreas operacionales: Norte, Centro y Sur. La zona Norte cubre su demanda gracias a la producción del embalse El Curval a través de los tanques 3, 5, 10, 11 y 17.



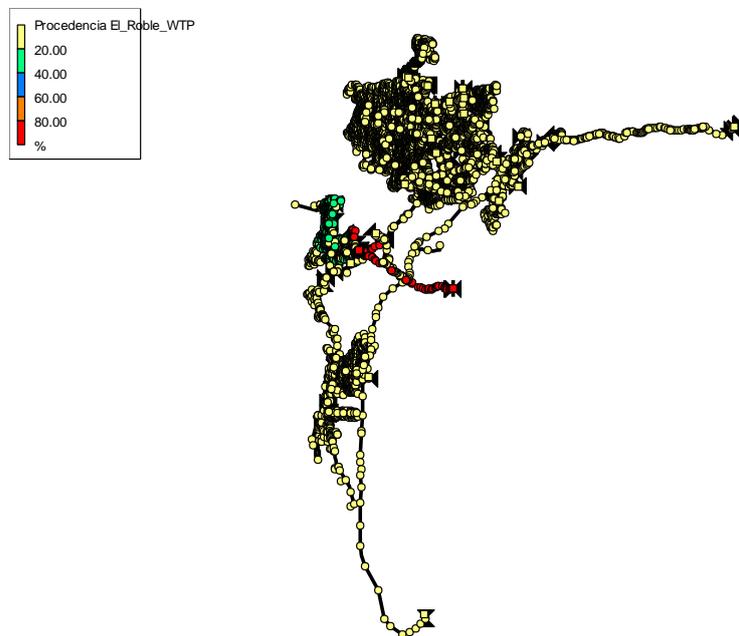
*Figura 10. Zona Norte, procedencia El Curval*

La zona Centro, la cual representa la mayor parte del sistema, suplende sus necesidades de agua gracias al caudal suministrado desde el embalse de Toribio mediante los tanques 1, 12 y 16.



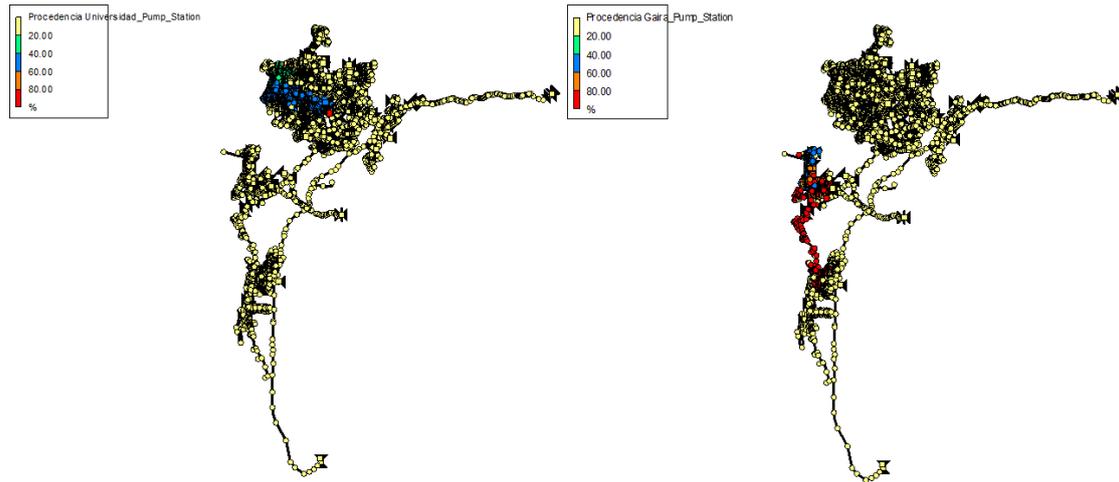
*Figura 11. Zona Centro, procedencia Toribio*

Finalmente, el área Sur se abastece gracias al caudal procedente del embalse El Roble mediante el tanque 14, el cual está situado a una altura de 45.52 metros sobre el nivel del mar, y también por el embalse de Toribio, a través del tanque 15, como se muestra en la anterior figura, que posee una cota de 90 metros.



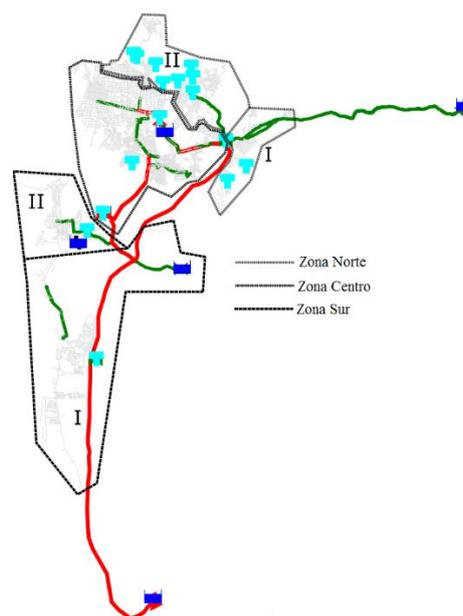
*Figura 12. Zona Sur, procedencia El Roble*

Además, puesto que durante la estación seca la producción de agua resulta insuficiente para satisfacer la demanda de las zonas Centro y Sur, las estaciones de bombeo de Universidad y Gaira respectivamente ayudan a alimentar dichas regiones.



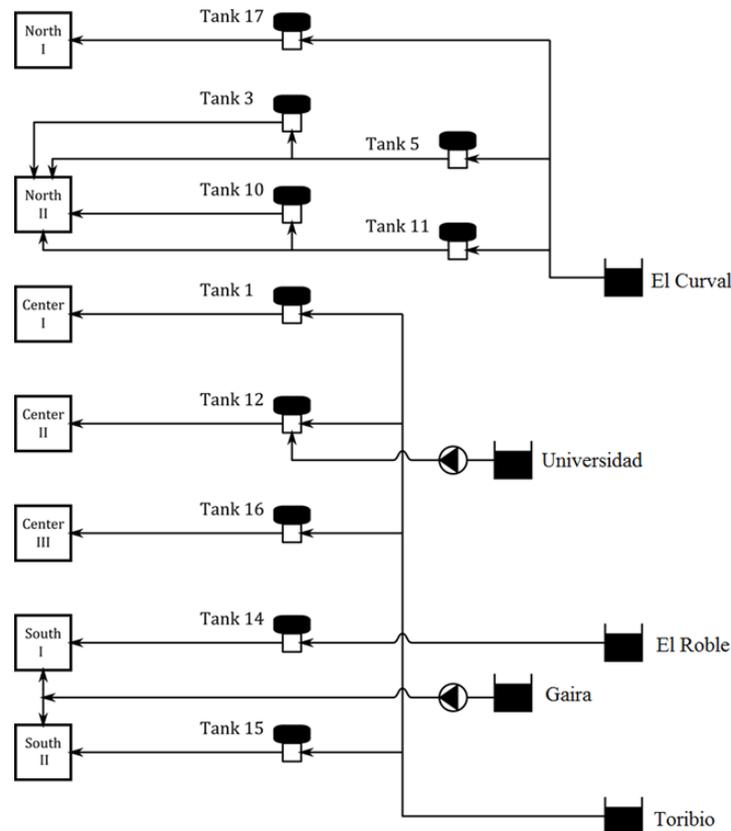
*Figura 13. Zona Centro, procedencia Universidad (dcha.) y Zona Sur, procedencia Gaira (izda.)*

A partir de esta primera división, en una segunda fase se realizó otra más precisa. La zona Norte se subdividió en dos nuevas áreas, correspondientes a cada una de las zonas alimentadas a través de las dos tuberías principales salientes del embalse El Curval: mientras que Norte I cubre los nudos alimentados por el tanque 17, la zona Norte II incluye las demandas satisfechas directamente por los tanques 5 y 11 y las alimentadas por los tanques 3, y 10, los cuales se llenan a partir de los depósitos 5 y 11 respectivamente. La región Centro por su parte, se dividió en tres áreas: Centro I, Centro II y Centro III, abastecidas directamente a través de los tanques 1, 12 y 16 respectivamente. Y finalmente, los nudos de la zona Sur alimentados gracias a una parte de la estación de bombeo de Gaira y también mediante El Roble a través del tanque 14, fueron englobados en la región Sur I y aquellos alimentados a través de la otra parte de la estación de bombeo y del tanque 15 mediante el embalse de Toribio, Sur II.



*Figura 14. División de Gaira por zonas*

A continuación, se muestra en un esquema la división del sistema en las diferentes áreas operacionales realizada por el equipo de la Universitat Politècnica de València:



*Figura 15. División realizada por el equipo de la universidad*

Y en la siguiente tabla se muestra cómo queda finalmente el desglose de demandas medias para cada una de las zonas una vez realizada la división definitiva de la red de distribución de agua potable de Santa Marta:

Zona	Demanda media
Norte I	158.22 l/s
Norte II	232.94 l/s
Centro I	259.55 l/s
Centro II	507.33 l/s
Centro III	360.97 l/s
Dispersos	36.59 l/s
Sur I	270.74 l/s
Sur II	120.24 l/s
<b>TOTAL</b>	<b>1946.58 l/s</b>

*Tabla 3. Demandas por zonas tras división realizada por la universidad*



Se verifica que la demanda media total asciende a los 1946.58 l/s, cantidad que tras aplicar el patrón de demanda correspondiente a las horas de mayor consumo de valor 1.54 resultaría en una demanda máxima de 2997.72 l/s. En el sector denominado ‘dispersos’ se incluyen las demandas de todos aquellos nudos que son alimentados directamente a través de los diferentes embalses ante la imposibilidad de hacer uso de ningún depósito.

Una vez realizada la división y aplicado el algoritmo matemático usado en el proyecto y tras diversas iteraciones del mismo, la red hidráulica de Santa Marta resultó segmentada en 59 sectores mediante el cierre de una gran cantidad de tuberías y la instalación de varias válvulas reductoras de presión (VRP) en puntos estratégicos.

Sin embargo, a pesar de que con esta solución aportada por el equipo de la universidad quedarían satisfechos los requerimientos de presión mínima en todos los consumos de la red, para alcanzarlos se incumplen algunas de las restricciones de partida que presentaba el problema. En primer lugar, no se consigue maximizar el caudal aportado por las estaciones de bombeo de Gaira y Universidad ni tampoco por el embalse de El Roble. Por otro lado, esta propuesta de funcionamiento implica una cierta sobreexplotación de la fuente situada en el embalse de Toribio pues se excede el caudal de 900 l/s como máximo que se puede extraer de él durante la estación seca para alimentar a toda la zona Centro y parte de los consumos de Sur II, lo que imposibilitaría la puesta en práctica de esta solución. Asimismo, la estación de bombeo actual localizada en Gaira tampoco sería capaz de solventar el problema quitándole a Toribio demandas que cubrir y alimentando ella sola la totalidad de los consumos de Sur II pues la bomba dispuesta en Gaira para abastecer esta zona no puede aportar la suficiente altura a aquellos nudos que poseen una mayor cota.

Plantear una nueva sectorización, cambiar las bombas de Gaira o incluir elementos adicionales a la red hidráulica de Santa Marta permitirá solventar el problema.

### 3.3 Funcionamiento de la red con la solución de la universidad

Para llevar a cabo los objetivos propuestos con este trabajo se partirá de la sectorización realizada previamente por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València. En ella, los embalses de El Roble y Gaira son los encargados de alimentar la zona Sur I, mientras que, una parte de las demandas de Sur II son cubiertas gracias también a la estación de bombeo de Gaira y el resto mediante el embalse de Toribio a través del tanque 15.

Idealmente, de los 270.74 l/s como media que demanda Sur I, El Roble podría cubrir 240 l/s, mientras que los 30.74 l/s restantes serían aportados por Gaira mediante una de las dos bombas de su estación de bombeo, dejándole a esta disponibles 175.26 l/s, puesto que el caudal máximo que puede aportar es de 206 l/s, que irían a parar a aquellos nudos de Sur II con una cota inferior a 45 metros a través de la otra bomba. Dicha restricción se explica



puesto que las bombas dispuestas en la estación de bombeo de Gaira pueden aportar cada una un máximo de aproximadamente 60 metros de altura y la presión mínima de servicio requerida en cada consumo es de 15 mca, por lo que aplicando la ecuación de Bernoulli y despreciando el término cinético:

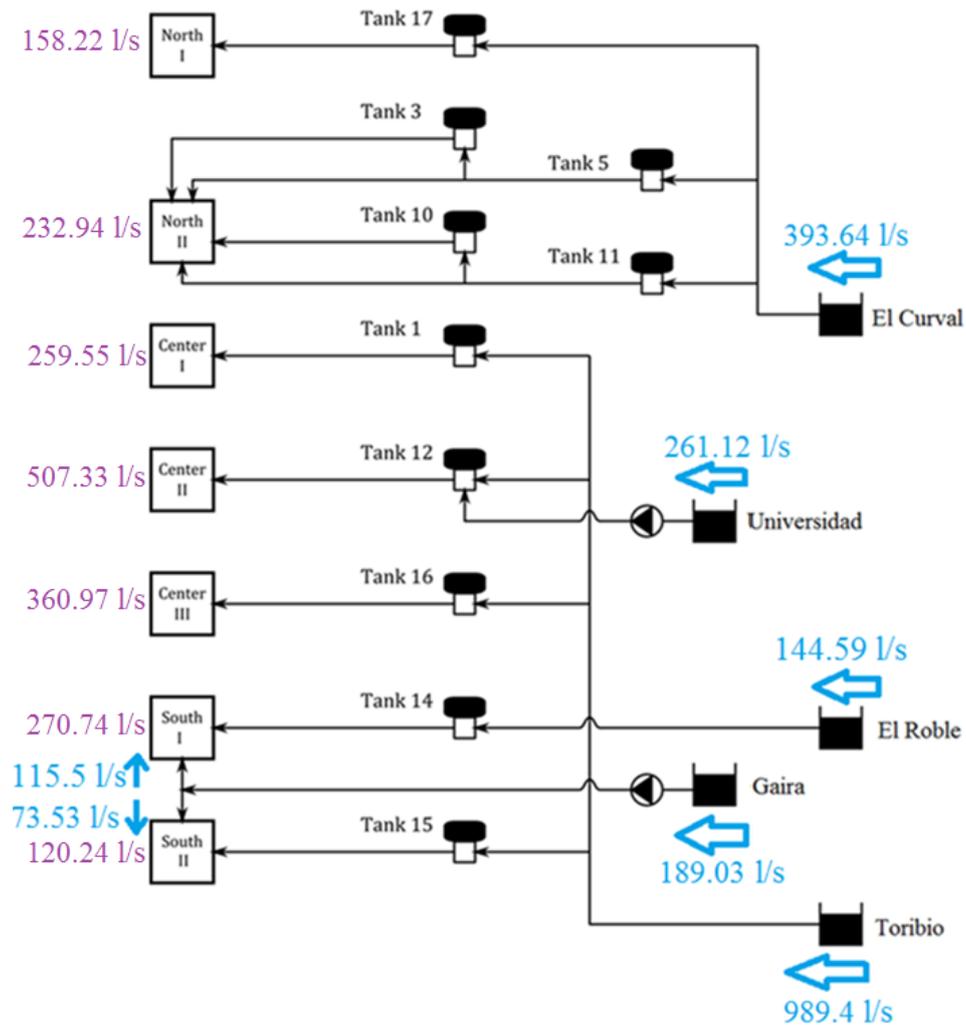
$$H = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} \quad [4]$$

$$60 = 15 + z; \quad z_{m\acute{a}x} = 45 \text{ m} \quad [5]$$

Dichas demandas situadas en las regiones más elevadas de la zona Sur II que no pueden ser alimentadas mediante la estación de Gaira serían cubiertas gracias al embalse de Toribio a través del tanque 15, el cual se encuentra situado a una cota de 90 metros.

Sin embargo, lo que en realidad sucede tras estas medidas tomadas por el equipo de la universidad es que de El Roble se consiguen extraer de media 144.59 l/s, inferiores a los 240 l/s que puede aportar esta fuente como máximo, y que se destinan a alimentar Sur I. Dicha zona termina de intentar cubrir su demanda con 115.5 l/s que aporta una de las bombas de la estación de bombeo de Gaira, la bomba 1. Por su parte, la otra bomba que abastece aquellos nudos de la zona Sur II con cotas inferiores a los 45 metros lo hace con 73.53 l/s. Por lo tanto, en total se extrae una media de 189.03 l/s de esta estación de bombeo, no consiguiéndose aprovechar al cien por cien el potencial del embalse de Gaira, al igual que ocurre con el caudal proveniente de El Roble. Para terminar de satisfacer las demandas de la zona Sur II que no pueden ser alimentadas mediante la actual bomba dispuesta en Gaira, se recurre a la captación de caudal proveniente de Toribio a través del depósito de regulación número 15. A este depósito se le fuerza a aportar una media de 989.4 l/s pues además de terminar de completar la demanda de la zona Sur II también es el encargado de alimentar toda la región Centro, la cual constituye gran parte de la red. Dicho requerimiento supone una sobreexplotación de la fuente situada en el embalse de Toribio e implica que esta solución no pueda ser llevada a cabo en la práctica, como se ha comentado anteriormente. Decir que, con el objetivo de hacer llegar el caudal procedente de Toribio lo más lejos posible y así poder alimentar a toda la zona Centro, la tubería de transporte encargada de ello que sale del embalse de Toribio posee un gran diámetro de 1524 mm para disminuir así las pérdidas por fricción a lo largo de la tubería y garantizar que el agua llega a todos los consumos con la presión de servicio suficiente.

A continuación, se muestra en un esquema cómo quedan las demandas y los caudales medios extraídos de cada embalse tras poner en práctica la solución del equipo de la universidad en toda la red. Recalcar que este trabajo solo se centrará en los datos relativos a la zona Sur, pues es la zona que constituye el objeto de estudio.



*Figura 16. Demandas y límites de extracción con la solución de la universidad*

Se extrae que la demanda media alcanza los 1946.5 l/s, mientras que la producción es de 1977.78 l/s, diferencia que se atribuye al caudal que es acumulado en los diferentes depósitos de regulación de la red a lo largo de las 24 horas del día.

Este funcionamiento imposible de llevar a cabo que posee la red tras la solución adoptada por el equipo de la universidad, y del cual se parte para aplicar las diferentes medidas correctoras, queda también recogido en uno de los planos adjuntos a esta memoria.

Concretamente, se vuelve necesaria una solución alternativa para la capital de Magdalena por varias razones. Primeramente, en esta situación se excede en 89.4 l/s de media el caudal a extraer de la cuenca de Toribio para alimentar a Sur II y a la zona Centro, lo que ya imposibilita su puesta en práctica. Además, tanto el embalse de El Roble como la estación de bombeo de Gaira no aportan el máximo caudal posible pues del primero se extrae una media de 144.59 l/s cuando su límite de extracción es de 240 l/s y de Gaira 189.03 siendo su tope de 206 l/s de media. Por último, si como solución a esta situación se propusiese disminuir las demandas alimentadas por Toribio asignándoselas a Gaira, la estación de



bombeo actual no conseguiría satisfacer los requisitos mínimos de presión en aquellos nudos de Sur II con cotas superiores a 45 metros pues la bomba dispuesta en ella para alimentar a esta región puede aportar un máximo de aproximadamente 60 metros de altura y la presión mínima de servicio requerida es de 15 mca, tal y como se ha explicado anteriormente (ver ecuaciones [4] y[5]).

Como objetivos específicos marcados para el presente Trabajo Final de Grado se pretenden introducir las modificaciones pertinentes en la red de distribución de agua potable de Santa Marta con el fin de conseguir abastecer durante la estación seca toda la zona Sur con agua procedente de El Roble a partir del tanque 14 y de la estación de bombeo de Gaira sin necesidad de recurrir al agua procedente de Toribio. Dicho embalse, gracias a su gran capacidad y a poseer una cota muy elevada, dispone de potencial suficiente para alimentar toda la zona Centro con ayuda del embalse de Universidad durante la estación seca, y será por tanto utilizado para tal fin.

Las demandas cubiertas anteriormente por la fuente de abastecimiento de Toribio pasarán ahora a estar alimentadas a través de la estación de bombeo de Gaira, por lo que habrá que estudiar las modificaciones a introducir en dicha estación de bombeo para que sea capaz de aportar la altura mínima necesaria a tales consumos. Por su parte, la zona Norte, que junto con el área Centro no constituye objeto de estudio de este trabajo, seguirá cubriendo su demanda mediante el embalse de El Curval, tal y como sucedía en la solución aportada por el equipo de la universidad.

Por otro lado, durante los meses correspondientes a la estación húmeda, donde gracias al aumento de las precipitaciones el caudal que pueden aportar los distintos embalses aumenta, ya no será necesario el uso de las bombas de Gaira por lo que se pararán con el fin de ahorrar los costes energéticos asociados a su funcionamiento, y las demandas de la zona Sur podrán ser cubiertas holgadamente gracias al caudal procedente de Toribio a través del depósito 15 y de El Roble mediante el depósito número 14. Como se ha comentado anteriormente, la temporada seca es la más crítica pues existen problemas de escasez de agua. Es por ello que a la hora de estudiar las distintas modificaciones a introducir en la red se adoptarán las restricciones correspondientes al escenario de dicha estación.

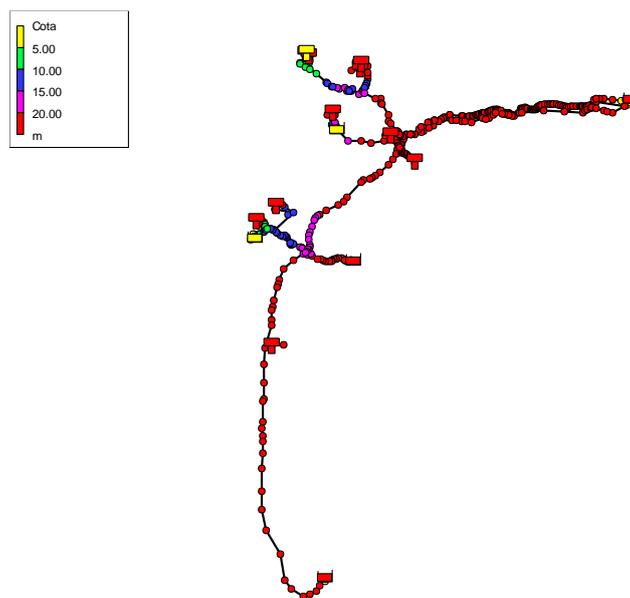


#### 4. PROPUESTA DE ACTUACIÓN

En este capítulo se procede a explicar detalladamente las medidas a tomar sobre la red de Santa Marta para conseguir los objetivos fijados, teniendo en cuenta que, a diferencia de lo que les ocurría a los investigadores del campo de la ingeniería hidráulica que intentaron previamente subsanar las deficiencias de la red, en este trabajo no se cuenta con ninguna restricción impuesta de antemano por lo que el abanico de acciones a tomar se amplía.

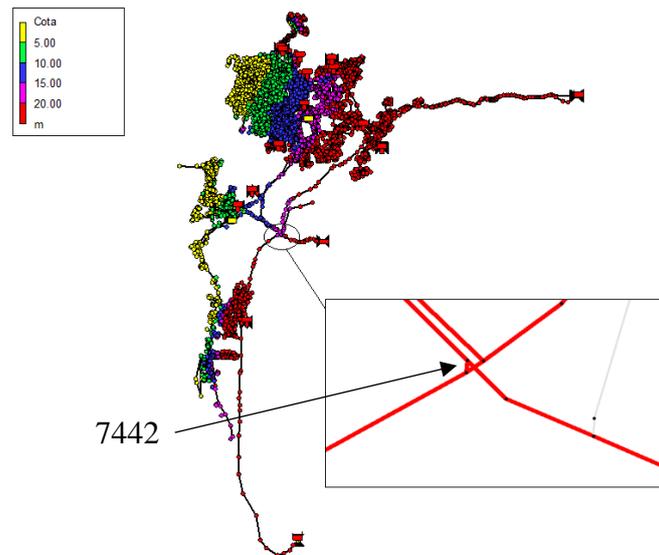
Como paso previo a la implantación de las medidas de actuación pensadas para la red de distribución de agua potable de Gaira en primer lugar se han obtenido dos archivos ‘.net’, formato que adquieren todos los archivos generados mediante Epanet, a partir del archivo original de la red hidráulica de Santa Marta proporcionado por el tutor de este Trabajo Final de Grado en el que se presenta la red completa con la sectorización realizada por el equipo de la universidad.

El primero de ellos habrá de contener exclusivamente las tuberías que forman parte de la red de transporte de agua con sus correspondientes consumos, depósitos y embalses, y simulará el funcionamiento general de toda la red de Santa Marta. Para ello se procede a eliminar todas aquellas tuberías de distribución de agua a los diferentes consumos de la red de diámetro inferior a 152 mm (ver figura 5), dejando solo aquellas destinadas al transporte, además de las diferentes bombas, depósitos y embalses de la red. La configuración final quedará de tal modo que después de cada depósito sólo habrá un nudo que represente la demanda base que éste ha de cubrir. El modelo hidráulico resultante en este archivo, mostrado en la siguiente figura, servirá para comprobar si efectivamente la red, después de haber aplicado las medidas correctoras propuestas en este estudio, se ajusta a los requerimientos de producción y demanda impuestos.



*Figura 17. Red de transporte de Santa Marta*

El segundo archivo, simulará el funcionamiento específico de la región Sur correspondiente con la urbanización de Gaira durante la estación seca. Para obtenerlo se genera un nuevo modelo a partir del original en el que se selecciona la parte de la red correspondiente para que solo se muestren los elementos de la zona Sur y se elimina la tubería 7442, la cual representa la conexión entre los embalses de El Roble y Toribio. Se suprime así una posible alimentación de la zona Sur a través de Toribio, pues se quiere trabajar sobre el funcionamiento de la red durante la estación seca del año.

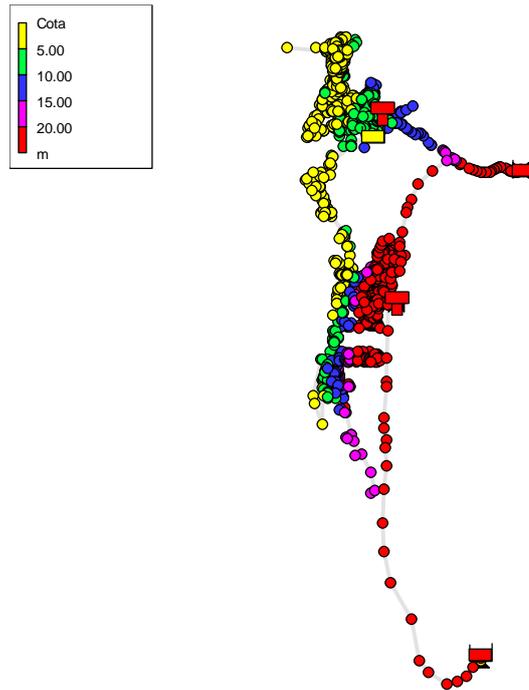


*Figura 18. Identificación de la tubería 7442*

La red resultante correspondiente a la zona de Gaira está formada por un total de 2315 tuberías de diferentes longitudes, diámetros y rugosidades que conectan 1925 nudos representando puntos de demanda, 3 fuentes de suministro: El Roble, Gaira y Toribio, la estación de bombeo de Gaira, y 2 depósitos de regulación: el número 14 que se alimenta a través de El Roble y el número 15 que lo hace gracias al embalse de Toribio.

Puesto que este archivo simula el funcionamiento de la red de distribución de agua potable de Santa Marta durante la estación seca teniendo ya implantada la solución propuesta por la universidad, la división existente entre las zonas Sur I y Sur II es la siguiente: Sur I abarca todos los consumos alimentados a través del depósito 15 y de la bomba 1 de Gaira, mientras que por su parte Sur II se corresponde con la región cuyas demandas se abastecen gracias a la bomba 2 y al embalse de Toribio mediante el tanque 15. Dicha división puede observarse en uno de los planos de AutoCAD adjuntos a esta memoria donde se representa el funcionamiento que tendría la red hidráulica una vez implantada la propuesta de mejora del Departamento de Ingeniería Hidráulica y de Medio Ambiente.

Todo el trabajo llevado a cabo para mejorar dicha solución aportada por el equipo de la universidad se hará sobre este segundo archivo.



*Figura 19. Red hidráulica de Gaira*

De ahora en adelante se trabaja sobre el segundo archivo generado en Epanet y el procedimiento a seguir se divide en varias fases:

Primero se realizará una nueva sectorización de la red de Gaira para así maximizar tanto el caudal aportado por El Roble como por la estación de bombeo y de aislar el tanque 15 del resto de la red con el fin de eliminar por completo la alimentación de la región Sur a través de Toribio durante la estación seca. Una vez implementada, la red inicial quedará dividida en dos subredes, las nuevas zonas Sur I y Sur II, diferenciadas e independientes la una de la otra excepto en el hecho de que al estar cada zona alimentada por una de las bombas de la estación de bombeo la suma del caudal demandado por ambas no ha de sobrepasar los 206 l/s que posee la fuente de suministro de Gaira como límite de extracción durante la estación seca. A partir de ahí, se identificarán las deficiencias surgidas en cada zona y se propondrán medidas correctoras distintas para cada una de ellas.

#### 4.1 Acciones previas

El primer paso a dar consiste en deshacer la sectorización realizada previamente por el equipo de la universidad en su propuesta de solución para lo cual se vuelven a abrir todas aquellas tuberías de la zona de la urbanización de Gaira que anteriormente habían sido cerradas, un total de 83, además de cambiar el estado de las diferentes válvulas reductoras de presión a abierto. Dichas tuberías pueden ser identificadas en uno de los planos de AutoCAD adjuntos a esta memoria.

Tras ello se procede a la realización de las siguientes acciones sobre la red hidráulica:

1- Cierre de las tuberías 13690 y 4461 con el fin de dirigir todo el caudal procedente de El Roble hacia el tanque 14, maximizando así el aprovechamiento de dicho depósito y permitiendo que éste alimente a los máximos nudos de la zona Sur I que le sean posibles.

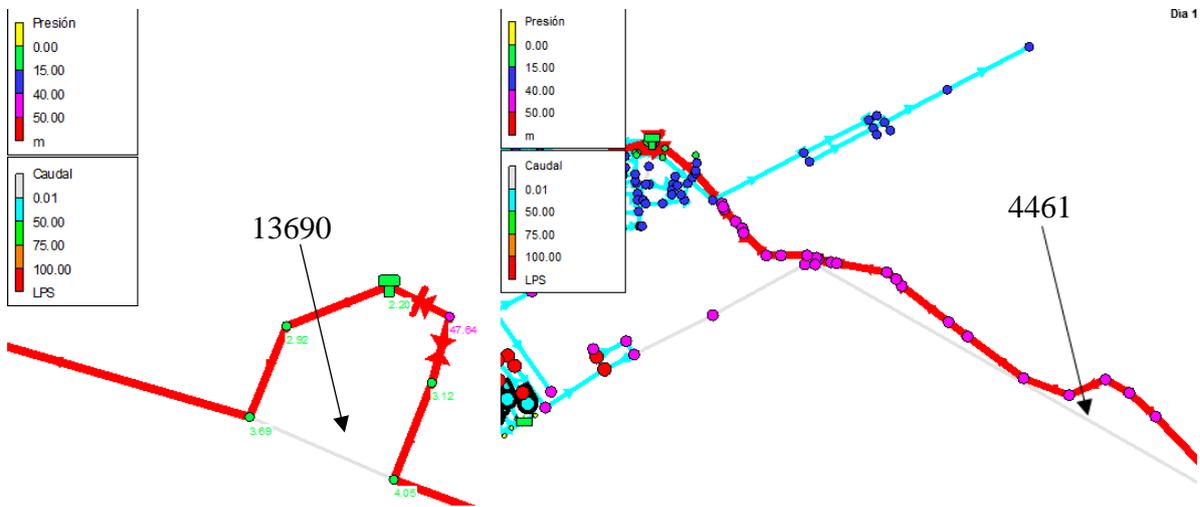


Figura 20. Cierre de las tuberías 13690 y 4461

2- Cierre de la tubería 6463 para así aislar el depósito número 15 de la red de Gaira y por tanto eliminar la alimentación de la zona Sur de la red de Santa Marta con agua procedente de la fuente de suministro de Toribio durante la estación seca, pues es el objetivo a conseguir.

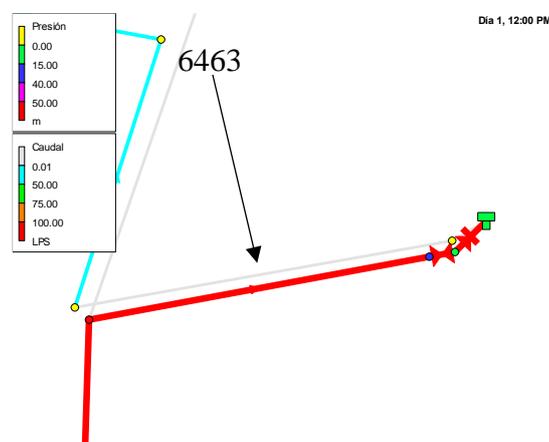


Figura 21. Cierre de la tubería 6463

3-Cierre de la tubería 13711 para conseguir de este modo que la bomba 2 de Gaira deje de alimentar una serie de nudos pertenecientes a la zona Sur I. De este modo la bomba ha de cubrir la demanda de un número más reducido de consumos, lo que, considerando que el caudal máximo bombeado se va a mantener constante, le permitirá aportar una mayor altura a cada uno de ellos. En las siguientes figuras se muestra como la zona señalada deja de ser alimentada por la bomba 2 pues se representa en cada consumo la procedencia de caudal del nudo 5809, el cual constituye el nudo existente a la salida de dicha bomba.

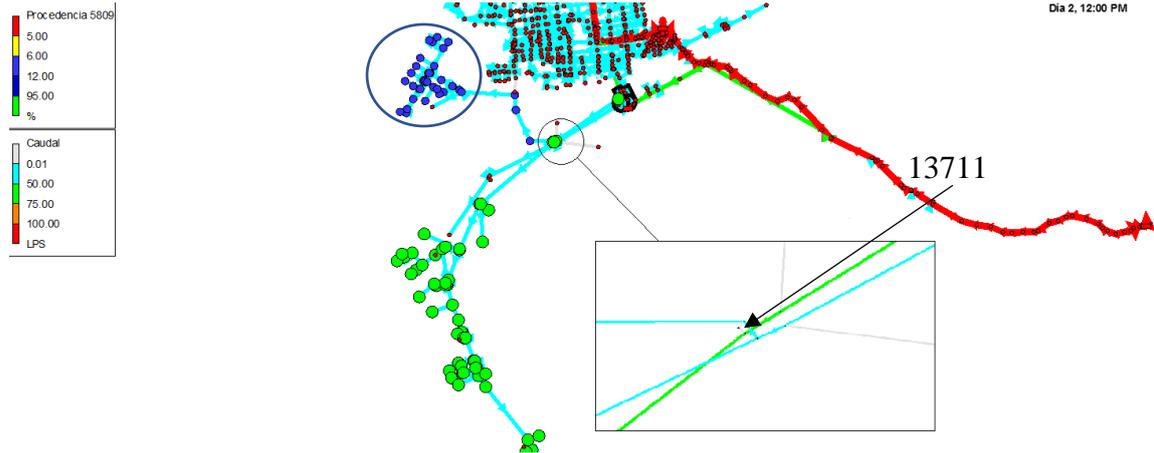


Figura 22. Situación de la zona antes del cierre de la tubería 13711

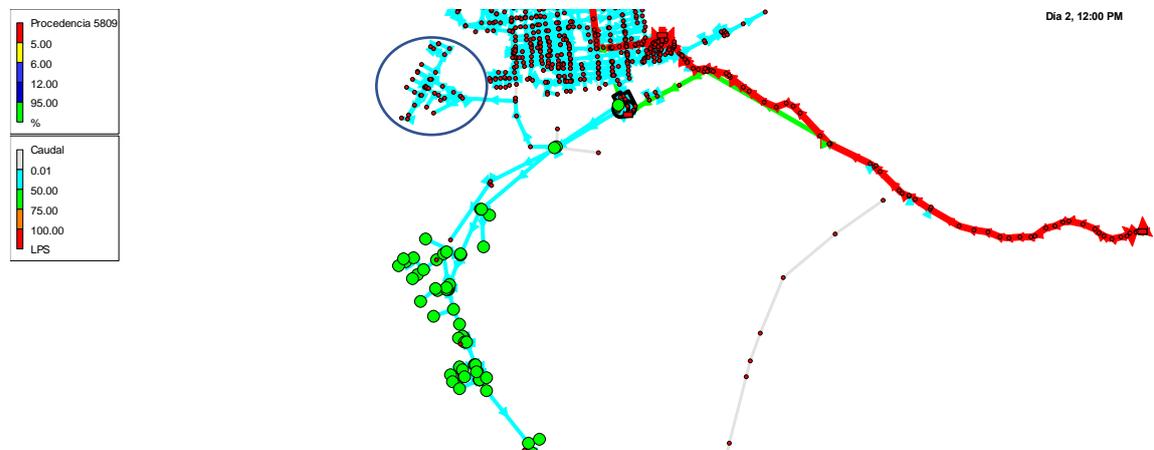


Figura 23. Situación de la zona después del cierre de la tubería 13711

La apertura de 83 tuberías para deshacer la sectorización realizada por el equipo de la universidad no implica ningún coste adicional pues se llevaría a cabo simplemente cambiando a abierto el estado de las válvulas usadas previamente para impedir el paso de caudal por dichas tuberías. Sin embargo, a la hora de proceder al cierre de las 4 tuberías antes mencionadas sí será necesaria la instalación de válvulas en ellas. Las válvulas usadas para impedir el paso de caudal en las tuberías seleccionadas son válvulas de aislamiento de compuerta cuyo precio varía en función del diámetro de la tubería donde se instalan y el cual se ha extraído de la base de precios actualizada de 2016 del Instituto Valenciano de la Edificación (IVE):

Tubería [número]	Diámetro [mm]	Diámetro válvula [mm]	Precio [€]
4461	400	400	3079.68
6463	400	400	3079.68
13690	500	500	5125.81
13711	250	250	863.14

Tabla 4. Tuberías cerradas para realizar la nueva sectorización



El desembolso total llevado a cabo para realizar esta pequeña sectorización ascendería a 12148.31€ puesto que las tuberías escogidas poseen grandes diámetros, con lo que el precio de la válvula a instalar aumenta considerablemente.

Tras esta medida, se produce una redistribución de las demandas de las zonas Sur I y Sur II. Varios de los nudos alimentados por la bomba 2 y que eran englobados dentro del sector Sur II pasan ahora a abastecerse gracias al caudal aportado por la bomba 1 y por tanto a formar parte de la región Sur I, aumentando así la demanda media de esta zona en 6.03 l/s. Sin embargo, la región Sur II mantiene prácticamente constante su demanda pues a pesar de haber disminuido en una media de 6.03 l/s, en la nueva redistribución de zonas realizada con este trabajo algunas de las demandas que anteriormente formaban parte del sector denominado ‘dispersos’ se encuentran ahora dentro de la nueva zona Sur II.

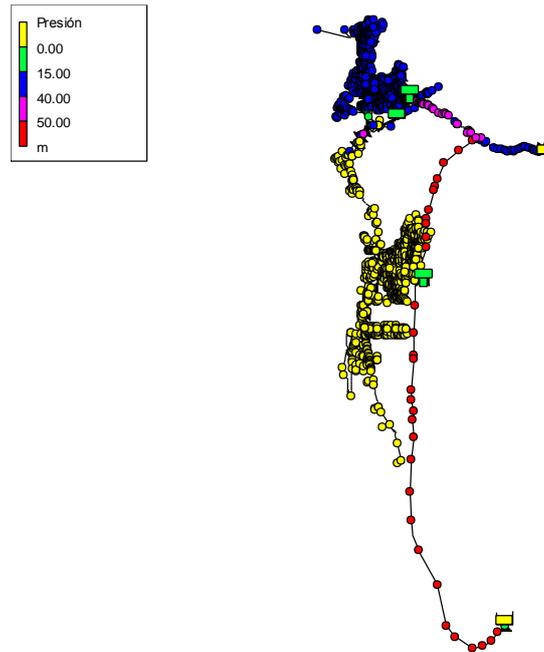
<b>Zona</b>	<b>Demanda media</b>
Norte I	158.22 l/s
Norte II	232.94 l/s
Centro I	259.55 l/s
Centro II	507.33 l/s
Centro III	360.97 l/s
Dispersos	30.82 l/s
Sur I	276.77 l/s
Sur II	119.98 l/s
<b>TOTAL</b>	<b>1946.58 l/s</b>

*Tabla 5. Nuevas demandas tras la sectorización propuesta*

La nueva distribución de demandas por zonas queda recogida en la anterior tabla donde se puede observar cómo los requerimientos de caudal de todas las zonas Norte y Centro permanecen invariables pues en ellas no se ha llevado a cabo ninguna modificación. Además, el sector denominado ‘dispersos’ disminuye su demanda con respecto a la solución aportada por el equipo de la universidad, puesto que tal y como se ha comentado, algunos de los consumos que formaban parte de dicha zona pasan ahora a ser agrupados dentro de las demandas de ‘Sur II’.

#### 4.2 Acciones sobre Sur II

Tras estas acciones encaminadas a maximizar la producción de El Roble y Gaira y eliminar la alimentación de la zona Sur por parte del embalse de Toribio durante la estación seca, surgen sin embargo nuevos problemas en la red de Gaira ya que en los consumos de la región Sur II, después de imponer las condiciones correspondientes al escenario de caudales máximos, el cual se da en el intervalo de tiempo que va desde las 7:00 hasta las 8:00 horas, la presión de servicio es inferior a los 15 metros de presión mínima requerida.



*Figura 24. Problema de presión tras cortar alimentación de Toribio*

Esto es debido a que, en la propuesta realizada en este trabajo, la bomba II dispuesta en Gaira ha de alimentar en su totalidad a todos los consumos de la nueva zona Sur II por lo que se le demanda una cantidad de caudal medio superior a la que se le pedía con la anterior solución para así poder alimentar aquellas zonas de mayor cota que anteriormente eran cubiertas por Toribio. Por ello se procederá a cambiar la bomba de la estación de bombeo de Gaira que abastece a Sur II por otra más potente que se adapte a las nuevas necesidades.

Con el fin de elegir la nueva bomba a instalar se ha de identificar cual es el caudal máximo que ha de aportar dicha bomba, así como el máximo déficit de presión del que se parte en la red, el cual se dará previsiblemente en el consumo situado a mayor cota. Para ello se introducen en Epanet las restricciones correspondientes al escenario de caudales máximos y por tanto presiones mínimas y se obtiene que el mayor caudal que ha de dar la bomba 2 a lo largo del día es de 184.09 l/s y sucede a las 7:00 horas.

Por otro lado, la presión mínima teórica se da en el nudo 6104, que efectivamente es el que posee una mayor cota de todos los nudos de Sur II alimentados a través de la estación de bombeo y se encuentra a 63 metros respecto el nivel del mar, en la zona este de la red hidráulica de Gaira. Esta presión es de -100.76 metros de columna de agua, valor teórico aportado por Epanet que obviamente no es posible obtener en la vida real.

Por lo tanto, si la bomba actual, cuya curva característica viene dada por la expresión  $H = 61.19 - 0.002253 \times Q^2$ , proporciona teóricamente -15 metros de altura cuando por ella circulan 184.09 l/s, unos aproximadamente 660 m<sup>3</sup>/h, para solventar los problemas de presión se ha de buscar una bomba que, para ese mismo caudal aporte, en vez de los -15 metros actuales, 115 metros más. Ello es debido a que si actualmente la presión en el nudo

más desfavorable es de unos -100 mca y la mínima requerida es de 15 mca, el desnivel de presión a vencer asciende a los 115 metros. Por lo tanto, el punto de funcionamiento deseado con el cual seleccionaremos nuestra nueva bomba es:

$$(H, Q) = \left(100 \text{ m}, 184 \frac{\text{l}}{\text{s}}\right)$$

Tras consultar los catálogos de varios fabricantes de bombas hidráulicas como Grundfos, Ebara o IDEAL la alternativa elegida para la zona Sur II consiste en disponer en paralelo tres bombas iguales modelo 80-32H del fabricante IDEAL<sup>1</sup>. El disponer tres bombas en paralelo se justifica puesto que si se instalase una sola bomba no se alcanzaría el punto de funcionamiento deseado, ya que, para lograr los 100 metros de altura requeridos, el caudal bombeado ha de ser de 61.33 l/s. Con tres bombas iguales dispuestas en paralelo el caudal bombeado con el que se obtiene la misma altura se triplica consiguiéndose así el punto de funcionamiento buscado para solventar los problemas de presión existentes en la zona Gaira II.

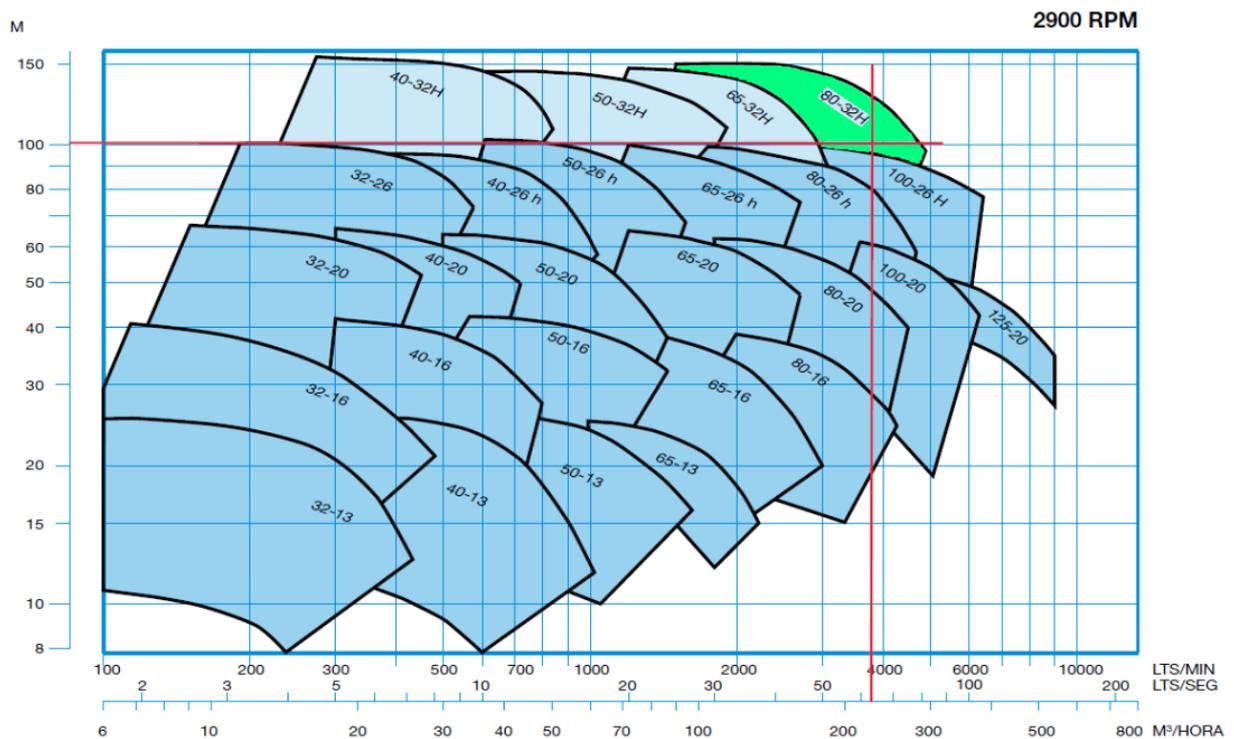
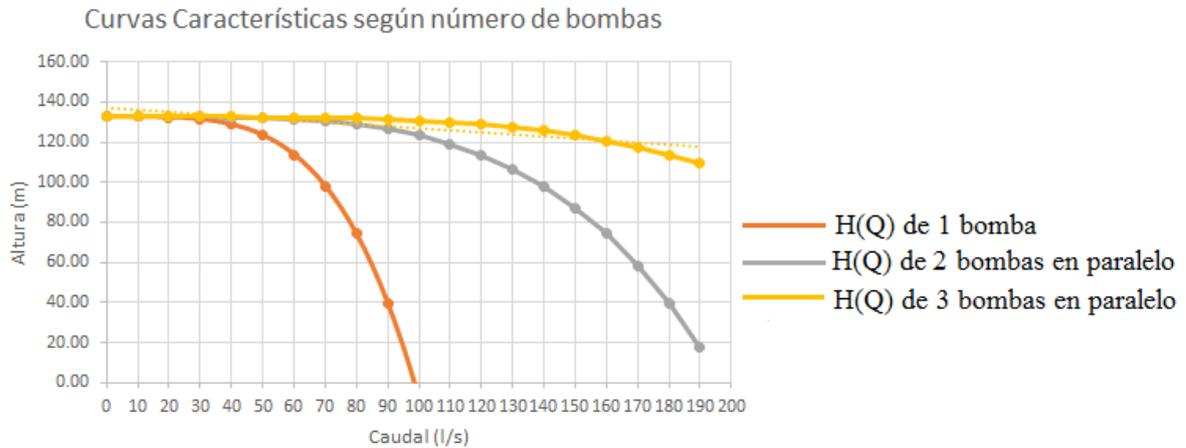


Figura 25. Gráfico para la selección del modelo de bomba (IDEAL, 2017)

Concretamente, en el momento de mayor demanda, cada una de las tres bombas será capaz de aportar 61.33 l/s y una altura total de 112 metros, superiores a los 100 metros requeridos.

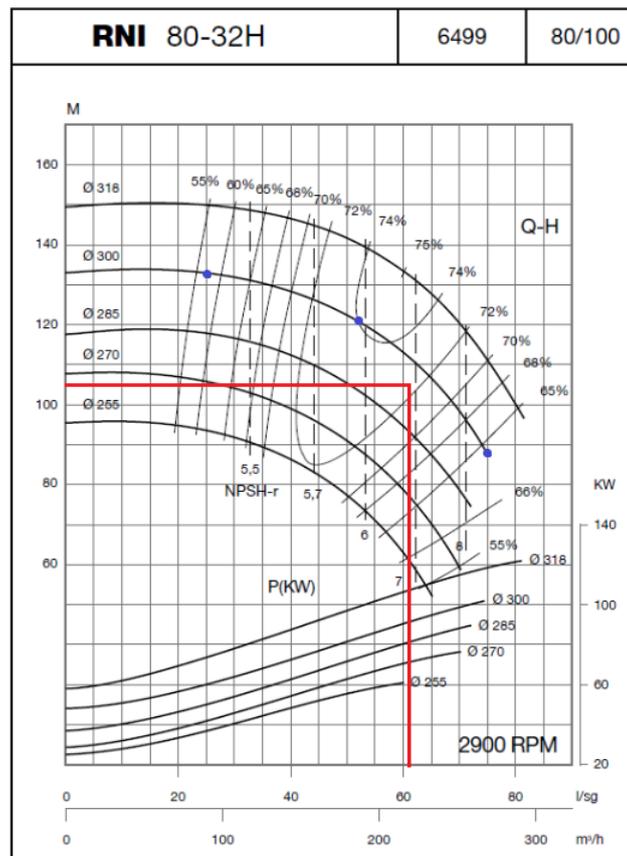
<sup>1</sup> IDEAL es una empresa Valenciana constituida en 1902 con sede en la localidad de Massalfassar dedicada a la fabricación y compra-venta de bombas hidráulicas, motores y maquinaria, y sus accesorios.

Efectivamente y tal y como se puede extraer de la siguiente figura, la estación de bombeo será capaz de aportar los 184 l/s requeridos con 112 metros de altura cuando se encuentren en funcionamiento las tres nuevas bombas instaladas en ella.



*Figura 26. Curvas características según el número de bombas*

A continuación, se presenta el gráfico extraído del catálogo de bombas IDEAL, a partir del cual se han seleccionado el recorte de rodete necesario para la bomba y los 3 puntos a introducir en Epanet para generar su curva característica.

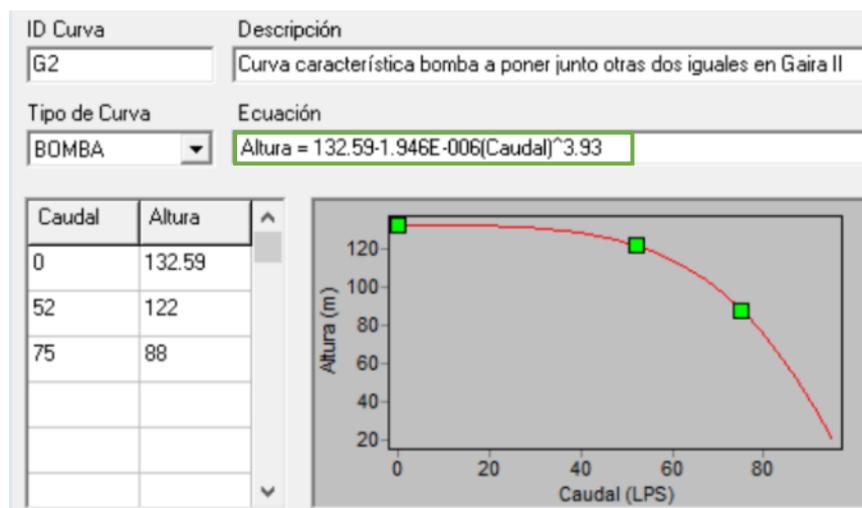


*Figura 27. Diagrama del modelo de bomba 80-32H (IDEAL, 2017)*

La nueva bomba seleccionada para cubrir las demandas de la zona Sur II, junto con otras dos iguales acopladas en paralelo, se trata de una bomba centrífuga horizontal de 150 CV de potencia y 2900 rpm de velocidad. Es una bomba unicelular, puesto que está formada por un único rotor de 300 mm de diámetro y va acoplada a un motor eléctrico asíncrono con rotor en jaula de ardilla. Tanto el cuerpo de la bomba, como el rodete, los aros de cierre, la tapa del cuerpo y la tapa del soporte están diseñados en hierro fundido, y el eje de la bomba en acero inoxidable 13%Cr.

Tras la consulta del catálogo de precios del fabricante se obtiene que el precio de cada bomba junto con el motor y la bancada es de 16403€, por lo que el desembolso total llevado a cabo para adquirir las tres bombas necesarias para la estación de bombeo de Gaira asciende a los 49209€.

Para representar la curva de la bomba elegida en Epanet se seleccionan tres puntos de su curva característica (ver Figura 27), siendo uno de ellos el punto de funcionamiento nominal o de máximo rendimiento, y se introducen en el simulador del programa.



*Figura 28. Introducción de la curva en Epanet*

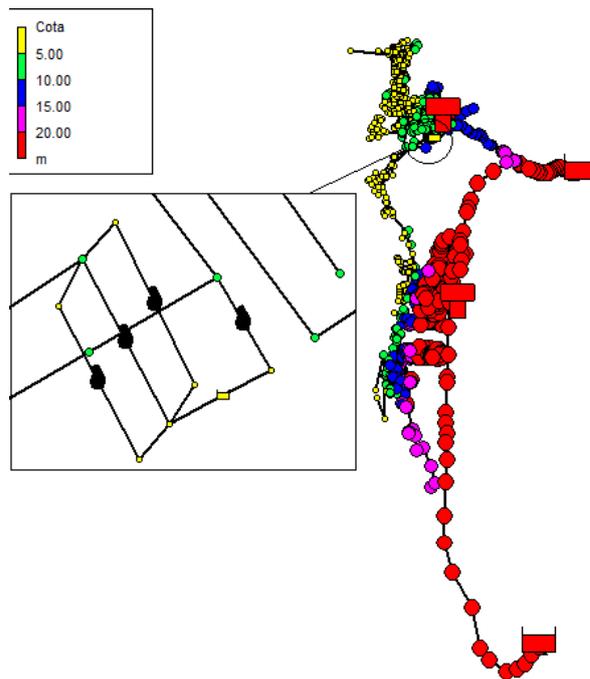
La curva característica obtenida de dicha bomba es:

$$H = 132.59 - 1.94 \times 10^{-6} \times Q^{3.93} \quad [6]$$

Y su rendimiento viene dado por la expresión:

$$\eta = 0.1475 + 0.0221 \times Q - 0.0002 \times Q^2 \quad [7]$$

Por lo tanto, la nueva bomba impulsa los 61.33 l/s máximos requeridos durante las horas del día de mayor consumo con un rendimiento muy aceptable del 75%.

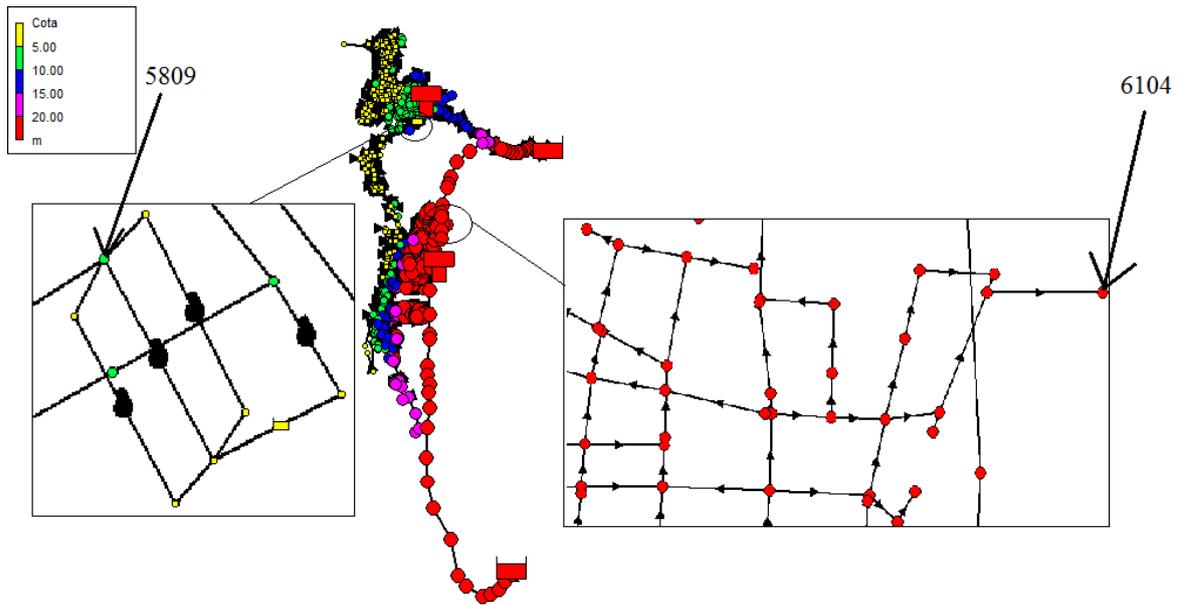


*Figura 29. Introducción de las 3 bombas en Epanet*

Esta nueva configuración para la parte de la estación de bombeo de Gaira destinada a alimentar la zona Sur II ha sido seleccionada teniendo en cuenta las restricciones correspondientes al momento más desfavorable del día, el cual se da en el intervalo de tiempo entre las 7:00 y las 8:00 horas, cuando se produce la máxima demanda de caudal. Este hecho implicará que, a lo largo del día habrá intervalos de tiempo, los correspondientes a las horas de menor demanda, en los que se dispondrá de un exceso de presión de servicio en varios de los nudos de consumo de la región Sur II.

Colocar tres bombas permitirá optimizar el funcionamiento de la nueva estación de bombeo y reducir así el consumo energético. A pesar de que supone un gasto económico mayor a si se hubiese colocado una solo, el disponer de tres bombas permitirá regular el uso de un mayor o menor número de ellas dependiendo de la demanda existente en cada momento del día, con el consiguiente ahorro energético que ello conlleva y por tanto también económico.

Para definir el número de bombas que tendrán que estar en marcha a lo largo del día en cada intervalo de tiempo se ha utilizado el concepto de curva de consigna. La curva de consigna se puede definir como la altura piezométrica mínima necesaria en cabecera, para garantizar una presión residual mínima en el punto de consumo más desfavorable de la red. En este caso se toma como nudo de cabecera el 5809, correspondiente a la salida a la zona Sur II de la estación de bombeo y el nudo 6104 como el punto de consumo más desfavorable perteneciente a la zona Sur II, tal y como se ha visto anteriormente.



*Figura 30. Localización de los nudos 5809 y 6104*

Teniendo en cuenta la restricción impuesta de que la presión mínima requerida en todos los consumos es de 15 metros de columna de agua y que el nudo 6104 posee una cota de 62.92 metros, la altura piezométrica mínima necesaria en todo momento en el nudo más desfavorable es de:

$$H_{\min 6104} = \frac{P_{\min}}{\gamma} + z_{6104} = 15 + 62.92 = 77.92 \text{ m} \quad [8]$$

Por lo que la expresión de la curva de consigna quedaría como:

$$H_{\min 5809}(t) = H_{\min 6104} + R_{5809-6104} \times Q(t)^2 \quad [9]$$

$$H_{\min 5809}(t) = 77.92 + R_{5809-6104} \times Q(t)^2 \quad [10]$$

En estas ecuaciones  $R_{5809-6104}$  representa las pérdidas de carga por fricción existentes desde el nudo de cabecera hasta el nudo más desfavorable y se obtiene mediante la expresión:

$$R_{i-j} = \frac{8fl_{i-j}}{\pi^2 g D^5} \quad [11]$$

Aquí  $f$  representa el factor de fricción de las tuberías,  $l_{i-j}$  la longitud de cada una de ellas y  $D$  su diámetro.

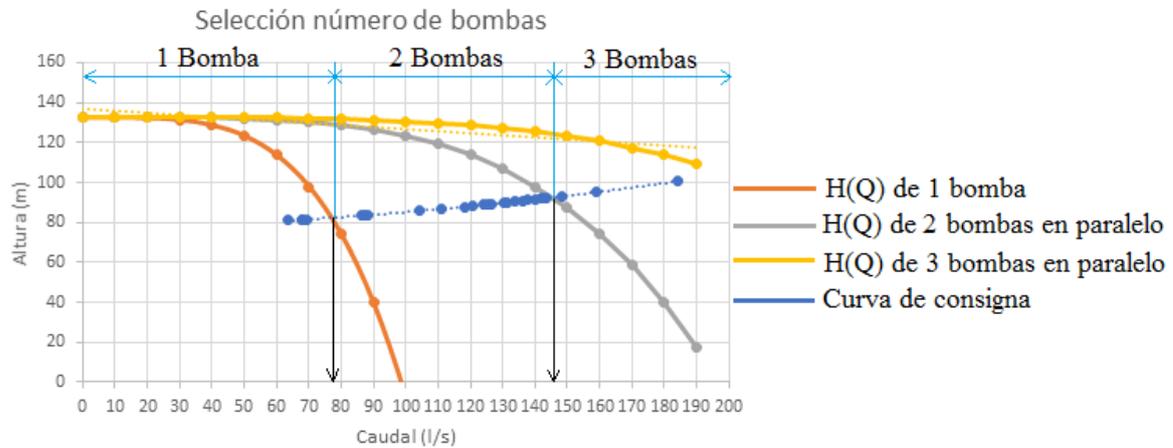
Puesto que entre estos dos consumos la red es muy compleja, calcular las pérdidas de carga que hay entre ellos puede resultar muy tedioso. Es por ello que con la ayuda de la hoja de cálculo Excel se obtiene la expresión de la curva de consigna en el nudo 5809 a partir de la altura piezométrica de dicho nudo en cada instante y el exceso de presión disponible en el nudo 6104 como sigue:

$$H_{\min 5809}(t) = H_{5809}(t) - \left( \frac{P_{6104}(t)}{\gamma} - \frac{P_{\min}}{\gamma} \right) \quad [12]$$

Nudo 5809		Nudo 6104		Nudo 5809		
Tiempo	$H_{5809}(t)$	Tiempo	$\frac{P_{6104}(t)}{\gamma}$	Tiempo	$Q(t)$	$H_{\min 5809}(t)$
[horas]	[m]	[horas]	[m]	[horas]	[l/s]	[m]
0:00	132.17	0:00	65.63	0:00	68.14	81.54
1:00	132.27	1:00	66.18	1:00	63.35	81.09
2:00	132.14	2:00	65.48	2:00	69.33	81.66
3:00	131.49	3:00	62.89	3:00	87.26	83.6
4:00	130.41	4:00	59.65	4:00	104	85.76
5:00	128.05	5:00	54	5:00	125.51	89.05
6:00	126.11	6:00	49.99	6:00	137.47	91.12
7:00	112.24	7:00	26.46	7:00	184.09	100.78
8:00	123.88	8:00	45.76	8:00	148.23	93.12
9:00	127.33	9:00	52.48	9:00	130.29	89.85
10:00	125.65	10:00	49.11	10:00	139.86	91.54
11:00	125.18	11:00	48.19	11:00	142.25	91.99
12:00	121.13	12:00	40.88	12:00	158.98	95.25
13:00	128.22	13:00	54.36	13:00	124.32	88.86
14:00	128.69	14:00	55.42	14:00	120.73	88.27
15:00	124.93	15:00	47.72	15:00	143.44	92.21
16:00	127.14	16:00	52.08	16:00	131.49	90.06
17:00	126.33	17:00	50.42	17:00	136.27	90.91
18:00	127.88	18:00	53.63	18:00	126.71	89.25
19:00	126.74	19:00	51.27	19:00	133.88	90.47
20:00	128.98	20:00	56.09	20:00	118.34	87.89
21:00	129.76	21:00	57.97	21:00	111.17	86.79
22:00	131.43	22:00	62.69	22:00	88.46	83.74
23:00	131.55	23:00	63.09	23:00	86.07	83.46

Tabla 6. Obtención de la curva de consigna para el nudo 5809

Tras representar en un diagrama H-Q los valores obtenidos para la curva de consigna junto con las curvas características de la estación de bombeo correspondientes a los casos de tener en marcha 1, 2 o las 3 bombas, podemos definir el número de bombas necesarias en cada intervalo de tiempo para garantizar la presión mínima de 15 metros en el nudo 6104.



*Figura 31. Selección del número bombas*

Del gráfico se puede extraer que cuando el caudal aportado por la estación de bombeo sea inferior a los aproximadamente 77 l/s será suficiente con poner en marcha una sola bomba; cuando se encuentre entre los 77 l/s y alrededor de 145 l/s, dos serán las bombas que habrán de trabajar; y los intervalos de tiempo en los cuales el caudal a bombear sea superior a los 145 l/s será necesario el trabajo conjunto de las tres bombas.

Para determinar cuáles son dichos intervalos de tiempo en los que debemos aplicar cada una de estas configuraciones se utiliza el patrón de demanda, el cual es un dato conocido para cada intervalo de tiempo.

El caudal en cada instante se define como  $Q_{ins} = c(t) \times \bar{Q}$ , siendo  $\bar{Q}$  el caudal medio, cuyo valor es de 119.54 l/s. Así, análogamente se obtiene que los intervalos de tiempo en los que bastará tener una sola bomba en marcha son aquellos con un patrón de demanda inferior a 0.644 ( $c(t) < \frac{77}{119.54}$ ); cuando éste se encuentre entre 0.644 y 1.213 ( $c(t) < \frac{145}{119.54}$ ) serán necesarias dos bombas; y en los instantes en los que supere el valor de 1.213, habrán de funcionar las tres.

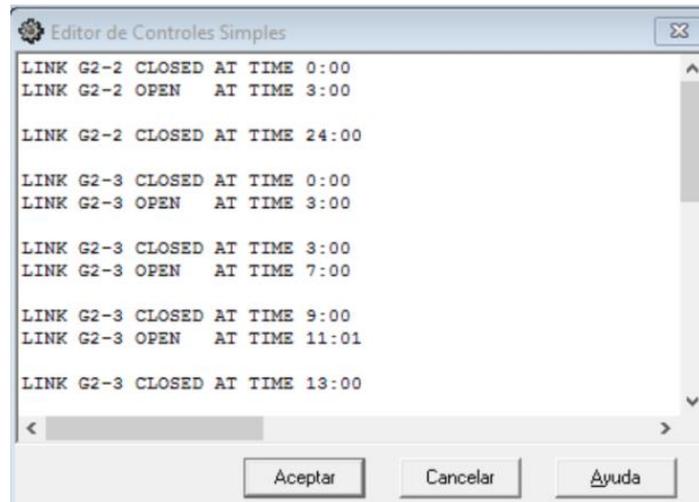


Hora	c(t)	$Q(t)$ [l/s]	n Bombas
0:00	0.57	68.14	1
1:00	0.53	63.35	1
2:00	0.58	69.33	1
3:00	0.73	87.26	2
4:00	0.87	104	2
5:00	1.05	125.51	2
6:00	1.15	137.47	2
7:00	1.53	184.09	3
8:00	1.24	148.23	3
9:00	1.09	130.29	2
10:00	1.17	139.86	2
11:00	1.19	142.25	2
12:00	1.32	158.98	3
13:00	1.04	124.32	2
14:00	1.01	120.73	2
15:00	1.2	143.44	2
16:00	1.1	131.49	2
17:00	1.14	136.27	2
18:00	1.06	126.71	2
19:00	1.12	133.88	2
20:00	0.99	118.34	2
21:00	0.93	111.17	2
22:00	0.74	88.46	2
23:00	0.72	86.07	2

*Tabla 7. Número de bombas necesarias en cada instante*

Según la tabla anterior, a lo largo del día será necesario el uso de 2 bombas durante la mayor parte del tiempo, concretamente a lo largo de 18 horas; las 3 bombas han de estar funcionando durante 3 horas al día, las correspondientes a los intervalos de máxima demanda en los que se necesita que la estación de Gaira bombee el máximo caudal que le sea posible; y durante las 3 horas restantes en las cuales se produce una menor demanda, bastará con una sola bomba para abastecer a la urbanización de Gaira.

Para implementar dicha regulación en el modelo hidráulico del archivo de Epanet correspondiente a la red de Gaira se hace uso de la opción 'controles' para indicar al programa qué bombas han de estar en marcha en cada momento. Decir que los nombres asignados a cada una de las bombas de la parte de la estación de bombeo de Gaira destinada a abastecer a la región Sur II en Epanet son: G2-1, G2-2 y G2-3.



*Figura 32. Controles para el número de bombas*

Puesto que a la hora de la verdad resulta más costoso medir caudales que medir presiones, para poner en práctica esta regulación en la realidad se podría hacer uso de un sistema de control automático por PLC que garantizase la presión mínima requerida en el consumo más desfavorable mediante el uso de presostatos. Estos dispositivos serían los encargados de leer la presión de servicio existente en cada instante en dicho nudo y transformarla en una señal eléctrica que sería posteriormente enviada al sistema de control.

A continuación, se procede a calcular el ahorro en términos energéticos que implica el llevar a cabo este uso regulado de las bombas de Gaira II. La potencia consumida por una bomba para impulsar un cierto caudal  $Q$  con una determinada altura  $H$  y rendimiento  $\eta$  se obtiene a través de la expresión:

$$P = \frac{\gamma \times Q \times H}{\eta} [W] \quad [13]$$

Aquí  $\gamma$  representa el peso específico del fluido a bombear, en este caso agua, y se obtiene como el producto de su densidad  $\rho$  por la gravedad terrestre  $g$ , por lo que para el agua el peso específico es de:

$$\gamma = \rho \times g = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9.8 \frac{m^2}{s} = 9800 \frac{N}{m^3} \quad [14]$$

Y la energía consumida se obtendría de multiplicar dicha potencia, en kilovatios, por las horas de funcionamiento de la bomba:

$$E = P \times t [KWh] \quad [15]$$



Por lo tanto, a continuación, se presentan dos tablas con los caudales que habría de impulsar la estación de bombeo en cada momento del día y la energía total que consumiría para conseguirlo en función del número de bombas que se encuentren funcionando en cada intervalo de tiempo.

Hora	Q [l/s]	n Bombas	Q/n [l/s]	H [m]	$\eta$	P/n [KW]	E[KWh]
0:00	68.14	3	22.71	132.18	0.55	53.86	161.57
1:00	63.35	3	21.12	132.28	0.52	52.14	156.42
2:00	69.33	3	23.11	132.15	0.55	54.27	162.82
3:00	87.26	3	29.09	131.49	0.62	60.35	181.04
4:00	104	3	34.67	130.4	0.67	65.80	197.40
5:00	125.51	3	41.84	128.01	0.72	72.69	218.08
6:00	137.47	3	45.82	126.05	0.74	76.47	229.40
7:00	184.09	3	61.36	111.97	0.75	89.71	269.14
8:00	148.23	3	49.41	123.79	0.75	79.79	239.38
9:00	130.29	3	43.43	127.29	0.73	74.21	222.62
10:00	139.86	3	46.62	125.59	0.74	77.21	231.64
11:00	142.25	3	47.42	125.1	0.75	77.95	233.86
12:00	158.98	3	52.99	121	0.76	83.01	249.04
13:00	124.32	3	41.44	128.18	0.72	72.31	216.94
14:00	120.73	3	40.24	128.66	0.71	71.17	213.51
15:00	143.44	3	47.81	124.86	0.75	78.32	234.97
16:00	131.49	3	43.83	127.1	0.73	74.59	223.76
17:00	136.27	3	45.42	126.27	0.74	76.09	228.27
18:00	126.71	3	42.24	127.84	0.72	73.07	219.22
19:00	133.88	3	44.63	126.69	0.74	75.34	226.02
20:00	118.34	3	39.45	128.96	0.71	70.41	211.22
21:00	111.17	3	37.06	129.75	0.69	68.11	204.33
22:00	88.46	3	29.49	131.43	0.63	60.74	182.23
23:00	86.07	3	28.69	131.55	0.62	59.95	179.86
TOTAL							5092.75

Tabla 8. Potencia consumida por la estación de bombeo sin regulación



Hora	Q [l/s]	n Bombas	Q/n [l/s]	H [m]	$\eta$	P/n [KW]	E [KWh]
0:00	68.14	1	68.14	101.47	0.72	93.49	93.49
1:00	63.35	1	63.35	109.22	0.74	91.03	91.03
2:00	69.33	1	69.33	99.28	0.72	93.90	93.90
3:00	87.26	2	43.63	127.19	0.73	74.40	148.79
4:00	104	2	52	121.83	0.76	82.14	164.27
5:00	125.51	2	62.76	110.07	0.75	90.65	181.30
6:00	137.47	2	68.74	100.39	0.72	93.70	187.41
7:00	184.09	3	61.36	111.97	0.75	89.71	269.14
8:00	148.23	3	49.41	123.79	0.75	79.79	239.38
9:00	130.29	2	65.15	106.51	0.74	92.08	184.16
10:00	139.86	2	69.93	98.13	0.71	94.07	188.13
11:00	142.25	2	71.13	95.76	0.71	94.32	188.65
12:00	158.98	3	52.99	121	0.76	83.01	249.04
13:00	124.32	2	62.16	110.9	0.75	90.26	180.52
14:00	120.73	2	60.37	113.26	0.75	89.00	178.01
15:00	143.44	2	71.72	94.53	0.7	94.41	188.82
16:00	131.49	2	65.75	105.55	0.74	92.40	184.80
17:00	136.27	2	68.14	101.48	0.72	93.48	186.97
18:00	126.71	2	63.36	109.21	0.74	91.03	182.06
19:00	133.88	2	66.94	103.57	0.73	92.98	185.97
20:00	118.34	2	59.17	114.72	0.75	88.11	176.23
21:00	111.17	2	55.59	118.61	0.76	85.24	170.48
22:00	88.46	2	44.23	126.9	0.73	74.96	149.93
23:00	86.07	2	43.04	127.48	0.73	73.83	147.66
<b>TOTAL</b>							<b>4210.15</b>

*Tabla 9. Potencia consumida por la estación de bombeo con regulación*

Se extrae que el consumo energético diario de la estación de bombeo si no aplicamos la regulación explicada anteriormente asciende a los 5092.75 KWh mientras que, si se aplica, disminuye hasta 4210.15 KWh diarios lo que supone un ahorro energético considerable de 882.6 KWh al día.

Para tener en cuenta el ahorro que supone la regulación en términos económicos, se toma como precio medio de referencia de la electricidad en el país sudamericano de 0.148€/KWh para todas las horas del día puesto que la tarifa eléctrica en Colombia no dispone de una discriminación horaria en la que los precios de la electricidad varíen en función de las horas del día. Considerando dicho precio, el desembolso económico que supondría mantener las tres bombas funcionando las 24 horas del día es de 753€/día. Sin embargo, habiendo aplicado la regulación el gasto económico disminuye hasta los 623€/día lo que implica un ahorro de 130 € diarios.

### 4.3 Acciones sobre Sur I

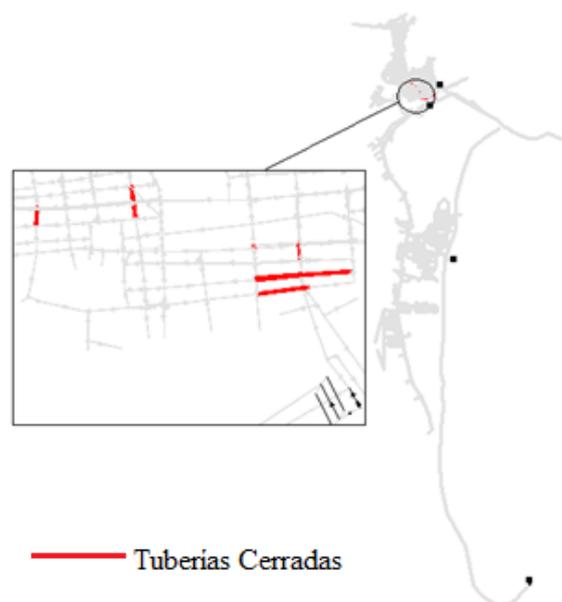
Con las anteriores medidas se resolverían los problemas de desabastecimiento de agua y los de falta de presión de servicio en la zona Sur II de la red. Ahora el estudio se centra en solucionar las deficiencias surgidas en la nueva zona Sur I para terminar de solucionar la red por completo y conseguir cumplir los objetivos globales marcados al inicio del trabajo.

Recordar que las demandas pertenecientes a la región Sur I aumentaron tras la nueva sectorización propuesta con este proyecto. Para cubrirlas se estudiarán cuáles son las acciones necesarias con el fin de lograr aprovechar al cien por cien el caudal procedente del embalse de El Roble manteniendo la bomba dispuesta originalmente en la estación de bombeo de Gaira para abastecer a esta zona, la cual podía aportar un máximo de 61.19 m:

$$H = 61.19 - 0.002253 \times Q^2 \quad [16]$$

Se pretende que, al igual que en la anterior solución, todo Sur I satisfaga sus demandas a través exclusivamente de agua procedente de El Roble y de la bomba 1 de la estación de bombeo de Gaira durante la temporada seca.

Concretamente, la nueva demanda durante la estación seca de la zona Sur I asciende a los 276.77 l/s, mientras que de El Roble se podría extraer idealmente un caudal máximo de 240 l/s. Es por ello que, tras haber llevado a cabo la correspondiente ampliación de capacidad del depósito 14 comentada anteriormente, se va a proceder al cierre o apertura de una serie de tuberías de la región Sur I de la red elegidas a conciencia y localizadas en la siguiente figura, con el objetivo de conseguir que el tanque 14 proporcione un caudal medio lo más próximo a esos 240 l/s que posee como límite de extracción el embalse, maximizando así el aprovechamiento de la fuente de El Roble.



*Figura 33. Tuberías cerradas para maximizar producción de El Roble*

Con el cierre de un total de 11 tuberías se logra finalmente que el valor medio del caudal saliente del tanque 14 alcance los 239.94 l/s, consiguiendo así maximizar el caudal que este proporciona sin a priori sobrepasar el límite de producción de El Roble. Dichas tuberías se muestran en uno de los planos adjuntos a esta memoria donde se localizan con precisión dentro de la red hidráulica de Gaira. Al igual que en la anterior sectorización propuesta, las válvulas usadas para impedir el paso de son válvulas de aislamiento de compuerta cuyo precio varía en función del diámetro de la tubería donde se instalan.

<b>Tubería</b> [número]	<b>Diámetro</b> [mm]	<b>Diámetro válvula</b> [mm]	<b>Precio</b> [€]
1819	75	80	149.58
1827	75	80	149.58
1829	100	100	178.71
1830	300	300	1117
1834	75	80	149.58
1854	75	80	149.58
1903	75	80	149.58
3313	100	100	178.71
4763	75	80	149.58
4766	100	100	178.71
4858	100	100	178.71

*Tabla 10. Tuberías cerradas para maximizar el caudal saliente del depósito 14*

El gasto económico total en válvulas para realizar tal sectorización con el fin de aprovechar al máximo el potencial de la fuente de suministro de El Roble ascendería a los 2729.32€.

Sin embargo, a pesar de haber conseguido maximizar las demandas de Sur I alimentadas a través de El Roble, llegados a este punto, tras simular el funcionamiento de la red, en el modelo hidráulico de Epanet la estación de bombeo de Gaira sí que excedería sus límites de extracción para conseguir cubrir todas las demandas de Sur I, lo que implica que, en la práctica, la bomba 1 resultaría insuficiente. Durante los meses del año correspondientes a la temporada seca la máxima producción de ésta es de 206 l/s y en este nuevo escenario, a lo largo del día durante las horas de mayor demanda correspondientes al intervalo de tiempo entre las 7:00 y las 8:00 horas se sobrepasaría esa capacidad. En dichos instantes Gaira habría de abastecer a sus nudos correspondientes con 223.85 l/s, 184.09 destinados a alimentar Sur II y 39.76 l/s para Sur I, excediéndose así su capacidad de extracción en 17 l/s.

Tal incumplimiento se muestra en la figura siguiente donde se representa el caudal que circula en cada momento del día por las tuberías 13611 y 40536, correspondientes con las tuberías de abastecimiento de las 3 bombas destinadas a alimentar Sur II y de la bomba instalada para la zona Sur I respectivamente.

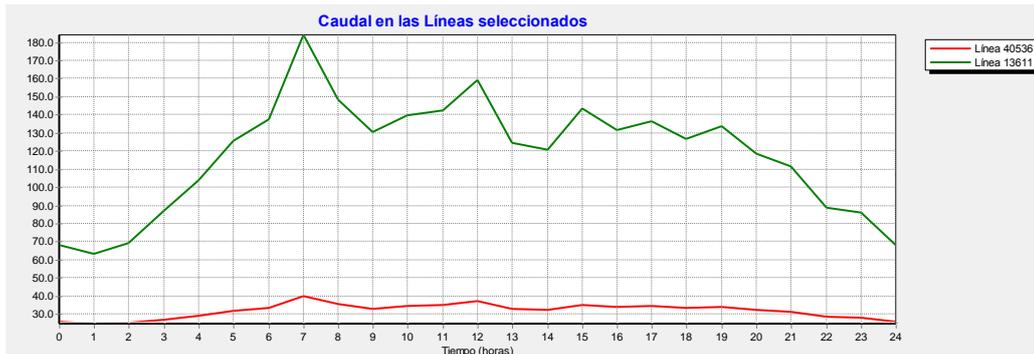


Figura 34. Gráfico del caudal extraído de Gaira I y Gaira II

La solución pasaría por, al igual que se ha hecho con la bomba situada en Sur II, cambiar la bomba original dispuesta en Sur I por otra de mayor potencia. Sin embargo, puesto que se quiere mantener la bomba dispuesta inicialmente en la estación de bombeo de Gaira para alimentar Sur I, se van a proponer a continuación una serie de modificaciones sobre la bomba que lo que hagan sea limitar el caudal que ésta impulsa durante las horas de mayor demanda. Dicho caudal pasaría a ser aportado mediante el agua almacenada a lo largo del día en el depósito 14, consiguiendo de este modo no incumplir la restricción impuesta por el límite de extracción del embalse El Roble. La efectividad de dichas modificaciones, junto con las propuestas para la zona Sur II se comprobará en un capítulo posterior.

#### 4.3.1 Parada de la bomba 1 durante las horas pico

Una primera forma de limitar el caudal que impulsa la bomba 1 durante las horas pico podría consistir en parar la bomba durante dicho intervalo de tiempo anulando así por completo el caudal aportado por la misma y reduciéndose el que aporta en conjunto la estación de bombeo. Esto provocaría que la totalidad de las demandas que eran cubiertas anteriormente por Gaira I pasasen ahora a hacerlo a través de agua procedente de El Roble. Para poner en práctica dicha medida en el modelo hidráulico de Epanet se vuelve a hacer uso de los controles y se indica que la bomba 1, la cual ha sido guardada con el nombre de G1, ha de estar parada desde las 7:00 hasta las 8:00 horas.

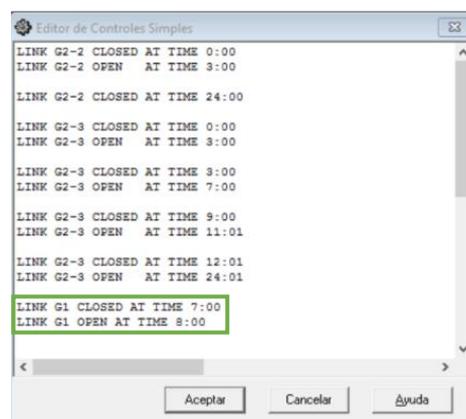


Figura 35. Controles para parar la bomba 1

#### 4.3.2 Implementación de una válvula limitadora de caudal

Otra medida podría consistir en colocar una válvula limitadora de caudal o válvula de estrangulamiento a la salida de la bomba 1 de Gaira, en la tubería número 40536 de forma que se asegurara que el caudal impulsado entre las bombas 1 y 2 no excede en ningún momento los 206 l/s que puede aportar como máximo la estación de bombeo de Gaira.

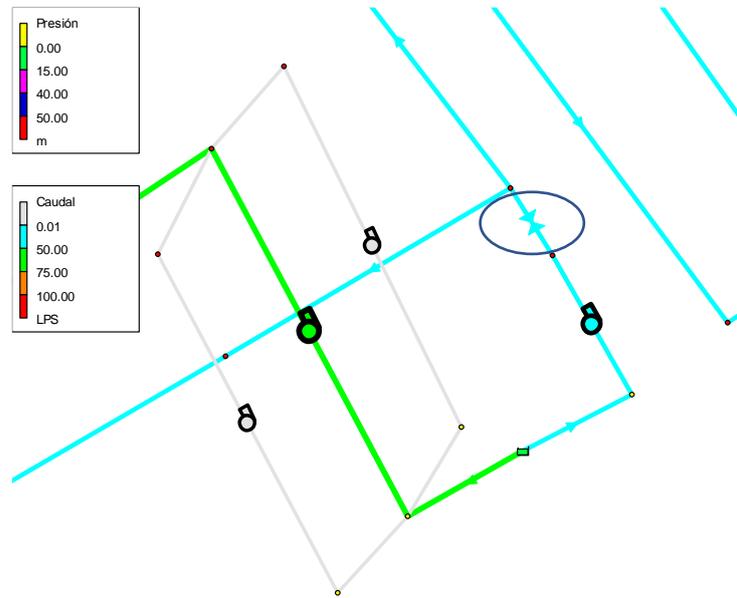


Figura 36. Introducción de la válvula en la red hidráulica

Para ello, dicha válvula automática actuará impidiendo el paso de agua por la tubería presente a la salida de la bomba 1 cuando el caudal que circule por ella supere los 21.9 l/s, pues es la diferencia entre el máximo caudal admitido de 206 l/s, y el caudal aportado por la bomba 2 durante las 7:00 y las 8:00 horas, correspondientes al intervalo más crítico, de 184.1 l/s. Para indicar a Epanet los instantes en los que ha de actuar la válvula, la cual ha sido guardada con el nombre de V5830, se vuelve a hacer uso de los controles añadiendo las tres nuevas líneas de texto remarcadas en la siguiente figura:

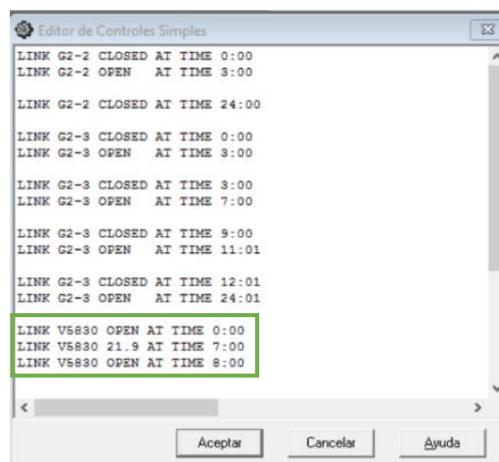


Figura 37. Controles para la actuación de la válvula

En la práctica, a la hora de elegir el modelo de válvula limitadora de caudal se ha de tener en cuenta que la tubería a la salida de la bomba en la que se procede a la instalación de la misma posee un diámetro de 300 mm y por ella ha de circular un caudal máximo de 37.24 l/s. Tras consultar catálogos de distintos fabricantes se escoge el modelo 700 EN-SERIES del fabricante Bermad<sup>2</sup> y de una de las listas de precios disponible se extrae que adquirir dicha válvula automática supondría un desembolso económico que asciende a los 9448.79€.

En la siguiente figura se muestra la lista de especificaciones técnicas de la válvula seleccionada:



*Figura 38. Información de catálogo de la válvula (Bermad, 2017)*

#### 4.3.3 Implementación de un variador de velocidad

Otra de las acciones posibles a tomar para limitar el caudal que impulsa la bomba 1 durante las horas de mayor demanda podría consistir en disminuir su velocidad de giro, reduciendo así el caudal que ésta impulsa.

Al cambiar la velocidad de giro de una bomba, la nueva curva característica de la misma se modifica y viene dada por la expresión:

$$H' = \alpha^2 A + \alpha \times B \times Q' - C \times Q'^2 \quad [17]$$

---

<sup>2</sup> Bermad es una importante empresa multinacional presente en más de 137 países en todo el mundo y con más de 50 años de experiencia con sede española en Barcelona. La empresa está destinada a la fabricación de sistemas de gestión de agua y otras válvulas de control de fluidos.

En esta ecuación  $\alpha = \frac{N_B}{N_A}$ , siendo  $N_A$  la velocidad nominal de la bomba,  $N_B$  la nueva velocidad de giro y  $Q' = Q \times \alpha$ , el nuevo caudal que impulsa la bomba tras modificar su velocidad.

Si se disminuye la velocidad de giro de la bomba 1 y se le hace girar al 80% de su velocidad nominal, la nueva curva característica de la misma se verá modificada y vendrá dada por la expresión:

$$H' = 0.64 * 61.19 - 0.002253 \times Q'^2 \quad [18]$$

Tras modificar su velocidad, el caudal máximo que la bomba 1 aporta de 7:00 a 8:00 horas es de 11.82 l/s que sumados a los 184.09 l/s que continúan siendo impulsados mediante la bomba 2 dan un total de 195.91 l/s inferiores a los 206 l/s como máximo que podía aportar la estación de bombeo de Gaira.



Figura 39. Curvas características de la bomba con y sin reducción de velocidad

Para implementar esta posible solución en Epanet se vuelve a hacer uso de los controles y se añaden a los ya escritos las dos nuevas líneas de texto remarcadas en la siguiente figura:

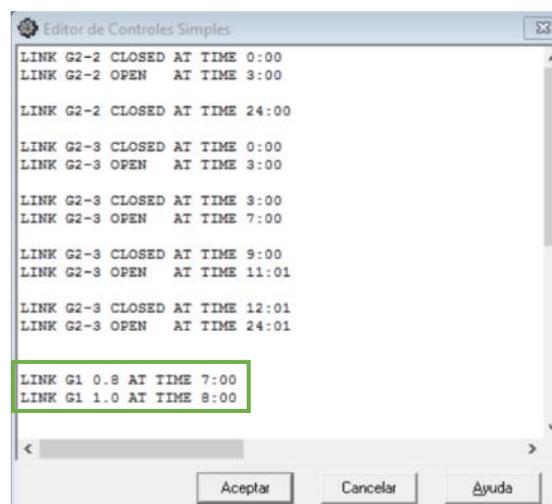


Figura 40. Controles para simular el variador de velocidad

Y para llevarlo a cabo en la práctica es necesario adquirir un variador de velocidad, dispositivo que permite controlar la velocidad de rotación de un motor de corriente alterna a través de la modificación de la frecuencia de alimentación. Para ello se recurrirá a la empresa Power Electronics España<sup>3</sup>.

A la hora de escoger el variador de velocidad que se ha de adquirir para la bomba de Gaira que alimenta la zona Sur I, se ha de conocer la potencia que consume la misma. Puesto que se desconoce el rendimiento de la bomba implementada para abastecer a Sur I, se estima un valor medio razonable para el rendimiento del 60% y se procede a calcular cual es la potencia de dicha bomba.

Hora	$Q$ [l/s]	$H$ [m]	$\eta$	$P$ [KW]
0:00	70.82	49.89	0.6	57.7
1:00	68.98	50.46	0.6	56.86
2:00	67.49	50.92	0.6	56.14
3:00	68.48	50.62	0.6	56.62
4:00	69.36	50.35	0.6	57.04
5:00	70.57	49.96	0.6	57.6
6:00	71.3	49.73	0.6	57.92
7:00	75.52	48.34	0.6	59.63
8:00	73.39	49.05	0.6	58.8
9:00	72.29	49.41	0.6	58.35
10:00	72.88	49.2	0.6	58.59
11:00	73.16	49.13	0.6	58.71
12:00	74.67	48.62	0.6	59.31
13:00	72.46	49.36	0.6	58.42
14:00	71.93	49.53	0.6	58.19
15:00	73.25	49.10	0.6	58.75
16:00	72.51	49.34	0.6	58.44
17:00	72.76	49.26	0.6	58.54
18:00	72.06	49.49	0.6	58.25
19:00	72.38	49.38	0.6	58.39
20:00	71.24	49.75	0.6	57.9
21:00	70.38	50.03	0.6	57.51
22:00	68.52	50.61	0.6	56.64
23:00	68.38	50.65	0.6	56.58
24:00:00	25.62	59.71	0.6	24.99

*Tabla 11. Potencia consumida por la bomba 1 en cada instante del día*

<sup>3</sup> Power Electronics España es una empresa localizada en el municipio de Paterna en Valencia, constituida en 1987 y destinada a la fabricación y comercialización de arrancadores estáticos y variadores de velocidad.

De la tabla anterior se extrae que la máxima potencia consumida por la bomba se da a las 7 horas y alcanza los 59.63 KW. Teniendo esto en cuenta, y considerando condiciones de carga normales, el variador elegido es el Serie SD500 de 75 KW correspondiente con el modelo SD5110 4 2. Tras contactar con el distribuidor comercial de la empresa para la zona de Levante se averiguó que el precio de dicho variador asciende a los 3894€.

380Vca - 480Vca (-15% a +10%)									
TALLA	CÓDIGO	Temperatura de trabajo 50°C CARGA PESADA				temperatura de trabajo 40°C CARGA NORMAL			
		Corriente nominal (A)	Potencia motor a 400Vca		Sobrecarga 150% durante 60s	Corriente nominal (A)	Potencia motor a 400Vca		Sobrecarga 110% durante 60s
			kW	HP			kW	HP	
1	SD5002 4 2	2.8	0.75	1	4.4	4	1.5	2	4.4
	SD5004 4 2	4	1.5	2	6	5.4	2.2	3	6
	SD5006 4 2	6	2.2	3	9	8	3.7	5	9
	SD5008 4 2	8.5	3.7	5	13.2	12	5.5	7.5	13.2
2	SD5012 4 2	12	5.5	7.5	18	16	7.5	10	18
	SD5018 4 2	16.5	7.5	10	25	23	11	15	25
3	SD5024 4 2	24	11	15	36	32	15	20	36
	SD5030 4 2	30	15	20	45	40	18.5	25	45
4	SD5039 4 2	39	18.5	25	58	48	22	30	58
	SD5045 4 2	45	22	30	67	61	30	40	67
5	SD5060 4 2	61	30	40	91	78	37	50	91
	SD5075 4 2	75	37	50	112	100	45	60	112
	SD5090 4 2	91	45	60	136	115	55	75	136
6	SD5110 4 2	110	55	75	165	150	75	100	165
	SD5150 4 2	152	75	100	228	180	90	125	228

Figura 41. Selección del modelo de variador (Power Electronics, 2017)

Los sistemas tradicionales de control de flujo como válvulas de estrangulamiento, sistemas de bypass, control todo o nada etc., añaden pérdidas al sistema. Dichas pérdidas adicionales modifican la curva de carga de la instalación reduciendo el punto de funcionamiento del sistema. Por el contrario, los variadores de velocidad funcionan modificando la curva característica de la bomba para adecuar el proceso a la demanda solicitada. Con ello, la potencia requerida por la bomba se reduce significativamente, provocando un ahorro de energía considerable e incrementando la calidad y regulación del proceso.

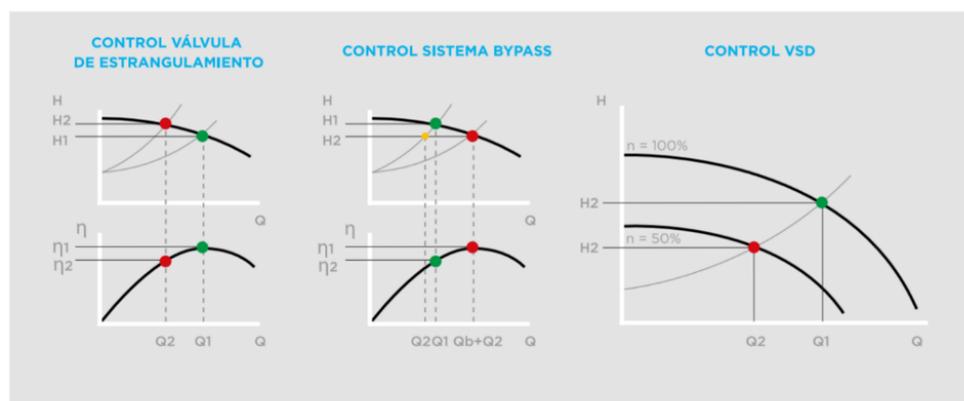


Figura 42. Comparación de los sistemas de control de flujo (Power Electronics, 2017)

En la anterior figura obtenida del catálogo de Power Electronics se demuestra que el control con válvula de estrangulamiento y el sistema de control con bypass, representados en los dos primeros gráficos, modifican las pérdidas hidráulicas para obtener un punto de operación diferente con el caudal deseado. Por el contrario, los variadores de velocidad cambian la curva de operación de la bomba tal y como se puede observar en el tercer gráfico, proporcionando ahorros elevados con respecto a los sistemas tradicionales, en este caso la válvula limitadora de caudal.

Dicho comportamiento se puede comprobar en las siguientes tablas comparativas. En la primera se detalla la potencia consumida por la bomba 1 tras la implantación de la válvula automática, cuyo valor total asciende a los 1012 KW diarios, y en la segunda, tras la adquisición del variador de velocidad, disminuye hasta los 997.02 KW diarios.

<i>Hora</i>	<i>Q [l/s]</i>	<i>H [m]</i>	<i>η</i>	<i>P [KW]</i>
0:00	41.79	57.26	0.6	39.08
1:00	40.7	57.46	0.6	38.20
2:00	40.71	57.46	0.6	38.20
3:00	42.08	57.20	0.6	39.31
4:00	43.6	56.91	0.6	40.53
5:00	45.94	56.44	0.6	42.35
6:00	47.4	56.13	0.6	43.45
7:00	21.9	60.11	0.6	21.50
8:00	49.67	55.63	0.6	45.13
9:00	47.94	56.01	0.6	43.86
10:00	49.17	55.74	0.6	44.77
11:00	49.65	55.64	0.6	45.12
12:00	51.78	55.15	0.6	46.64
13:00	48.2	55.96	0.6	44.05
14:00	47.83	56.04	0.6	43.78
15:00	50.49	55.45	0.6	45.73
16:00	49.33	55.71	0.6	44.88
17:00	50.01	55.56	0.6	45.38
18:00	49.05	55.77	0.6	44.68
19:00	49.95	55.57	0.6	45.34
20:00	48.27	55.94	0.6	44.10
21:00	47.42	56.12	0.6	43.47
22:00	44.79	56.67	0.6	41.46
23:00	44.19	56.79	0.6	40.99
<b>TOTAL</b>				<b>1012.00</b>

*Tabla 12. Potencia consumida por la bomba 1 tras la instalación de la válvula automática*



<i>Hora</i>	<i>Q [l/s]</i>	<i>H [m]</i>	<i>η</i>	<i>P [KW]</i>
0:00	41.79	57.26	0.6	39.08
1:00	40.7	57.46	0.6	38.20
2:00	40.69	57.46	0.6	38.19
3:00	42.06	57.20	0.6	39.30
4:00	43.58	56.91	0.6	40.51
5:00	45.92	56.44	0.6	42.33
6:00	47.36	56.14	0.6	43.42
7:00	11.82	38.84	0.6	7.49
8:00	49.68	55.63	0.6	45.14
9:00	47.93	56.01	0.6	43.85
10:00	49.15	55.75	0.6	44.75
11:00	49.62	55.64	0.6	45.10
12:00	51.75	55.16	0.6	46.62
13:00	48.15	55.97	0.6	44.01
14:00	47.77	56.05	0.6	43.73
15:00	50.43	55.46	0.6	45.68
16:00	49.26	55.72	0.6	44.83
17:00	49.92	55.58	0.6	45.31
18:00	48.95	55.79	0.6	44.61
19:00	49.85	55.59	0.6	45.26
20:00	48.16	55.96	0.6	44.02
21:00	47.29	56.15	0.6	43.37
22:00	44.64	56.70	0.6	41.34
23:00	44.03	56.82	0.6	40.86
TOTAL				997.02

*Tabla 13. Potencia consumida por la bomba 1 con el variador de velocidad*

#### 4.3.4 Medidas para garantizar la recursividad del depósito 14

Una vez seleccionada una de las alternativas propuestas anteriormente se conseguiría finalmente cubrir las demandas de la zona Sur I con la presión de servicio mínima requerida de 15 metros en todos los nudos de consumo y sin superar los límites de extracción de la fuente de suministro de Gaira.

Ahora el último paso a dar para solucionar por completo la nueva zona Sur I, surgida tras la sectorización propuesta en este trabajo con el fin de eliminar la alimentación de la red de Gaira por parte del embalse de Toribio durante la estación seca, consiste en garantizar la recursividad del depósito de regulación número 14.

Este depósito, situado al norte de la red de Gaira (ver Figura 6), alimenta a parte de los consumos de esta zona gracias a la fuente de suministro de El Roble. Garantizar que un depósito cumple con la condición de recursividad consiste en comprobar que a lo largo de las 24 horas del día ni se vacía ni desborda su capacidad en ningún momento.

En la práctica, esto se conseguiría igualando el valor medio del caudal aportado por el depósito a lo largo del día través de su tubería de abastecimiento, con el valor constante del caudal entrante al mismo. La evolución de ambos caudales se encuentra representada en la siguiente figura, en la que el caudal saliente del depósito es el que circula por la tubería 13692 y el entrante por la tubería 13691.



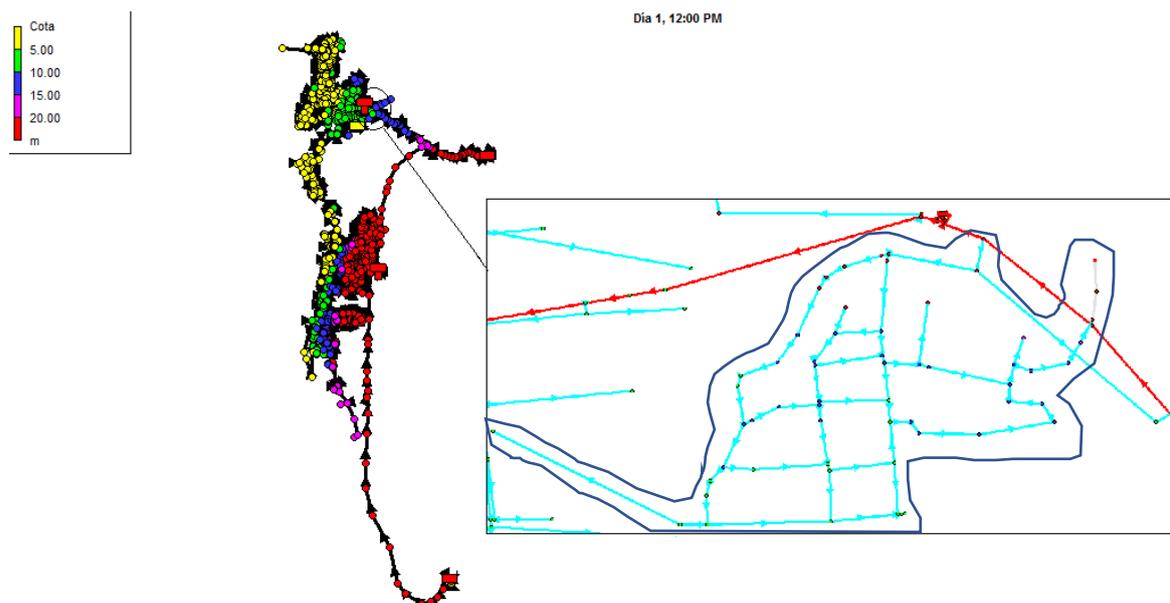
*Figura 43. Caudal entrante y saliente del depósito 14*

Tal y como se vio al comienzo de este capítulo, tras el cierre de 13 tuberías se ha conseguido obtener en el depósito número 14 una salida de caudal variable cuyo valor medio aproximado es de 240 l/s. En la entrada se tiene un caudal constante restringido por el valor de consigna establecido en la válvula limitadora de caudal situada a su entrada. Para garantizar la recursividad del depósito 14 se procede a cambiar en Epanet esta cantidad a 240 l/s, igualando de este modo el valor medio del caudal aportado con el del caudal entrante al depósito.

Propiedad	Valor
*ID Válvula	Tank_14_FCV
*Nudo Inicial	5979
*Nudo Final	125
Descripción	
Etiqueta	
*Diámetro	300
*Tipo	Limitadora Caudal
*Consigna	240
Coef. Pérdidas	0
Estado Fijo	Ninguno
Caudal	236.00
Velocidad	3.34
Pérdidas	2.10
Calidad	0.00
Estado	Activo

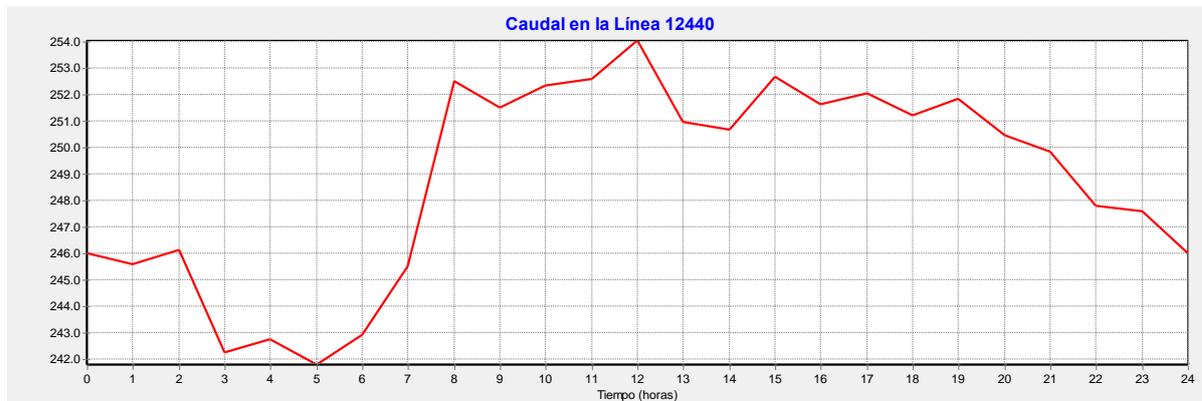
*Figura 44. Cambio del valor de consigna de la válvula limitadora del tanque 14*

Sin embargo, el haber cambiado el valor de consigna de la válvula limitadora de caudal a 240 solo garantiza que por la tubería en la que se encuentra instalada dicha válvula no circulen más de esos 240 l/s. No obstante, puesto que entre el embalse de El Roble y el tanque existen una serie de demandas que son alimentadas directamente a través de la tubería de transporte que sale del embalse y no mediante el tanque, en el modelo hidráulico de Epanet se viola la limitación de caudal de 240 l/s que se pueden extraer de El Roble a lo largo de todo el día. Esto se debe a que a los 240 l/s que se fuerzan a circular a través de la válvula habría que sumarles las demandas de aquellos nudos alimentados a través del embalse y situados entre éste y el depósito de regulación. Tales demandas se encuentran localizadas dentro de la red en la siguiente figura y son incluidas en la lista de demandas por zonas dentro del apartado denominado ‘dispersos’ (ver Tabla 5).



*Figura 45. Demandas alimentadas directamente a través de El Roble*

En la siguiente figura que muestra el caudal que circula por la tubería 12440, la cual representa la tubería de salida del embalse, se verifica el incumplimiento de la restricción de 240 l/s impuesta por el límite de extracción de El Roble a lo largo de todas las horas del día.



*Figura 46. Caudal circulante por la tubería 12440*

Se extrae que el máximo caudal teórico aportado por El Roble ocurre a las 12:00 horas y es de 254.04 l/s por lo que se debería de disminuir la demanda existente entre dicho embalse y el depósito 14 en 14 l/s aproximadamente.

Para ello se ha procedido a la desconexión del conjunto de demandas alimentadas directamente a través de El Roble de la tubería principal de abastecimiento que sale de él mediante el cierre de la tubería que representa dicha conexión, la número 1733 del modelo hidráulico, localizada dentro de la red en la figura 47. Puesto que la tubería mencionada posee un diámetro de 160 mm, tal desconexión se ha realizado mediante una válvula de compuerta de 200 mm de diámetro.

Tras la anterior medida éstas demandas quedarían descolgadas de la red por lo que se vuelve necesario volver a conectarlas a algún punto de la misma. Finalmente son enganchadas a la tubería principal de salida del depósito 14 pues es, de entre las conducciones cercanas al conjunto de demandas desconectadas, la que posee un mayor diámetro y por tanto, mayor capacidad de transporte.

Tal conexión se realiza mediante la incorporación de una nueva conducción que une los nudos 5908 y 5978, ambos localizados en la figura 47. El primero forma parte de ese conjunto de demandas que quedan aisladas y el segundo pertenece a la tubería de salida del tanque 14. La nueva tubería a instalar en la red tendrá un diámetro de 110 mm y una longitud aproximada de 83m. Tras consultar la base de precios del Instituto Valenciano de la Edificación (IVE) se extrae que el precio por metro de tubería de polietileno de alta densidad de 110 mm es de 16.71€, por lo que el desembolso total que va a suponer la instalación de dicha conducción es de 1386.93€.

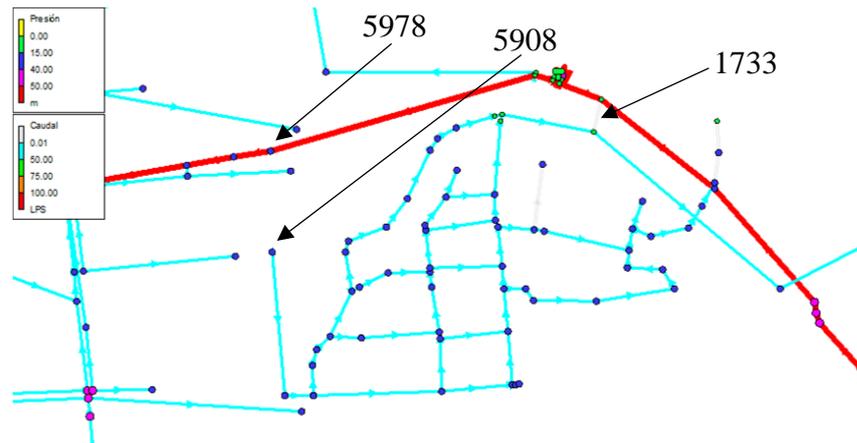


Figura 47. Situación de las tuberías próximas al tanque 14 antes de las medidas

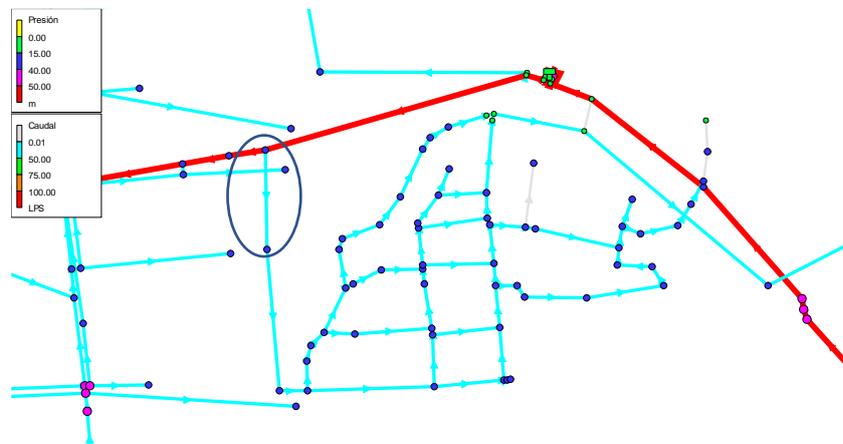


Figura 48. Situación de las tuberías próximas al tanque 14 después de las medidas

A pesar de estas medidas, tras la simulación con el nuevo escenario se observa que aún no se alcanza el objetivo de no sobrepasar los 240 l/s a extraer de El Roble, tal y como se muestra en la siguiente figura. Esto es debido a pequeñas demandas, que en conjunto representan aproximadamente 4 l/s, que aún se alimentan directamente a través de esta fuente de suministro y que, al contrario que las anteriores, solo tienen posibilidad de satisfacer sus requerimientos de caudal a través de dicho embalse.



Figura 49. Caudal circulante por la tubería 12440



Para subsanar esta deficiencia se procedería a cambiar de nuevo el valor de consigna de la válvula del tanque 14 a 236 l/s, consiguiéndose que de El Roble nunca se sobrepasaran los 240 l/s que posee de límite de extracción tal y como se comprobará en el capítulo siguiente dedicado al funcionamiento de la red tras la implementación de las mejoras.

La solución al problema con el límite de extracción de El Roble supondría sin embargo una nueva violación de las restricciones del proyecto, pues al añadir nuevas demandas a cubrir a través del depósito 14, el inconveniente se traslada ahora hasta éste ya que ahora es forzado a aportar de media 249.26 l/s.

Con el fin de corregir esta nueva deficiencia se vuelve a llevar a cabo una pequeña sectorización de la zona Sur I, en la que de algún modo se deshaga parte de la sectorización realizada al comienzo del capítulo en la que se pretendía maximizar el caudal aportado por el tanque 14. Se busca disminuir el número de demandas alimentadas por dicho depósito de regulación, las cuales pasarán a ser cubiertas por la estación de bombeo de Gaira que aún posee margen en su capacidad pues el caudal medio que ésta aporta actualmente es de 151.43 l/s, inferior a los 206 l/s de límite de extracción.

<b>Tubería</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Diámetro válvula</b>	<b>Precio</b>
<b>[número]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[€]</b>
1809	100	100	178.71
4772	75	80	149.58
4812	300	300	1117
4861	75	80	149.58
4866	200	200	518.12
4867	75	80	149.58
4872	75	80	149.58
4876	75	80	149.58
4905	75	80	149.58

*Tabla 14. Tuberías cerradas para garantizar 240 l/s de media en el tanque 14*

Tras la apertura de siete tuberías, concretamente las número 1827, 1829, 1834, 1854, 1903 y 3313 y el cierre de otras nueve, enumeradas en la anterior tabla, lo que supone un desembolso económico en válvulas de compuerta de 2711.31 €, se consigue finalmente que del depósito 14 se extraiga una media de 234.03, inferiores a los 240 l/s definidos como límite de extracción. En uno de los planos de localización adjuntos a esta memoria se localizan exactamente dichas tuberías.



## 5. FUNCIONAMIENTO DE LA RED TRAS LA REMODELACIÓN

Una vez enunciadas las medidas correctoras a tomar en la red hidráulica de Santa Marta con el fin de subsanar el desabastecimiento de la ciudad, en este capítulo se procederá a mostrar el funcionamiento que tiene la red tras la implantación de las mismas para comprobar si efectivamente las acciones propuestas resultan efectivas y cumplen con los objetivos planteados al comienzo del proyecto.

### 5.1 Comprobación general

Primero, se verificará que tras la solución propuesta con este proyecto no se sobrepasan los límites de extracción de ninguna de las fuentes de suministro y que todas las demandas quedan cubiertas igualándose la producción de los embalses con la demanda de los diferentes consumos. Para ello se va a hacer uso del primer archivo generado con Epanet que simula el funcionamiento simplificado de toda la red hidráulica de Santa Marta (ver Figura 17) y se introduce en cada uno de los nudos situados a la salida de los depósitos la demanda de la zona, o parte de la misma, que abastecen tras la nueva sectorización llevada a cabo. Tras realizar la simulación del funcionamiento de la red en Epanet, con el escenario correspondiente a los caudales medios los resultados obtenidos son los siguientes:

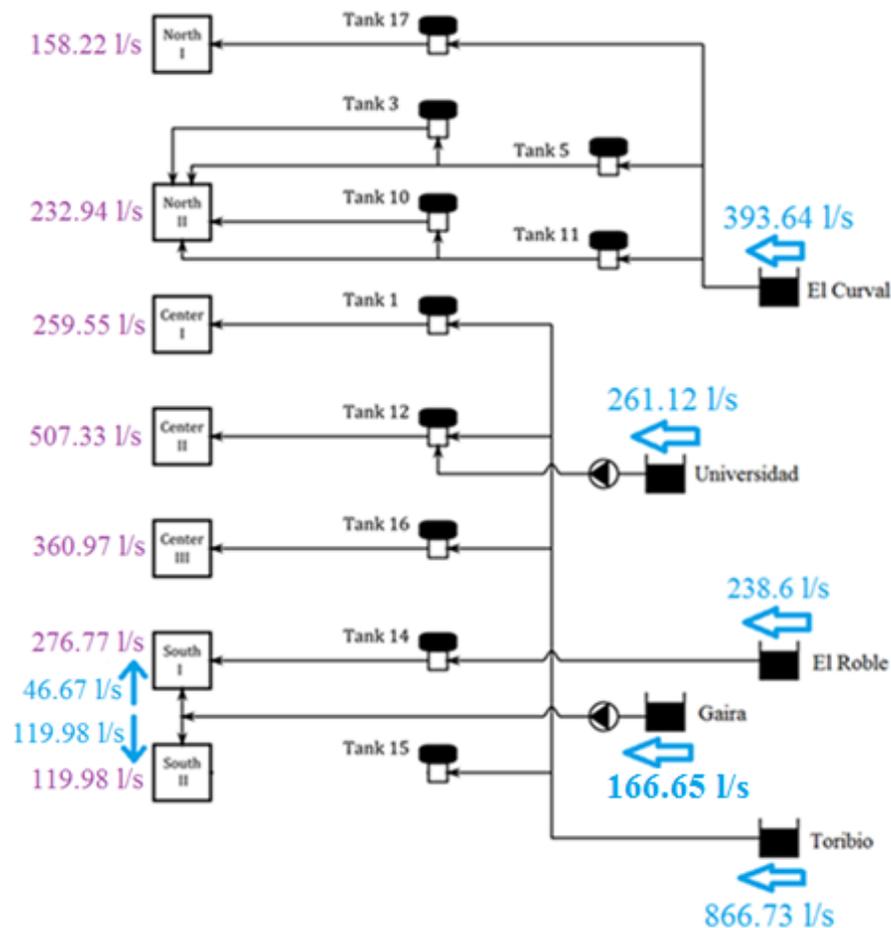


Figura 50. Demandas y límites de extracción tras la solución propuesta

En comparación con el funcionamiento que poseía la red antes de la implantación de ninguna medida, con respecto a las demandas, solo varían las correspondientes a las zonas Sur I y Sur II, tal y como se ha explicado anteriormente. Se puede comprobar cómo tras las medidas correctoras efectivamente se consigue maximizar el caudal extraído de El Roble el cual pasa de aportar 144.59 l/s a 238.6 l/s. Lo mismo sucede con la bomba II de la estación de bombeo la cual anteriormente cubría las demandas correspondientes con 73.53 l/s y ahora, tras aumentar el número de demandas que ha de alimentar se procede a aumentar su potencia con la instalación de 3 bombas en paralelo que aportan un total de 119.98 l/s de media. Además, en esta nueva situación no se sobrepasan los límites de extracción de ninguna de las fuentes. Por último, a diferencia de lo que sucedía en la anterior propuesta donde se exigía al embalse de Toribio aportar un caudal superior al límite de extracción en 89 l/s, con la nueva solución, tras eliminar la alimentación de la región Sur por parte del depósito 15, de Toribio se extraen 866.73 l/s inferiores a los 900 l/s que posee el embalse como límite de extracción.

## 5.2 Comprobaciones específicas

Una vez comprobado el funcionamiento general de la red y que la producción total es capaz de satisfacer la demanda, se procede a examinar la correcta operatividad de la zona Sur.

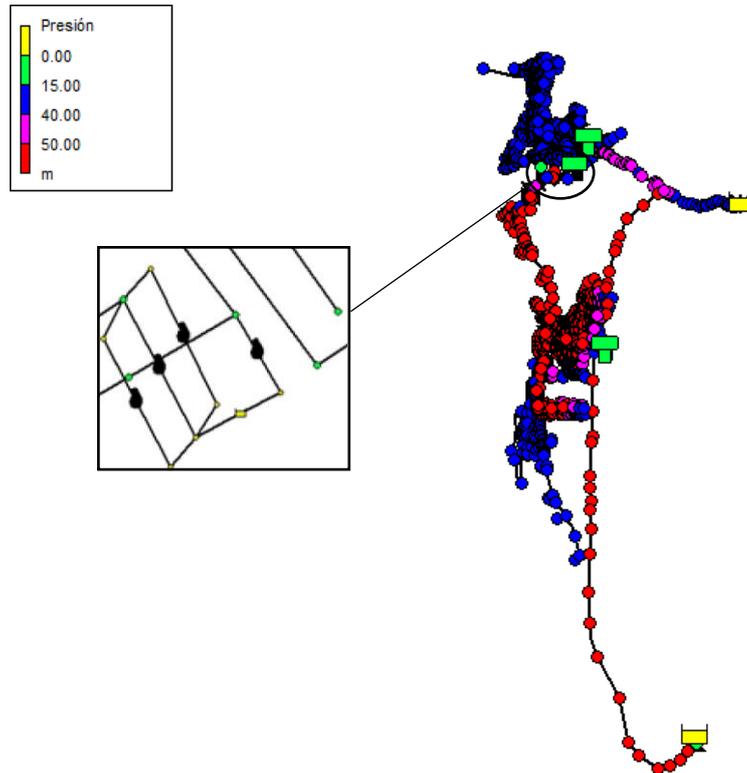
### 5.2.1 Zona Sur II

El primer problema surgido tras eliminar la alimentación de la red a través de Toribio eran las bajas presiones de servicio que se daban en aquellos nudos situados a mayor cota de la zona Sur II (ver Figura 24) como consecuencia de la incapacidad de la segunda bomba de la estación de bombeo de aportar la suficiente altura a tales nudos. Una vez se ha realizado la simulación habiendo sustituido la bomba 2 por tres bombas modelo 80-32H dispuestas en paralelo se comprueba que se solucionan los problemas de presión en la zona Sur II puesto que, en el nudo más desfavorable, el 6104, situado a mayor cota, la presión durante las horas pico alcanza los 26.79 metros, superiores a los 15 metros de presión mínima requerida.

Propiedad	Valor
*ID Conexión	6104
Coordenada-X	985678.35
Coordenada-Y	1725331.81
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	62.9232
Demanda Base	0.371304228
Patrón de Demanda	
Categoría de Demanda	1
Coef. Emisor	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	
Demanda Actual	0.57
Altura Total	89.77
Presión	26.79

*Figura 51. Comprobación de la presión mínima en el nudo 6104 tras las medidas*

Con esta nueva configuración de la estación de bombeo de Gaira quedarían satisfechas las demandas correspondientes a la zona Sur II de la red hidráulica, tal y como se muestra en la siguiente figura, donde se representa el estado de la red a las 7:00 horas tras la implementación de las 3 nuevas bombas. Se puede ver como en todos los nudos de consumo de la red hidráulica la presión de servicio se encuentra por encima del umbral mínimo requerido de 15 metros de columna de agua.



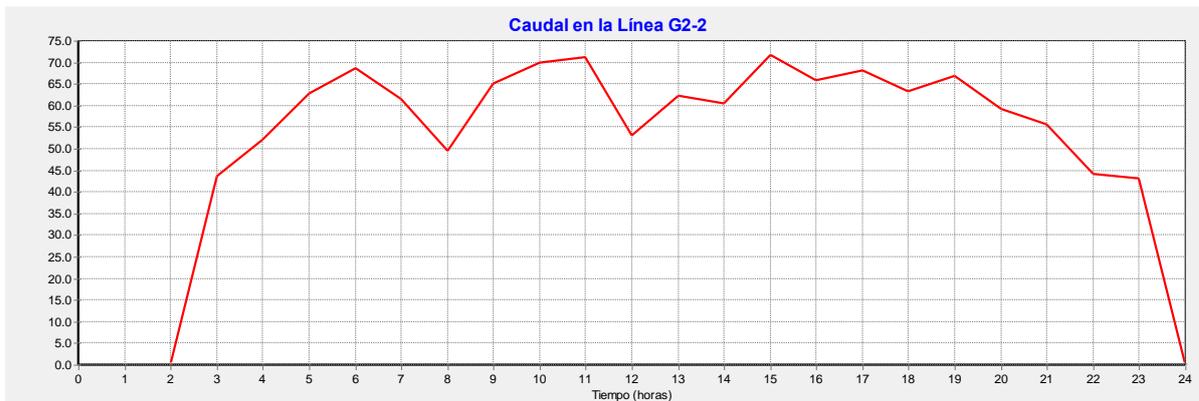
*Figura 52. Estado de la red durante las horas pico tras las mejoras*

Paso siguiente se procede a la comprobación del correcto funcionamiento en Epanet de la regulación implantada en las 3 bombas de la estación de bombeo de Gaira destinadas a alimentar Sur II con el fin de ahorrar costes energéticos.

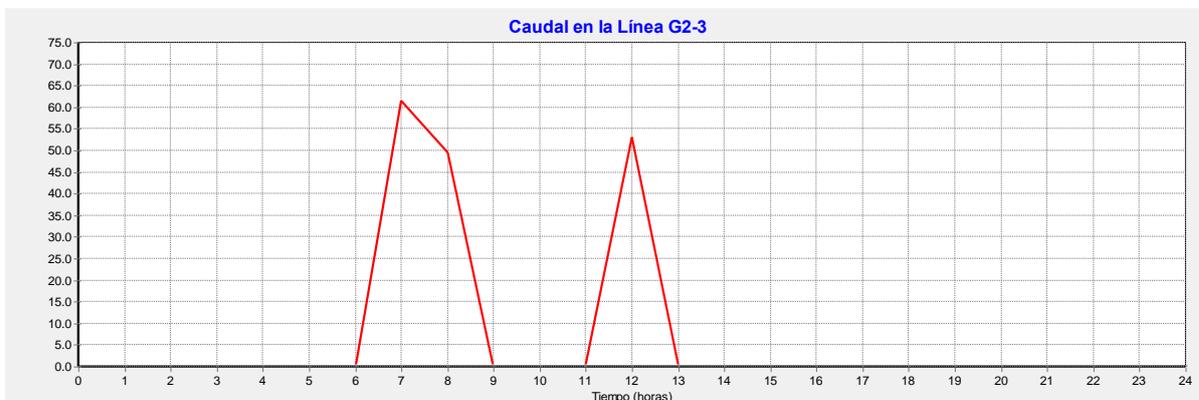
En las siguientes figuras, donde se muestran los intervalos de tiempo en los que cada una de las tres bombas se encuentran funcionando a lo largo del día, se comprueba que la introducción de dicha regulación mediante el uso de la opción ‘controles’ de Epanet ha resultado efectiva. A excepción de las 7:00 y las 12:00 horas, donde son 3 las bombas puestas en marcha, y las 0:00, 1:00 y 2:00 horas en las que solo es necesario el trabajo de una bomba, el resto del tiempo se encuentran en funcionamiento 2 bombas.



*Figura 53. Caudal bombeado por la bomba 1 de Gaira II a lo largo del día*



*Figura 54. Caudal bombeado por la bomba 2 de Gaira II a lo largo del día*



*Figura 55. Caudal bombeado por la bomba 3 de Gaira II a lo largo del día*

Estas serían las comprobaciones correspondientes a Sur II. Ahora toca verificar el funcionamiento apropiado de la zona Sur I tras las propuestas de mejora.

### 5.2.2 Zona Sur I

La deficiencia que surgía en esta zona era debida a que durante ciertas horas del día correspondientes a los momentos de máxima demanda se superaba el límite de extracción de la fuente situada junto a la estación de bombeo de Gaira durante la estación seca (ver Figura 34). Para subsanar este incumplimiento se propusieron tres alternativas:

La primera consistía en parar la bomba 1 durante el intervalo de tiempo correspondiente a los momentos de mayor demanda, entre las 7:00 y las 8:00 horas. Sin embargo, tras implementar la medida en el modelo hidráulico con Epanet, en este escenario las demandas que dejan de ser alimentadas por la bomba 1 pasan a hacerlo a través del tanque 14 por lo que se aumentan los nudos que ha de alimentar dicho depósito manteniéndose el caudal máximo restringido por el límite de extracción que puede aportar. Esto provoca que en algunos de estos consumos de la región Sur I no se consiga alcanzar la presión de servicio mínima necesaria de 15 metros de columna de agua. Dichos consumos se muestran en la siguiente figura.

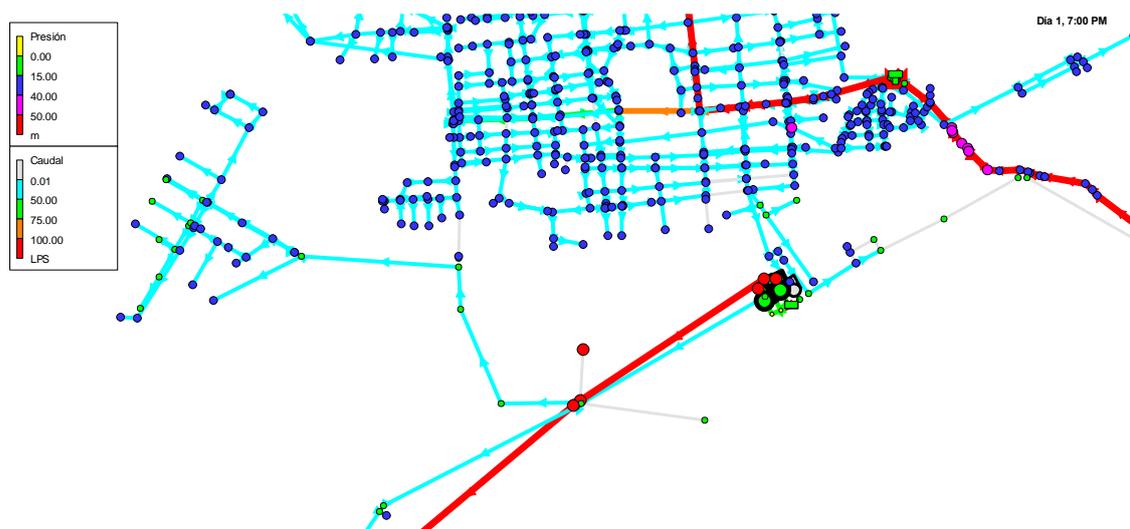


Figura 56. Problemas de presión tras parar bomba 1

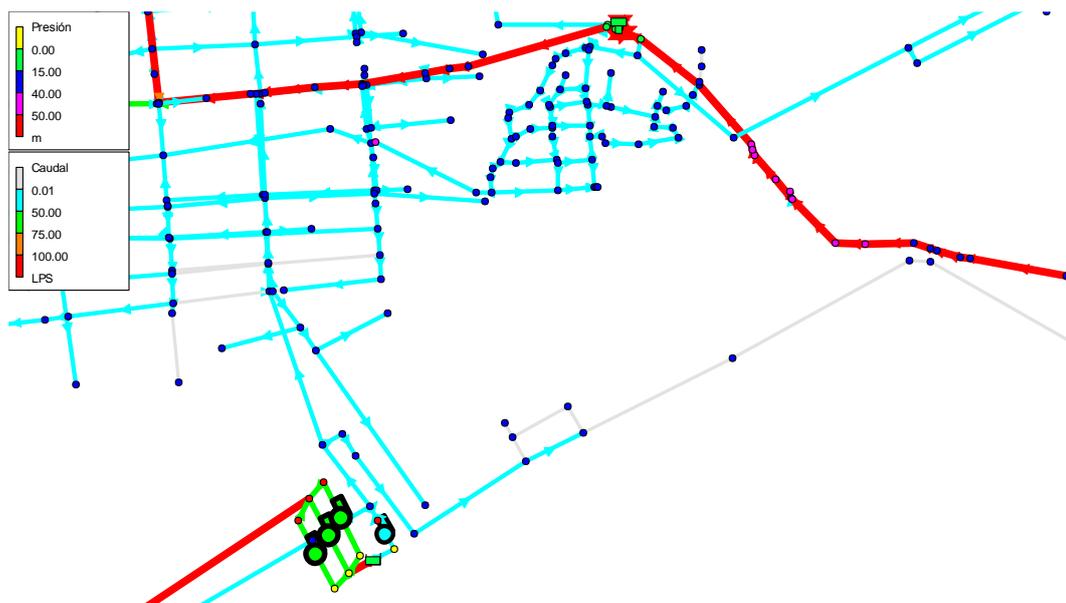
Por lo tanto, hay que buscar una solución intermedia en la que se consiga no exceder los límites de producción de Gaira y además alcanzar la presión mínima requerida en todos los nudos de consumo.

Con la segunda medida se proponía disponer una válvula limitadora de caudal a la salida de la bomba 1. Una vez instalada se comprueba que ahora la estación de bombeo de Gaira no sobrepasa los 206 l/s bombeados en total en ningún momento como se puede comprobar en la siguiente figura donde se muestra el caudal que circula en cada momento del día por las tuberías 13611 y 40536, correspondientes con la tubería de abastecimiento de las 3 bombas destinadas a alimentar Sur II y de la bomba instalada para Sur I respectivamente.



*Figura 57. Comprobación del límite de extracción de Gaira tras implementar la válvula*

Se observa que a las 7:00 horas, correspondiente al momento más crítico, el caudal impulsado por las 3 bombas de Gaira II asciende a los 184.1 l/s mientras que el aportado por la bomba 1 se reduce efectivamente hasta los 21.9 l/s como consecuencia del efecto de la válvula limitadora de caudal. En total, a las 7:00 horas se extraen de la fuente de Gaira 206 l/s, justo el límite de extracción dicha estación de bombeo. Además, no se dan problemas de presión en ninguno de los nudos durante el período crítico tras esta actuación.



*Figura 58. Presiones en la zona Sur I tras la introducción de la válvula*

La tercera y última acción llevada a cabo consistía en el uso de un variador de velocidad para disminuir la velocidad de giro del motor que alimenta a la bomba actual dispuesta para Sur I hasta un 80% de su velocidad nominal durante las horas pico. De este modo se reduce el caudal que ésta ha de impulsar para alimentar las demandas de Sur I y se incrementan, por tanto, los nudos abastecidos mediante el tanque 14. Para testar su efectividad de nuevo se genera mediante Epanet un gráfico en el que se representa el caudal extraído de la estación de bombeo a través las tuberías 13611 y 40536 tras la introducción de las restricciones equivalentes a la instalación del variador.



*Figura 59. Comprobación del límite de extracción de Gaira tras implementar el variador*

Se puede observar como el caudal impulsado por la bomba 1 a las 7:00 horas se reduce hasta los 17.74 l/s, que sumados a los 184.1 l/s de las tres bombas dispuestas en Gaira II suman un total de 201.84 l/s, no excediéndose así los 206 l/s de capacidad máxima de Gaira y respetando la restricción de 15 metros de presión de servicio mínima en todos los consumos durante los momentos de mayor demanda, tal y como se puede observar en la siguiente figura.



*Figura 60. Presiones en la zona Sur I tras la introducción del variador*

Teniendo en cuenta por tanto que, de las 3 medidas propuestas para Sur I, sólo dos de ellas, las correspondientes a la instalación del variador de velocidad y la válvula limitadora de caudal, son viables, a continuación, se ha de valorar cuál de las dos sería la más adecuada para llevar a cabo en la práctica.

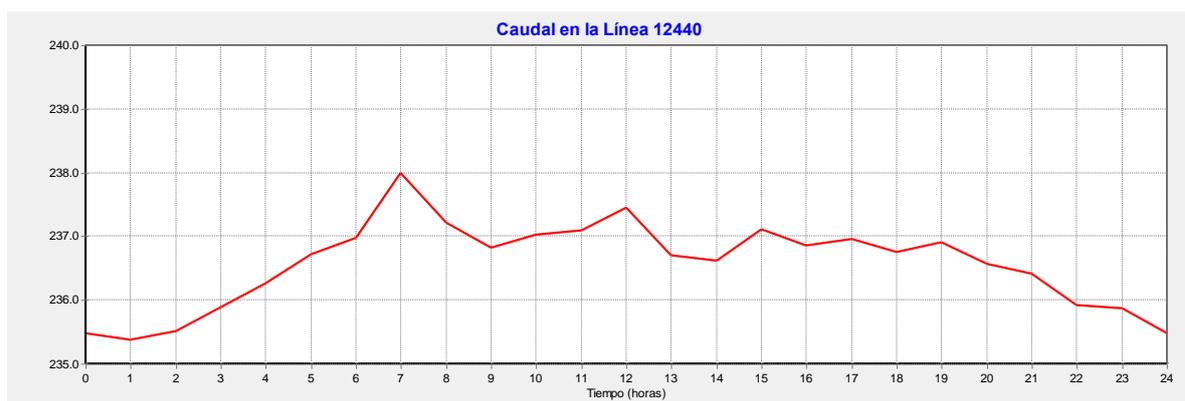
Desde un punto de vista económico, la adquisición de la válvula supondría un desembolso de 9448.79 €, mientras que en el caso del variador el precio de compra es inferior y ascendería a los 3894 €.

Además, desde el punto de vista energético y tal y como se ha comentado anteriormente, la instalación de un variador de velocidad para la bomba disminuye la potencia requerida por la misma. Esto supone un ahorro energético y por tanto también económico. Tras la implementación de la válvula limitadora de caudal la potencia consumida por la bomba 1 ascendía a los 1012 KW diarios. En el caso del variador, dicha potencia disminuía hasta los 997.02 KW al día. Considerando como precio medio de referencia de la electricidad en Colombia 0.148 €/KWh para todas las horas el ahorro económico que se da si se opta por la instalación del variador es de 66.52 € al mes.

Se concluye por tanto que de las dos opciones válidas para garantizar el cumplimiento del límite de extracción de Gaira, la adquisición del variador de velocidad de la marca Power Electronic es la opción más recomendable.

Para terminar de comprobar el correcto funcionamiento de la región Sur I tras las mejoras, solo quedaría verificar que efectivamente se cumple la recursividad del tanque 14 y que no se sobrepasa el límite de extracción de El Roble durante ningún momento del día tras implementar cualquiera de las dos medidas enunciadas para la bomba 1. Dichas medidas constituyen propuestas de solución equivalentes y por tanto en ambas el funcionamiento del embalse de El Roble y el depósito de regulación número 14 permanecerá prácticamente invariable.

En la siguiente figura extraída del archivo en el que ya se han implementado las modificaciones correspondientes a cualquiera de las dos propuestas anteriormente desarrolladas se muestra el caudal que circula por la tubería número 12440, correspondiente con la salida del embalse de El Roble y se comprueba que efectivamente en ningún momento se sobrepasan los 240 l/s que posee de límite de extracción.



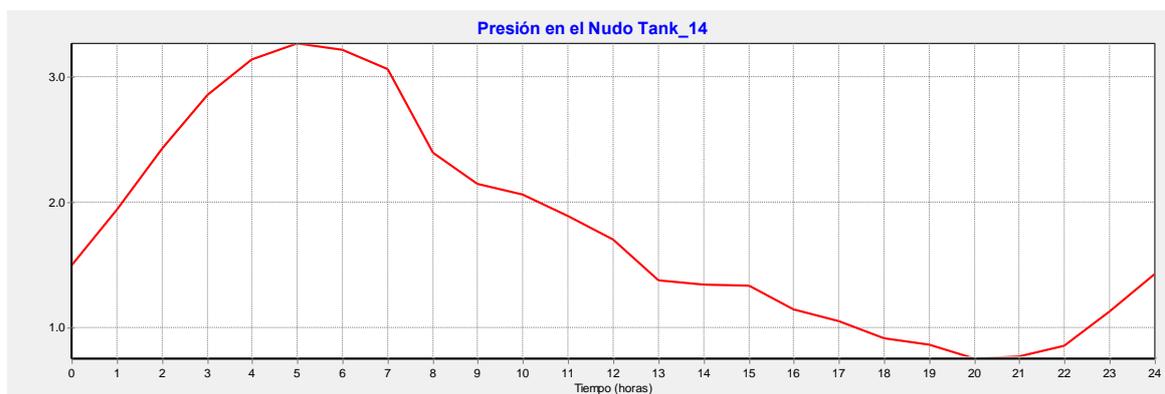
*Figura 61. Caudal aportado por El Roble a lo largo del día*

Del mismo modo, también se comprueba que en el modelo de Epanet nunca se superen los 240 l/s de media a extraer del tanque 14. Efectivamente, dicha restricción se cumple tal y como se puede observar en la siguiente figura obtenida tras aplicar el patrón correspondiente a caudales medios, y donde se muestra la información relativa a la tubería de salida del mismo, la número 13692.

Propiedad	Valor
*ID Tubería	13692
*Nudo Inicial	Tank_14
*Nudo Final	11183
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	2.95
*Diámetro	500
*Rugosidad	0.03
Coef. de Pérdidas	0.059
Estado Inicial	Abierto
Coef. Flujo	
Coef. Pared	
Caudal	236.57
Velocidad	1.20
Pérd. Unit.	3.50
Factor fricción	0.024
Velo. de Reacción	0.00
Calidad	0.00

*Figura 62. Comprobación del caudal medio extraído del tanque 14*

Con respecto a la recursividad, el caudal constante impuesto por el valor de consigna de la válvula limitadora de caudal situada a la entrada del depósito se fijó finalmente en 236 l/s. Puesto que después de diversas actuaciones sobre el tanque 14 y los elementos de su alrededor, anteriormente mencionadas, se logra extraer de él una media de 236.45 l/s, se consigue que el depósito se vacíe al mismo ritmo que consigue llenarse. En la siguiente figura se muestra cómo efectivamente el nivel de presión existente en el interior del depósito es el mismo a primera y última hora del día, verificándose así la recursividad del mismo.



*Figura 63. Comprobación de la recursividad del tanque 14*





## 6. PLANIFICACIÓN TEMPORAL

Este último capítulo de desarrollo tiene por objetivo explicar cuál ha sido la planificación temporal llevada a cabo a lo largo de todo el estudio realizado. La planificación de un proyecto sirve para clarificar el orden de las tareas y estimar la cantidad de tiempo de la que se dispone para dedicarle a cada una de ellas. Se ha hecho uso de un paquete de software bastante conocido llamado ‘Microsoft Project’ para llevar a cabo la planificación mediante la elaboración de un sencillo diagrama de Gantt.

El primer paso consiste en la descomposición del proyecto en las tareas que lo componen. En este caso dichas tareas son:

*Tarea 1*-Primera toma de contacto con el proyecto y recopilación de datos acerca del distrito de Santa Marta. En esta primera fase se tuvo una primera reunión con el tutor encargado de dirigir el proyecto y se comenzó a hacer una búsqueda inicial de información acerca de la ciudad de Santa Marta.

*Tarea 2*- Análisis de la red actual, diagnóstico de su funcionamiento, identificación de los problemas presentes en ella y propuesta de mejora. Aquí el tutor proporcionó el archivo de Epanet que incluía la solución propuesta por el equipo de la universidad para la red hidráulica de Santa Marta y a partir de ahí se procedió a localizar sus deficiencias y a plantear soluciones a ellas.

*Tarea 3*- Descomposición de la sectorización realizada por el equipo de la universidad y propuesta de reordenación de los distritos de consumo de la urbanización de Gaira. Durante esta etapa se procedió a abrir todas las tuberías que habían sido cerradas con la anterior solución y a plantear una nueva sectorización encaminada a maximizar la producción de El Roble y de Gaira y eliminar la alimentación de la zona Sur por parte del embalse de Toribio durante la estación seca.

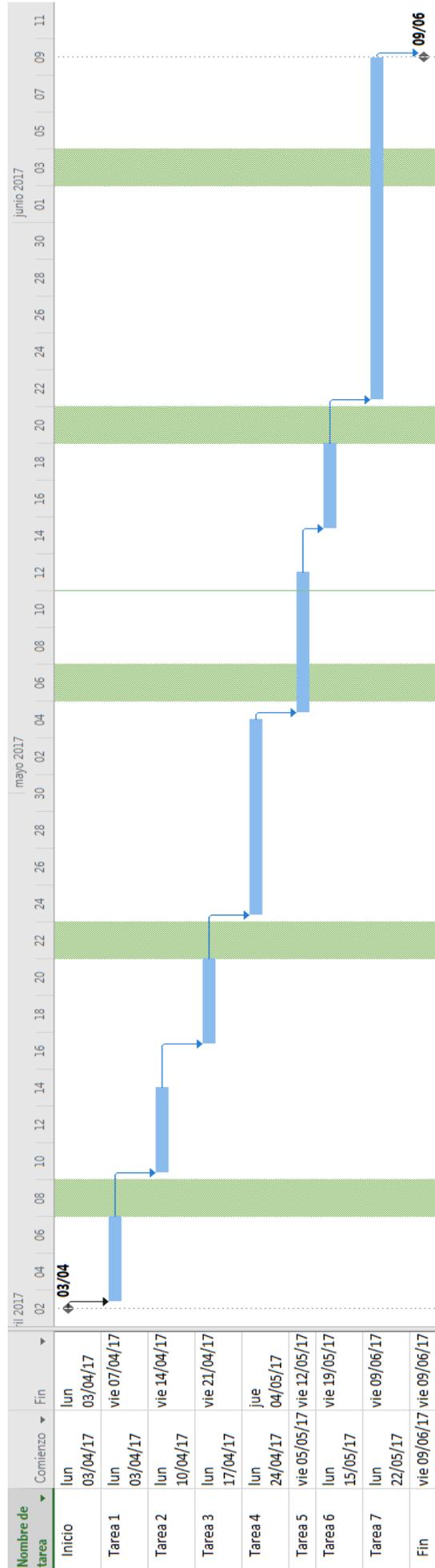
*Tareas 4 y 5*- Modificación de la estación de bombeo presente en Gaira. Esta tarea podría dividirse en dos subtareas correspondientes a las acciones tomadas tanto para la parte de la estación de bombeo destinada a alimentar la zona Sur I como para la parte de la zona Sur II de la red. A lo largo de esta etapa se proponen diferentes medidas a implementar tanto para las bombas de Sur II como para la de Sur I y se comprueba su efectividad.

*Tarea 6* - Introducción de las acciones encaminadas a garantizar la recursividad del tanque 14 así como el cumplimiento del límite de extracción de El Roble. En esta última fase de trabajo propiamente dicho se procedió a analizar los últimos problemas surgidos en el modelo hidráulico de Epanet relativos a la zona Sur I tras la modificación de la bomba 1 y a proponer medidas que los corrigiesen.



*Tarea 7* - Redacción del documento memoria del trabajo. Una vez solucionada la red hidráulica de Santa Marta e implantadas las medidas en el modelo hidráulico de Epanet se procede a redactar el documento que recoge todo el trabajo desarrollado durante las anteriores etapas.

Según lo establecido por la Universitat Politècnica de València el tiempo a dedicar a la realización de un trabajo final de grado es de 300 horas, lo que considerando jornadas de trabajo de 30 horas semanales hacen un total de 10 semanas destinadas a la realización del proyecto. Una vez establecidas las tareas a realizar y teniendo en cuenta el tiempo disponible para ello, mediante el uso del software 'Microsoft Project' se realiza la planificación temporal del proyecto, teniendo como fecha de comienzo del proyecto el día 3 de abril de 2017.







## 7. RESUMEN DEL PRESUPUESTO

CAPÍTULO 1: VALVULERÍA	Importe: 28023.49 €
CAPÍTULO 2: CONDUCCIONES	Importe: 2032.68 €
CAPÍTULO 3: BOMBAS	Importe: 52212.24 €
CAPÍTULO 4: VARIADOR	Importe: 4044.27 €

**TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL**..... 86312.68 €

13% Gastos Generales..... 11220.65 €

6% Beneficio Industrial..... 5178.76 €

**TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA**..... 102712.09 €

4% Baja de Adjudicación..... - 4108.48 €

**TOTAL ADJUDICACIÓN**..... 98603.61 €

21% I.V.A..... 20706.76 €

**TOTAL PRESUPUESTO CON IVA**..... 119310.37 €

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:

CIENTO DIECINUEVE MIL TRESCIENTOS DIEZ EUROS CON TREINTA Y SIETE  
CÉNTIMOS





## 8. CONCLUSIONES

Con el presente Trabajo Final de Grado se han conseguido solucionar los problemas por falta de agua durante la estación seca de Santa Marta, en Colombia. Se ha logrado satisfacer la demanda hidráulica de la ciudad con los niveles mínimos requeridos de presión de servicio, pero sin exceder los límites de producción de las diferentes fuentes de suministro. Tal objetivo se ha alcanzado mediante la remodelación de las instalaciones de producción de agua potable situadas en la zona Sur de la ciudad, correspondiente a la urbanización de Gaira.

Para ello se ha partido de una solución de funcionamiento previa aportada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València en la que se dividía la red hidráulica de la ciudad en diferentes sectores de consumo. Dicha solución resultó no ser viable debido a que se producía una cierta sobreexplotación de la fuente situada en el embalse de Toribio.

A partir de dicha solución, primero se ha llevado a cabo una reorganización de sectores con el fin principal de eliminar la alimentación de la zona Sur de la red de Gaira por parte de la fuente de suministro de Toribio. Esta parte de la red ha quedado dividida en dos nuevas zonas: Sur I y Sur II y sobre ellas se han marcado distintos objetivos específicos con los que se pretende cubrir las demandas de la zona Sur II exclusivamente gracias al caudal aportado por la estación de bombeo de Gaira y las demandas de la zona Sur I a través del embalse de El Roble y la estación de bombeo de Gaira.

Aquellos nudos que cubrían sus demandas gracias al embalse de Toribio han pasado ahora a hacerlo gracias a la estación de bombeo de Gaira. Por ello a continuación, se ha procedido a sustituir la bomba original existente en la estación de bombeo para abastecer a la zona Sur II por tres nuevas bombas de mayor potencia dispuestas en paralelo. Esta nueva configuración ha permitido hacer un uso regulado de las 3 bombas aplicando a la red el concepto de curva de consigna, con el consiguiente ahorro energético y económico que ello conlleva.

Una vez resueltos los problemas de desabastecimiento de agua y falta de presión en la región Sur II el estudio se ha centrado en solucionar las deficiencias de la nueva zona Sur I. En primer lugar, mediante el cierre de una serie de tuberías se ha conseguido maximizar el caudal a extraer del embalse de El Roble para alimentar a esta zona. Tras ello, se ha producido una nueva sobreexplotación esta vez de la estación de bombeo de Gaira, la cual excedía su límite de extracción para conseguir cubrir todas las demandas de la nueva zona Sur I durante las horas de mayor consumo. Para solucionarlo se han enunciado tres propuestas de mejora. La primera consiste en detener el funcionamiento de la bomba 1 durante las horas de pico. La segunda se basa en la implementación de una válvula limitadora de caudal a la salida de la bomba 1. Tras estudiar los requerimientos que habría de cumplir



tal válvula se escogió el modelo 700 EN-SERIES del fabricante Bermad. La última medida propuesta consiste en la implementación de un variador de velocidad en la bomba 1 para reducir su velocidad de giro y en consecuencia el caudal bombeado. En este caso el variador elegido es el Serie SD500 de 75 KW.

Al comprobar el funcionamiento de la red tras la introducción de estas propuestas se ha extraído que sólo dos de ellas, las correspondientes al variador de velocidad y a la válvula limitadora de caudal, han logrado los objetivos propuestos al inicio del proyecto. Tras realizar un estudio energético y económico de estas dos alternativas se ha concluido que la adquisición del variador es la opción más recomendable.

El último paso a dar para solucionar por completo la nueva zona Sur I ha consistido en verificar la recursividad del depósito de regulación número 14 que alimenta a parte de los consumos de esta zona. La recursividad se ha de cumplir garantizando a la vez que no se sobrepasa el límite de extracción del embalse de El Roble del cual se alimenta el depósito 14. El objetivo se ha conseguido con la modificación del valor de consigna de la válvula limitadora de caudal situada a la entrada del tanque y la realización de una pequeña sectorización de la red.

Finalmente se ha procedido a comprobar que las medidas tomadas en la zona Sur garantizan el correcto funcionamiento de toda la red hidráulica de Santa Marta en su conjunto. Efectivamente, todas las demandas han quedado satisfechas con los niveles mínimos de presión requeridos y para ello no se han excedido los límites de producción de ninguna de las fuentes de suministro presentes en la red.



## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ❖ Bermad (2017). Consultado en <<http://www.bermad.com/>>
- ❖ IDEAL (2017). Consultado en <<http://www.bombasideal.com/>>
- ❖ Martínez-Solano, F. J.; Iglesias-Rey, P. L.; Mora-Melia, D. & Ribelles-Aquilar, J. V. (2016). “Combining Skeletonization, Setpoint Curves and Heuristic Algorithms to Define DMAs in the BWNDMA”. 18th Conference on Water Distribution System Analysis, WDSA 2016. Cartagena de Indias, Colombia
- ❖ Power Electronics (2017). Consultado en <<http://power-electronics.com/es/>>
- ❖ Rossman, L. A. (2000). EPANET 2: users manual.
- ❖ Saldarriaga, J (2015). “SOS: Agua para Santa Marta”. Contacto, v10. Bogotá (Colombia).





**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de  
agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)

# PRESUPUESTO



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



## ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	1
2. MEDICIONES.....	4
3. RESUMEN DEL PRESUPUESTO.....	8



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



Menfis 8.1.12 - Versión evaluación

Proyecto		Pág.: 1
CUADRO DE PRECIOS Nº 2		Ref.: procdp2a
		Fec.:

Nº Orden	Nº Actividad	Código	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
1		EIFN.5dca	Tb PE100 D110mm 16 atm			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	0,233	16,58	3,86
		MOOA.8a	Oficial 1ª construcción	0,233	17,74	4,13
		MOOA12a	Peón ordinario construcción	0,233	14,82	3,45
		PUAC.8dca	Tb PE100 D110mm 16atm	1,050	5,52	5,80
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	17,24	0,34
			Clase: Mano de Obra			11,44
			Clase: Material			5,80
			Clase: Medio auxiliar			0,34
			Costes directos			17,58
			Costes indirectos			0,18
	Coste Total			17,76		
2		EIFN.5OCA	Tb PE100 D400mm 16 atm			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	1,195	16,58	19,81
		MOOA.8a	Oficial 1ª construcción	1,195	17,74	21,20
		MOOA12a	Peón ordinario construcción	1,195	14,82	17,71
		PUAC.8occa	Tb PE100 D400mm 16atm	1,050	71,58	75,16
		MMMT.9a	Comn grúa p/descarga tb H	0,030	56,02	1,68
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	135,56	2,71
			Clase: Mano de Obra			58,72
			Clase: Maquinaria			1,68
			Clase: Material			75,16
			Clase: Medio auxiliar			2,71
	Costes directos			138,27		
	Costes indirectos			1,38		
	Coste Total			139,65		
3		EIFR.7ib	Válvula automática BERMAD 700 EN-SERIES			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería		16,58	
		PIFR.7ib	Válvula automática	1,000	9.448,79	9.448,79
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	9.448,79	188,98
			Clase: Material			9.448,79
			Clase: Medio auxiliar			188,98
	Costes directos			9.637,77		
	Costes indirectos			96,38		
	Coste Total			9.734,15		
4		EIFV.1ada	Valv fund elas brd D80 PN10/16			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	0,500	16,58	8,29
		MOOF11a	Especialista fontanería	0,500	14,10	7,05
		PUAV.1ada	Va compt brd hus D80 10/16atm	1,000	131,31	131,31
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	146,65	2,93
			Clase: Mano de Obra			15,34
			Clase: Material			131,31
			Clase: Medio auxiliar			2,93
	Costes directos			149,58		
	Costes indirectos			1,50		
	Coste Total			151,08		
5		EIFV.1aea	Valv fund elas brd D100 PN10/16			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	0,600	16,58	9,95
		MOOF11a	Especialista fontanería	0,600	14,10	8,46
		PUAV.1aea	Va compt brd hus D100 10/16atm	1,000	156,80	156,80
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	175,21	3,50
			Clase: Mano de Obra			18,41
			Clase: Material			156,80
			Clase: Medio auxiliar			3,50
	Costes directos			178,71		
	Costes indirectos			1,79		
	Coste Total			180,50		

Menfis 8.1.12 - Versión evaluación



	Proyecto	Pág.: 2
	CUADRO DE PRECIOS Nº 2	Ref.: procdp2a
		Fec.:

Nº Orden	Nº Actividad	Código	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
6		EIFV.1aha	Valv fund elas brd D200 PN10/16			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	1,300	16,58	21,55
		MOOF11a	Especialista fontanería	1,300	14,10	18,33
		PUAV.1aha	Va compt brd hus D200 10/16atm	1,000	468,08	468,08
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	507,96	10,16
			Clase: Mano de Obra			39,88
			Clase: Material			468,08
			Clase: Medio auxiliar			10,16
			Costes directos			518,12
			Costes indirectos			5,18
			Coste Total			523,30
7		EIFV.1aia	Valv fund elas brd D250 PN10/16			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	1,600	16,58	26,53
		MOOF11a	Especialista fontanería	1,600	14,10	22,56
		PUAV.1aia	Va compt brd hus D250 10/16atm	1,000	797,13	797,13
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	846,22	16,92
			Clase: Mano de Obra			49,09
			Clase: Material			797,13
			Clase: Medio auxiliar			16,92
			Costes directos			863,14
			Costes indirectos			8,63
			Coste Total			871,77
8		EIFV.1aja	Valv fund elas brd D300 PN10/16			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	1,900	16,58	31,50
		MOOF11a	Especialista fontanería	1,900	14,10	26,79
		PUAV.1aja	Va compt brd hus D300 10/16atm	1,000	1.037,36	1.037,36
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	1.095,65	21,91
			Clase: Mano de Obra			58,29
			Clase: Material			1.037,36
			Clase: Medio auxiliar			21,91
			Costes directos			1.117,56
			Costes indirectos			11,18
			Coste Total			1.128,74
9		EIFV.1ala	Valv fund elas brd D400 PN10/16			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	2,900	16,58	48,08
		MOOF11a	Especialista fontanería	2,900	14,10	40,89
		PUAV.1ala	Va compt brd hus D400 10/16atm	1,000	2.930,32	2.930,32
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	3.019,29	60,39
			Clase: Mano de Obra			88,97
			Clase: Material			2.930,32
			Clase: Medio auxiliar			60,39
			Costes directos			3.079,68
			Costes indirectos			30,80
			Coste Total			3.110,48
10		EIFV.1ana	Valv fund elas brd D500 PN 10/16			
		MOOF.8a	Oficial 1ª fontanería	3,900	16,58	64,66
		MOOF11a	Especialista fontanería	3,900	14,10	54,99
		PUAV.1ana	Va compt brd hus D500 10/16atm	1,000	4.905,65	4.905,65
		%	Costes Directos Complementarios	0,020	5.025,30	100,51
			Clase: Mano de Obra			119,65
			Clase: Material			4.905,65
			Clase: Medio auxiliar			100,51
			Costes directos			5.125,81
			Costes indirectos			51,26
			Coste Total			5.177,07



Menfis 8.1.12 - Versión evaluación

	Proyecto	Pág.: 3
	CUADRO DE PRECIOS Nº 2	Ref.: procdp2a
		Fec.:

Nº Orden	Nº Actividad	Código	Descripción de las unidades de obra	Rendimiento	Precio	Importe
11		IDEAL MOOF.8a MOOF11a PIFA5jc %	Bomba modelo 80-32H 128CV			
			Oficial 1ª fontanería	16,000	16,58	265,28
			Especialista fontanería	16,000	14,10	225,60
			Grupo bombeo	1,000	16.403,00	16.403,00
			Costes Directos Complementarios	0,020	16.893,88	337,88
			Clase: Mano de Obra			490,88
			Clase: Material			16.403,00
			Clase: Medio auxiliar			337,88
			Costes directos			17.231,76
			Costes indirectos			172,32
			Coste Total			17.404,08
12		PE MOOE.8a MOOA.9a PIEA.5ada %	Variador de frecuencia 75 KW			
			Oficial 1ª electricidad	1,000	16,58	16,58
			Oficial 2ª construcción	1,000	15,14	15,14
			Variador de frecuencia Serie SD 500	1,000	3.894,00	3.894,00
			Costes Directos Complementarios	0,020	3.925,72	78,51
			Clase: Mano de Obra			31,72
			Clase: Material			3.894,00
			Clase: Medio auxiliar			78,51
			Costes directos			4.004,23
			Costes indirectos			40,04
			Coste Total			4.044,27

Menfis 8.1.12 - Versión evaluación



Menfis 8.1.12 - Versión evaluación

	Proyecto	Pág.: 1
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp1
	VALVULERÍA	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Subtotal	Medición	Precio	Importe
<b>Proyecto</b>									
<b>01 VALVULERÍA</b>									
01.01 EIFV.1ala	Valv fund elas brd D400 PN10/16								
	Total partida 01.01						2,00	3.110,48	6.220,96
01.02 EIFV.1ana	Valv fund elas brd D500 PN 10/16								
	Total partida 01.02						1,00	5.177,07	5.177,07
01.03 EIFV.1aia	Valv fund elas brd D250 PN10/16								
	Total partida 01.03						1,00	871,77	871,77
01.04 EIFV.1ada	Valv fund elas brd D80 PN10/16								
	Total partida 01.04						12,00	151,08	1.812,96
01.05 EIFV.1aea	Valv fund elas brd D100 PN10/16								
	Total partida 01.05						5,00	180,50	902,50
01.06 EIFV.1aja	Valv fund elas brd D300 PN10/16								
	Total partida 01.06						2,00	1.128,74	2.257,48
01.07 EIFV.1aha	Valv fund elas brd D200 PN10/16								
	Total partida 01.07						2,00	523,30	1.046,60
01.08 EIFR.7ib	Válvula automática BERMAD 700 EN-SERIES								
	Total partida 01.08						1,00	9.734,15	9.734,15
	<b>Total capítulo 01</b>								<b>28.023,49</b>

Menfis 8.1.12 - Versión evaluación



Mentis 8.1.12 - Versión evaluación

Proyecto		Pág.: 2
MEDICIONES Y PRESUPUESTO		Ref.: promyp1
CONDUCCIONES		Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Subtotal	Medición	Precio	Importe
<b>02</b>	<b>CONDUCCIONES</b>								
02.01 EIFN.50CA	Tb PE100 D400mm 16 atm								
	Total partida 02.01						4,00	139,65	558,60
02.02 EIFN.5dca	Tb PE100 D110mm 16 atm								
	Total partida 02.02						83,00	17,76	1.474,08
	<b>Total capítulo 02</b>								<b>2.032,68</b>

Mentis 8.1.12 - Versión evaluación



Memfis 8.1.12 - Versión evaluación

	Proyecto	Pág.: 3
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp1
	BOMBAS	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Subtotal	Medición	Precio	Importe
<b>03</b>	<b>BOMBAS</b>								
03.01 IDEAL	Bomba modelo 80-32H 128CV								
	Total partida 03.01						3,00	17.404,08	52.212,24
	<b>Total capítulo 03</b>								<b>52.212,24</b>

Memfis 8.1.12 - Versión evaluación



Menfis 8.1.12 - Versión evaluación

	Proyecto	Pág.: 4
	MEDICIONES Y PRESUPUESTO	Ref.: promyp1
	VARIADOR	Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Subtotal	Medición	Precio	Importe
<b>04</b>	<b>VARIADOR</b>								
04.01 PE	Variador de frecuencia 75 KW								
	Total partida 04.01						1,00	4.044,27	4.044,27
	<b>Total capítulo 04</b>								<b>4.044,27</b>
	<b>Total presupuesto</b>								<b>86.312,68</b>

Menfis 8.1.12 - Versión evaluación



Menfis 8.1.12 - Versión evaluación

	Proyecto	Pág.: 1
	RESUMEN DE CAPÍTULOS	Ref.: prores1
		Fec.:

Nº Orden	Descripción de los capítulos	Importe	%
01	VALVULERÍA	28.023,49	32,47 %
02	CONDUCCIONES	2.032,68	2,36 %
03	BOMBAS	52.212,24	60,49 %
04	VARIADOR	4.044,27	4,69 %

<b>TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL .....</b>	<b>86.312,68 €</b>
13 % Gastos Generales .....	11.220,65 €
6 % Beneficio Industrial .....	5.178,76 €
<b>TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA .....</b>	<b>102.712,09 €</b>
4 % Baja de Adjudicación .....	-4.108,48 €
<b>TOTAL ADJUDICACIÓN .....</b>	<b>98.603,61 €</b>
21 % I.V.A. ....	20.706,76 €
<b>TOTAL PRESUPUESTO C/IVA .....</b>	<b>119.310,37 €</b>

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:  
CIENTO DIECINUEVE MIL TRESCIENTOS DIEZ EUROS CON TREINTA Y SIETE CÉNTIMOS

20 de Mayo de 2017

LA PROPIEDAD

LA DIRECCIÓN TÉCNICA

LA CONSTRUCTORA

Fdo.: .....

Fdo.: .....

Fdo.: .....



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)

# PLANOS



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



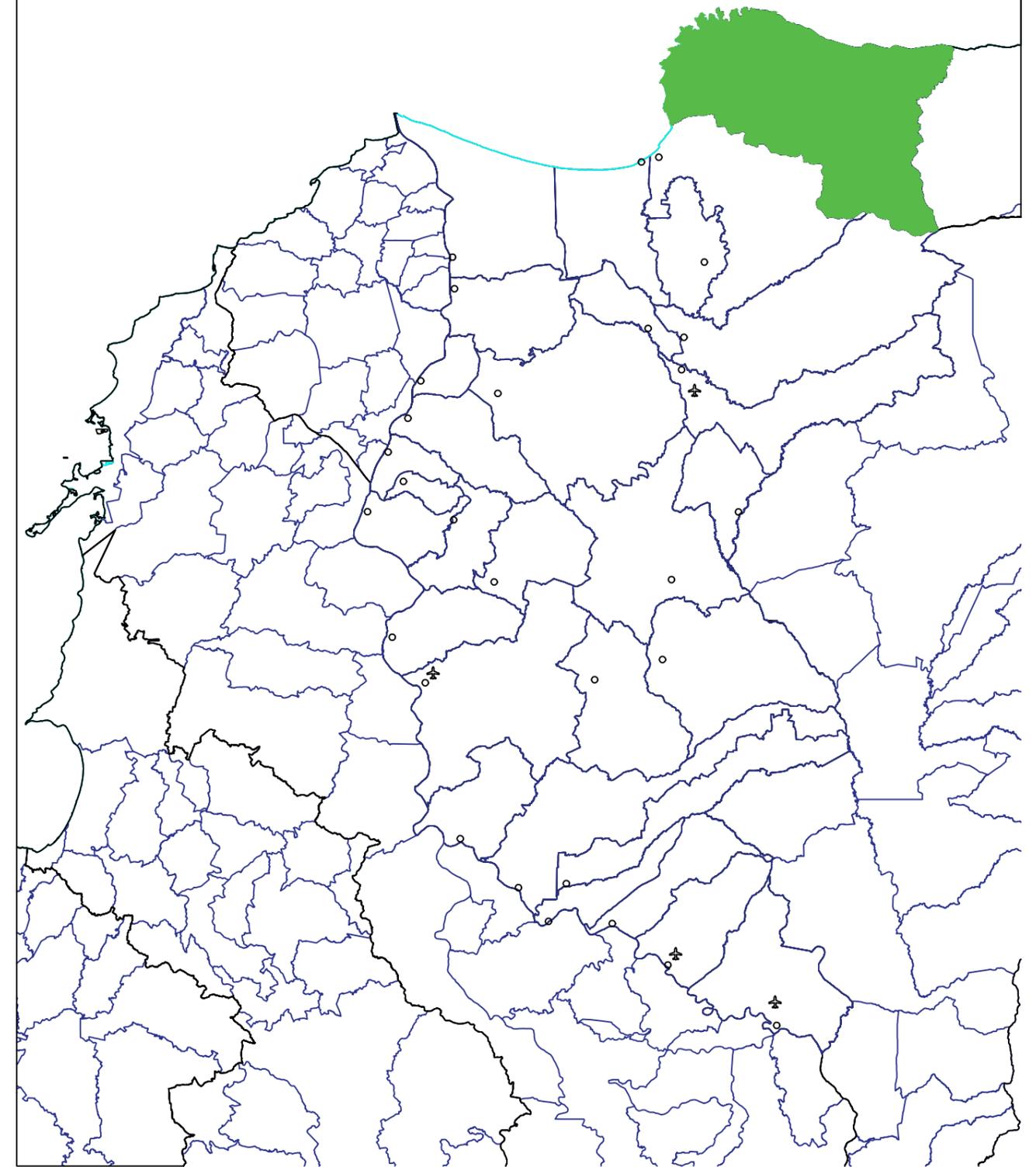
## **ÍNDICE DE LOS PLANOS:**

1. Localización de Magdalena en Colombia y localización de Santa Marta en Magdalena
2. División de la red hidráulica en función de la procedencia de caudal con la solución propuesta por el equipo de la universidad
3. División de la red hidráulica en función de la procedencia de caudal con la solución propuesta con este trabajo
4. Localización de la zona Sur de la red hidráulica correspondiente con la urbanización de Gaira
5. Localización de las tuberías que son abiertas para deshacer la sectorización realizada por el equipo de la universidad
6. Localización de las tuberías que son cerradas para realizar una nueva sectorización de la red hidráulica
7. Localización de las tuberías que son cerradas para maximizar el caudal aportado por el depósito de regulación número 14
8. Localización de las tuberías que son abiertas y cerradas con el fin de disminuir el caudal aportado por el depósito 14 y garantizar así la recursividad del mismo



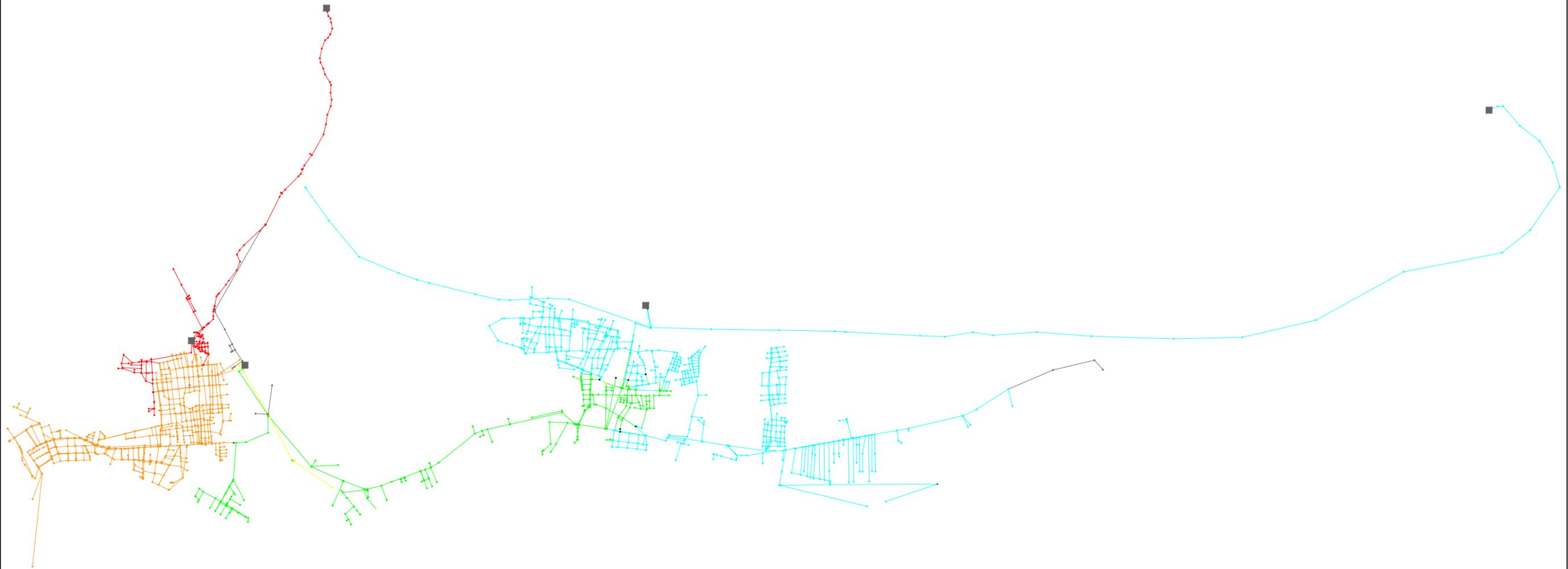
**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA**

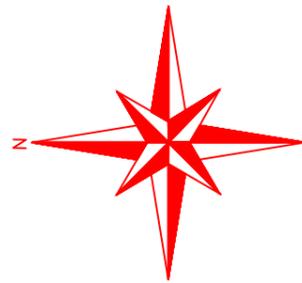
Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)



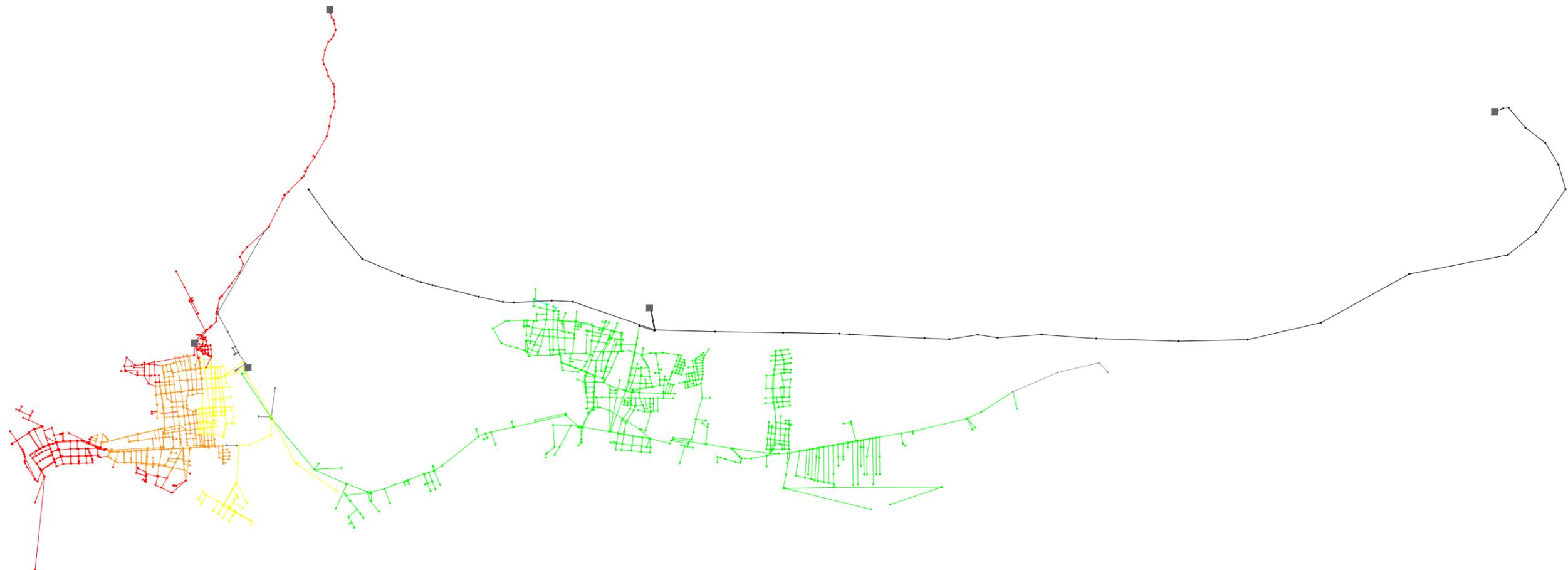


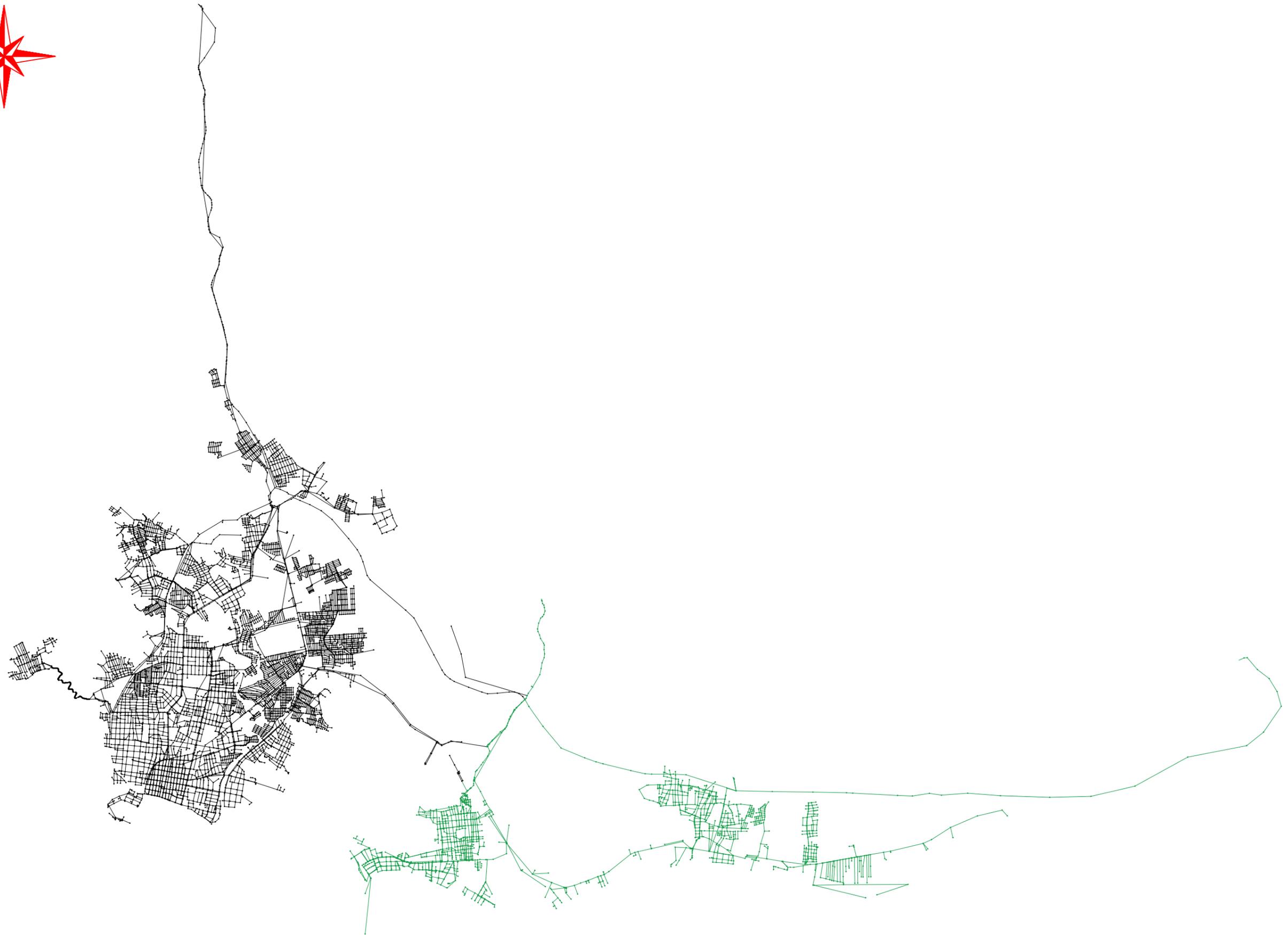
- El Roble
- Gaira I
- Gaira II
- Toribio
- El Roble & Gaira I



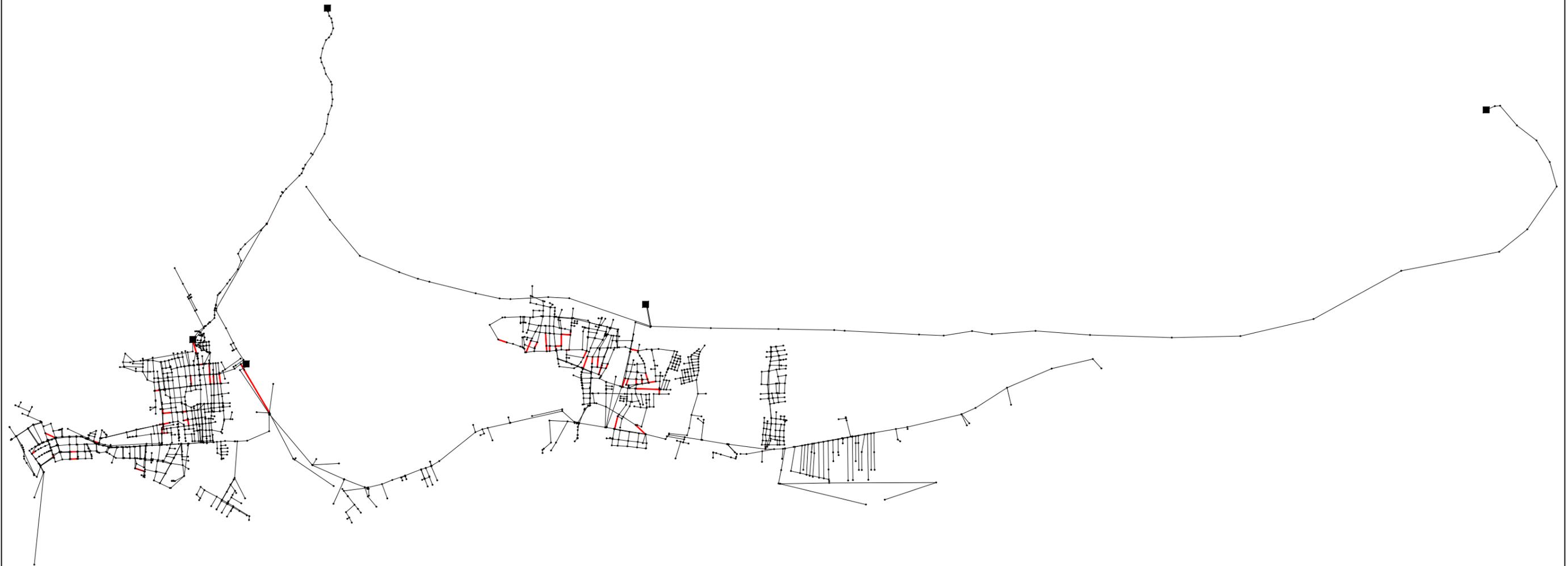
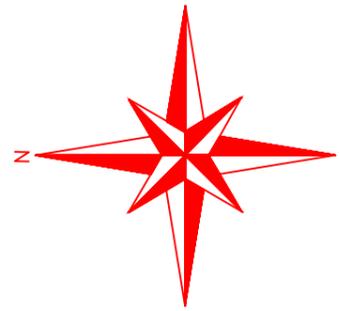


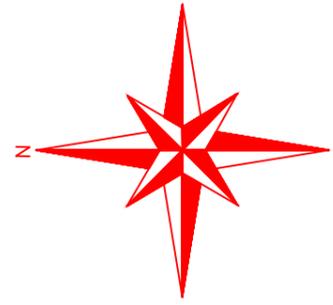
- El Roble
- Gaira I
- Gaira II
- El Roble & Gaira I





● Tubería Cerrada

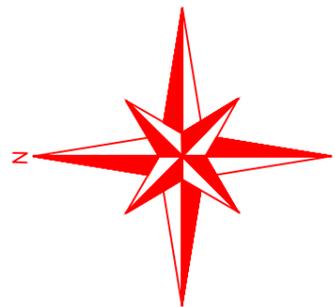




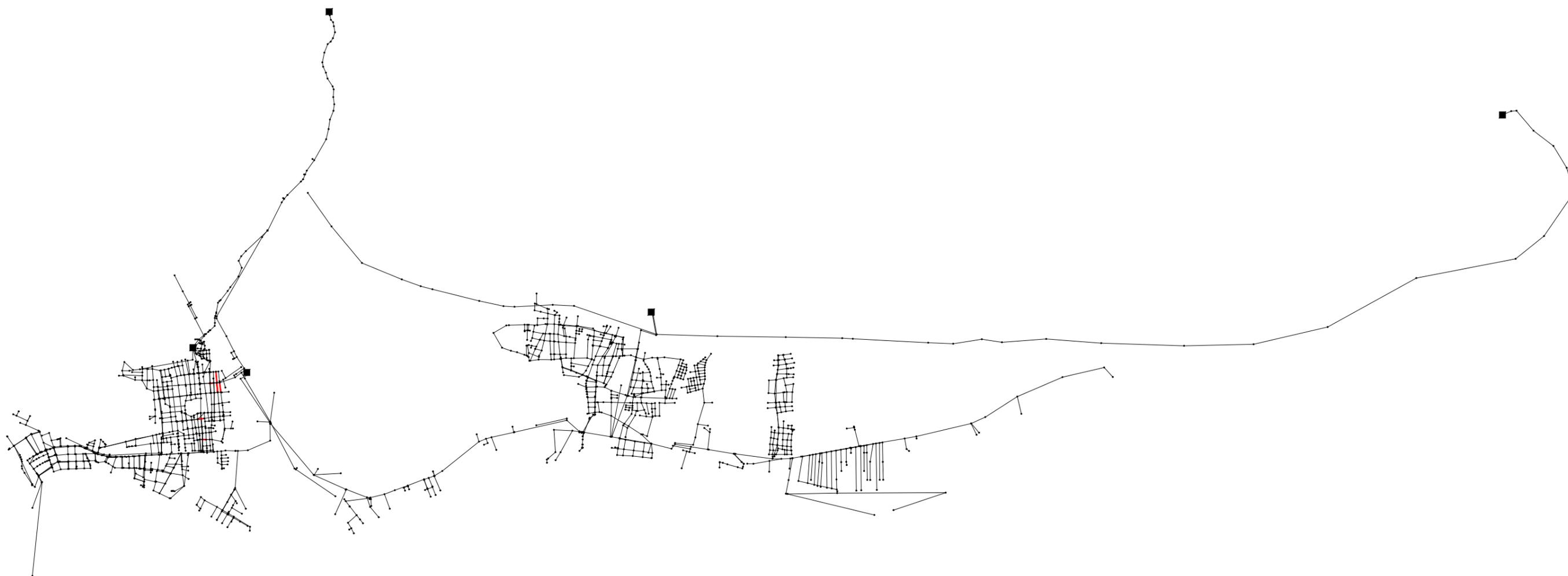
● Tubería Cerrada



 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	 ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA	Proyecto: Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)	Plano: Localización de las tuberías que son cerradas para realizar una nueva sectorización de la red hidráulica	Fecha: Junio 2017	Nº Plano: <b>6</b>
			Autor: Jesús Abellán López	Escala: 1:50000	



● Tubería Cerrada



TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR  
INGENIEROS  
INDUSTRIALES  
VALENCIA

Proyecto: **Proyecto de remodelación de las instalaciones de producción de agua potable en la urbanización de Gaira en Santa Marta (Colombia)**

Plano: **Localización de las tuberías que son cerradas para maximizar el caudal aportado por el depósito de regulación número 14**

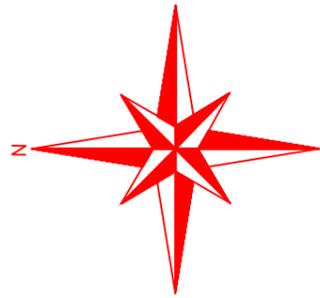
Autor: **Jesús Abellán López**

Fecha: **Junio 2017**

Escala: **1:50000**

Nº Plano:

**7**



- Tubería Cerrada
- Tubería Abierta

