

Trabajo Fin de Máster

METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

Intensificación: *HIDRÁULICA URBANA*

Autor:

ARANGO GIL, FRANCISCO ANTONIO

Tutor:

IGLESIAS REY, PEDRO LUIS

Cotutor/es:

MARTINEZ SOLANO, FRANCISCO J.

JULIO, 2018



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

DATOS DEL PROYECTO
TITULO: Metodología para proyectos de estaciones de bombeo directo a la red considerando la estrategia de regulación
AUTOR: FRANCISCO ANTONIO ARANGO GIL
DIRECTOR: DR PEDRO IGLESIAS REY
CODIRECTOR: DR FRANCISCO JAVIER MARTINEZ SOLANO
FECHA:

RESUMEN
<p>Los proyectos clásicos de estaciones de bombeo se realizan tomando como punto de partida las características básicas de una red de abastecimiento, que son el caudal máximo que tiene que suministrar y la altura piezométrica necesaria. En base a estos parámetros se seleccionan las bombas y posteriormente en función del consumo previsto se determina el modo de operación más adecuado.</p> <p>En este trabajo se propone una metodología alternativa en el que el proceso de selección de los grupos de bombeo incluye, antes de seleccionar los equipos, una estimación del coste de explotación basándose en el estudio de diferentes modos de regulación y operación de las bombas. Se realiza así una selección multicriterio en la que se consideran por una parte los costes de inversión (equipos de bombeo, instalaciones hidráulicas, equipamiento eléctrico y de control) y por otra los costes de explotación. Estos costes de explotación consideran las diferentes formas de operar del sistema (bombas de velocidad fija, bombas de velocidad variable o combinación de ambas).</p> <p>Como ejemplo, el método propuesto se aplica a la red TF, la cual cuenta con cuatro puntos de suministro. De esta red se conocen sus características generales, como son la curva de demanda y la curva de consigna. Luego de los respectivos cálculos, el resultado final muestra una frontera de Pareto donde se ilustra los puntos que representa el costo de inversión VS costo de operación. Cada punto que compone la frontera, significa una solución óptima que muestra el modelo y número de bombas, sumado a su correspondiente modo de regulación.</p>



ABSTRACT

The classic projects of pumping stations are made taking as starting point the basic characteristics of a supply network, which are the maximum flow that has to supply and the necessary piezometric height. Based on these parameters, the pumps are selected and, subsequently, depending on the expected consumption, the most appropriate mode of operation is determined.

This paper proposes an alternative methodology where the pumping groups selection process includes, before selecting the equipment, an estimate of the operation cost based on the study of different operation modes of the pumps. The method involves a multicriteria selection in which the investment costs (pumping equipment, hydraulic installations, electrical and control equipment) and operating costs are considered. These operating costs consider the different ways of operating the system (fixed speed pumps, variable speed pumps or a combination of both).

As an example, the proposed method is applied to the TF network, which has four supply points. The general characteristics of this network are known, such as the demand curve and the setpoint curve. After the respective calculations, the final result shows a Pareto border where the points represented by the cost of investment VS operating cost are illustrated. Each point that makes up the border, means an optimal solution that shows the model and number of pumps, added to its corresponding mode of regulation.

RESUM

Els projectes clàssics d'estacions de bombament es realitzen prenent com a punt de partida les característiques bàsiques d'una xarxa d'abastiment, que són el cabal màxim que ha de subministrar i l'altura piezomètrica necessària. Basant-se en estos paràmetres se seleccionen les bombes i posteriorment en funció del consum previst es determina el mode d'operació més adequat.

En este treball es proposa una metodologia alternativa en què el procés de selecció dels grups de bombament inclou, abans de seleccionar els equips, una estimació del cost d'explotació basant-se en l'estudi de diferents modes de regulació i operació de les bombes. Es realitza així una selecció multicriterio en la que es consideren d'una banda els costos d'inversió (equips de bombament, instal·lacions hidràuliques, equipament elèctric i de control) i per una altra els costos d'explotació. Estos costos



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

d'exploació consideren les diferents formes d'operar el sistema (bombes de velocitat fixa, bombes de velocitat variable o combinació d'ambdós).

Com a exemple, el mètode proposat s'aplica a la xarxa TF, la qual compta amb quatre punts de subministrament. D'esta xarxa es coneixen les seues característiques generals, com són la corba de demanda i la corba de consigna. Després dels respectius càlculs, el resultat final mostra una frontera de Pareto on s'il·lustra els punts que representa el cost d'inversió VS cost d'operació. Cada punt que compon la frontera, significa una solució òptima que mostra el model i numere de bombes, sumat al seu corresponent mode de regulació.

Palabras clave: Estación de bombeo; proyecto; regulación

Key words: Pumping station; project; operation

Paraules clau: Estació de bombament; projecte; regulació



CONTENIDO

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructuración del documento	3
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Definición de curva de consigna	5
2.2. Definición curva de modulación	6
2.3. Inyección directa a red mediante estaciones de bombeo.....	7
2.4. Criterios usuales de selección de bombas.....	8
2.5. Tipos de control de una estación de bombeo	11
2.5.1 Control manométrico	11
2.5.2 Control caudalimétrico	13
2.5.3 Control mano-caudalimétrico	14
2.6. Funcionamiento de bombas en paralelo	14
2.6.1 Bombas de velocidad fija (BVF)	14
2.6.2 Bombas de velocidad variable (BVV).....	15
2.6.3 Bombas de velocidad fija y variable (BVF + BVV)	16
CAPÍTULO III. MODOS DE REGULACIÓN.....	18
3.1. Bombas de velocidad fija (BVF)	18
3.2. Bombas de velocidad fija con medición manométrica (BVF - M).....	19
3.3. Bombas de velocidad fija con medición caudalimétrica (BVF-Q).....	20
3.4. Bombas de velocidad variable con medición piezométrica (BVV-P).....	22
3.5. Bombas de velocidad variable con medición caudalimétrica (BVV-Q)	23
3.6. Bombas de velocidad fija y variable con medición piezométrica (BVF + BVV - P)	24
3.7. Bombas de velocidad fija y variable con medición caudalimétrica (BVF + BVV - Q)	25
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA	27
4.1. Hipótesis de trabajo.....	28



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

4.1.1.	Curva de consigna.....	28
4.1.2.	Curva de modulación.....	29
4.1.3.	Base de datos de bombas.....	29
4.1.4.	Diseño básico de la estación de bombeo	29
4.1.5.	Tarifas eléctricas.....	31
4.2.	Selección de modelos de bombas viables	32
4.3.	Métodos de regulación aplicados.....	33
4.4.	Costos.....	33
4.4.1.	Costo de operación.....	34
4.4.2.	Costos de inversión.....	34
4.5.	Calculo y análisis de soluciones óptimas	36
CAPÍTULO V. CASO DE ESTUDIO		39
5.1.	Caracterización de la red TF.....	39
5.2.	Hipótesis de partida.....	40
5.2.1	Curva de consigna.....	40
5.2.2	Curva de modulación (Red TF)	41
5.2.3	Base de datos de modelos de bombas.....	43
5.2.4	Tarifas eléctricas.....	43
5.3.	Calculo de modelos de bombas viables.....	45
5.4.	Calculo costo de operación.....	48
5.4.1	Costo de operación BVF	49
5.4.2	Costo de operación BVF - P	51
5.4.3	Costo de operación BVF – Q.....	53
5.4.4	Costo de operación BVV – P	55
5.4.5	Costo de operación BVV – Q.....	58
5.4.6	Costo de operación BVF + BVV – P	60
5.4.7	Costo de operación BVF + BVV – Q	62
5.4.8	Análisis de resultados	64
5.5.	Costos de inversión	66
5.5.1	Costo de inversión bombas	66
5.5.2	Costo de variadores de velocidad	68



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

5.5.3	Costo de tubería y accesorios.....	69
5.5.4	Costos de válvulas	73
5.5.5	Costo equipos de medición y regulación.....	74
5.6.	Calculo y análisis de las soluciones óptimas.....	75
5.6.1	Óptimos de Pareto – Punto de suministro PS1	76
5.6.2	Óptimos de Pareto – Punto de suministro PS2	79
5.6.3	Óptimos de Pareto – Punto de suministro PS3	81
5.6.4	Óptimos de Pareto – Punto de suministro PS4	83
5.6.5	Análisis de resultados	86
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....		88
BIBLIOGRAFÍA.....		90
ANEXO		92



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva de consigna.....	5
Figura 2. Ejemplo de curva de modulación	7
Figura 3. Curva motriz plana y con pendiente.....	9
Figura 4. Funcionamiento control manométrico presostato	12
Figura 5. Funcionamiento control caudalimétrico	13
Figura 6. Funcionamiento BVF.....	15
Figura 7. Funcionamiento BVV	16
Figura 8. Funcionamiento BVF + BVV	17
Figura 9. Funcionamiento BVF.....	18
Figura 10. Funcionamiento BVF - M	20
Figura 11. Funcionamiento BVF-Q.....	21
Figura 12. Funcionamiento BVV – P	23
Figura 13. Funcionamiento BVV - Q	24
Figura 14. Funcionamiento BVF + BVV - P	25
Figura 15. Funcionamiento BVF + BVV – Q.....	26
Figura 16. Esquema de la metodología	27
Figura 17. Esquema tipo del equipo de bombeo	30
Figura 18. Ejemplo tarifa eléctrica - Endesa	31
Figura 19. Diagrama de flujo selección de bombas.....	33
Figura 20. Representación frontera de Pareto.....	37
Figura 21. Red TF	40
Figura 22. Curva de modulación.....	42
Figura 23. Gráfica tarifas eléctricas	45
Figura 24. Curva de consigna y curva motriz.....	49
Figura 25. Zona de trabajo BVF	50
Figura 26. Zona de trabajo BVF – P.....	52
Figura 27. Zona de trabajo BVF – Q.....	54
Figura 28. Zona de trabajo BVV – P	56
Figura 29. Comparación BVV - P y BVF – Q.....	58
Figura 30. Zona de trabajo BVV – Q	59
Figura 31. Resultados escenarios evaluados – (BVV + BVF – P)	62
Figura 32. Resultados escenarios evaluados – (BVV + BVF – Q)	64
Figura 33 Resumen de costos de operación.....	65
Figura 34. Grafica CC Bombas $\eta > 0.65$	67
Figura 35. Grafica CC Bombas $\eta < 0.65$	68
Figura 36. Grafico CC Variadores de velocidad	69
Figura 37. Grafico CC Tee	70
Figura 38. Grafico CC Codo	71



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

Figura 39. Grafico CC tubería.....	71
Figura 40. Esquema tipo de ejemplo	72
Figura 41. Grafico CC válvula de seccionamiento fundición	73
Figura 42. Grafico Válvula de retención fundición	74
Figura 43. Grafico CC Caudalímetro	75
Figura 44. Frontera de Pareto fuente PS1	77
Figura 45. Frontera de Pareto global fuente PS1	77
Figura 46. Frontera de Pareto fuente PS2	79
Figura 47. Frontera de Pareto global fuente PS2	80
Figura 48. Frontera de Pareto fuente PS3	82
Figura 49. Frontera de Pareto global fuente PS3	82
Figura 50. Frontera de Pareto fuente PS4	84
Figura 51. Frontera de Pareto global fuente PS4	84



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Curvas de consigna	40
Tabla 2. Distribución de la demanda	41
Tabla 3. Datos de la modulación	42
Tabla 4. Tarifas eléctricas ENDESA	43
Tabla 5. Tarifas eléctricas ENDESA - Continuación.....	44
Tabla 6. Altura piezométrica máxima.....	45
Tabla 7. Definición de parámetros	46
Tabla 8. Modelos de bombas posibles para PS1	46
Tabla 9. Modelos de bombas posibles para PS2	46
Tabla 10. Modelos de bombas posibles para PS3	47
Tabla 11. Modelos de bombas posibles para PS4	47
Tabla 12. Curva de consigna y motrices PS1 M33	48
Tabla 13. Costo de operación BVF.....	50
Tabla 14. Costo de operación BVF – Continuación	51
Tabla 14. Arranque y paro BVF-P.....	51
Tabla 15. Costo de operación BVF + P	53
Tabla 16. Arranque y paro BVF - Q.....	54
Tabla 17. Costo de operación BVF + Q	55
Tabla 18. Arranque y paro BVV - P	56
Tabla 19. Costo de operación BVV + P	57
Tabla 20. Costo de operación BVV + Q.....	59
Tabla 20. Costo de operación BVV + Q.- Continuación	60
Tabla 21. Costo de operación 3 BVV + 1 BVF – P.....	61
Tabla 23. Costo de operación 3 BVV + 1 BVF - Q.....	63
Tabla 24. Parámetros de diseño de EB.....	72
Tabla 25. Elementos de medición y control	74
Tabla 26. Tabla de soluciones global – PS1	78
Tabla 27. Tabla de soluciones global – PS1 Continuación.....	78
Tabla 28. Tabla de soluciones global - PS2	80
Tabla 29. Tabla de soluciones global - PS3	83
Tabla 30. Tabla de soluciones global - PS4	85
Tabla 31. Resultados de las soluciones	85
Tabla 32. Anexo datos de bombas	93



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El cambio climático junto con un crecimiento exponencial de la demanda de agua hace prever que para el año 2030 haya un desabastecimiento de un 40% de la población mundial (Leese & Meisch, 2015). Sumado a esto, se estima que para el 2030 habrá un crecimiento del 60% del consumo de energía (Castells, 2012). Estos eventos se evidencian tanto en áreas urbanas como rurales, en especial es las zonas agrícolas, donde el agua y la energía se convierten en bienes escasos. Teniendo en cuenta los factores previamente expuestos, es evidente que resulta cada vez más importante hacer un buen aprovechamiento de estos recursos.

Poder reducir los costos de operación e inversión en todas y cada una de las actividades que requiere desempeñar el ser humano, es cada vez más relevante. Entre estas actividades se destaca el manejo y operación de los sistemas de abastecimiento de agua, fundamentalmente debido a la gran importancia del agua como recurso en las labores diarias. En el área de manejo y optimización de recursos hídricos y energéticos, resulta indispensable comprender la importancia que tiene el correcto planteamiento de las estaciones de bombeo, pues un mal diseño puede conllevar mayores costos de inversión (equipos y accesorios) y operación (consumo energético).

Un equipo de bombeo con un rendimiento bajo requiere una mayor potencia, puesto que son inversamente proporcionales. Esto como resultado genera un consumo energético superior al necesario. Una misma estación de bombeo puede dimensionarse con diferente número de bombas. Un mayor número de bombas por lo general produce un aumento de la eficiencia de la estación de bombeo, pero al mismo tiempo supone un mayor coste de inversión. Mientras que pocas bombas hacen que el funcionamiento de la estación de bombeo trabaje más alejado de su óptimo, por lo que la potencia consumida será mayor. En base a estos requerimientos, se evidencia la necesidad de poder encontrar un equilibrio entre los costos de operación e inversión, que ayude encontrar la opción óptima para una cierta estación de bombeo.

Generalmente, para el diseño de una estación de bombeo se consideran únicamente parámetros como el caudal máximo y la altura de bombeo necesaria para garantizar la presión mínima, en el punto más desfavorable de la red. Establecidos estos dos parámetros, se escoge el número de bombas necesarias (que en muchas ocasiones solo resulta ser una) acorde al rendimiento máximo que proporcione cada una de estas. El problema fundamental de este tipo de metodología, resulta ser el sobredimensionamiento de las estaciones de bombeo. Puesto que al estar diseñadas



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

exclusivamente para satisfacer una altura piezométrica máxima, cuando el sistema no requiera las condiciones máximas de servicio, se estará gastando energía innecesariamente, al tener una potencia de suministro mayor a la necesaria. Esto supone un incremento notable de los costes de explotación, por el hecho de no haber considerado la regulación durante el proyecto de dimensionado de la estación de bombeo.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología alternativa para el dimensionado de estaciones de bombeo en sistemas de distribución de agua (SDA). Esta metodología pretende considerar los costes asociados a la regulación de la estación de bombeo, durante el proceso de dimensionado. Para ello, se adoptan como punto de partida dos elementos diferentes. El primero es la curva de consigna, que determina la energía mínima requerida para poder satisfacer las necesidades hidráulicas en el punto más desfavorable de un SDA. El segundo es la curva de modulación, que representa la variación a lo largo del tiempo del caudal que debe suministrar la estación de bombeo.

A partir de estos dos conceptos, la metodología propuesta considerará las características hidráulicas de los diferentes modelos de bombas que se plantean evaluar; las tarifas eléctricas existentes; y los diferentes modos de regulación de la estación de bombeo. El método se basa en el desarrollo de toda una serie de funciones de coste que valoran económicamente cada una de las opciones. Posteriormente, se determinan los modelos de las bombas que pueden ser válidos y los diferentes modos de regulación que pueden aplicarse en cada caso. Seguidamente, el proceso de decisión se realiza mediante una selección multiobjetivo que contrasta el número de bombas, el costo de inversión y el costo de explotación. En la fase final de la metodología, se desarrolla y analiza la frontera de Pareto entre los costes de inversión y de explotación para cada uno de los modos de regulación que se consideren.

Finalmente, para la verificación de la metodología propuesta, esta es aplicada al caso de la red de distribución de agua (RDA) de una población de aproximadamente 30.000 habitantes, denominada red TF, cuyas características principales de la red son tomadas del trabajo doctoral de Christian León Celi, llamado "A Methodology for the Optimization of Flow Rate Injection to Looped Water Distribution Networks through Multiple Pumping Stations". (León-Celi, Iglesias-Rey, Martínez-Solano, & Mora-Melia, 2016). El objetivo de ese trabajo es poder optimizar la energía suministrada desde la estación de bombeo, de forma tal que llegue a ser la mínima necesaria para satisfacer las necesidades de la red. Esto sin importar los puntos de consumo que pueda llegar a tener el sistema. De ese trabajo es que nace la idea de, aparte de optimizar la altura piezométrica de cabecera, poder optimizar los equipos de bombeo de forma tal que haya un equilibrio entre la energía consumida y el dinero invertido.



1.2. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es calcular por medio de un análisis multicriterio, las opciones óptimas de diseño de una estación de bombeo, teniendo no solo en cuenta las características de las bombas sino también el modo de regulación. Para poder llevar a cabo este objetivo, se necesita como complemento los siguientes objetivos.

Objetivos específicos

- Conocer y comprender los modos de regulación y tipos de medición más comunes en los equipos de bombeo.
- Determinar mediante el uso de curvas de coste un valor aproximado a cada uno de los elementos más importantes que componen un sistema de bombeo.
- Calcular las múltiples características que componen los diferentes modelos de bombas suministradas por el fabricante, necesarias para determinar las propiedades hidráulico energéticas.
- Validar la metodología propuesta mediante la aplicación de un caso de estudio de la vida real.
- Calcular por medio de un algoritmo todas las posibles soluciones de modelos de bombas y tipos de regulación que puedan satisfacer las necesidades de una determinada red de distribución de agua.
- Calcular mediante un análisis multicriterio la frontera de Pareto por medio de los óptimos de Pareto, los cuales representan las soluciones optimas a implementar en una red de distribución de agua, teniendo como criterio de selección, el costo de operación y el costo de inversión.

1.3. Estructuración del documento

En el presente capítulo se presenta una breve síntesis de la estructuración del trabajo fin de master realizado. Donde se muestra una vista general de los capítulos desarrollados a lo largo de su estructuración.

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Se presenta de forma general como se plantea llevar a cabo este trabajo. Donde se exponen datos que nos lleva a pensar él porque es necesario desarrollar métodos de optimización para reducir el consumo de energía. Además de explicar de forma breve conceptos generales, necesarios para entender y poner en práctica, al momento de



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

querer desarrollar la metodología planteada. De igual manera, se exponen los objetivos planteados y la estructuración del documento presentado.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

Se explican los conceptos generales, necesarios para poder desarrollar el trabajo planteado. Donde se encuentra los métodos de regulación y medición más usuales. Además de unas características propuestas por diferentes autores, para poder seleccionar un equipo de bombeo, acorde a las características de una red.

CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE REGULACIÓN

Se explican a detalle los diferentes métodos de regulación que son contemplados en la metodología de diseño y selección de las estaciones de bombeo óptimas. En total corresponden a 7 métodos de regulación.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Es presentado el procedimiento llevado a cabo, paso por paso, para obtener el resultado final propuesto. En este capítulo se encuentra el por qué y el cómo se obtienen cada uno de los elementos necesarios para poder desarrollar de manera satisfactoria la metodología planteada. En total está compuesta por 5 apartados, cada uno con sus respectivos procesos.

CAPÍTULO 5. CASO DE ESTUDIO

Es planteado un ejemplo real que cumpla las condiciones descritas previamente, esto para poder ser aplicada la metodología. Allí se muestra el procedimiento realizado a la red TF, la cual cuenta con cuatro puntos de suministro. Para cada uno de ellos, se encuentra una frontera de Pareto, la cual dispone de las soluciones óptimas, siendo cada una de ellas una estación de bombeo distinta. Para este capítulo se tiene en total unos 6 apartados. Donde por último se realiza un análisis detallado de las soluciones encontradas.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Se realiza un breve análisis y se muestran las conclusiones a las que se llega, gracias a los resultados obtenidos. Mostrando que métodos de regulación resultan ser más eficientes en la red evaluada.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se realiza una breve descripción del abastecimiento directo a red por medio de una estación de bombeo, los criterios de selección de los equipos de bombeo, los métodos de regulación más empleados y los diferentes tipos de control utilizados en los métodos de regulación.

2.1. Definición de curva de consigna

La curva de consigna resulta de seguir la altura piezométrica mínima necesaria en el punto de abastecimiento más desfavorable de la red, para cada uno de los caudales demandados (Pimentel Gomes, Pérez Garcia, & Iglesias Rey, 2007). Poder seguir esta curva lleva unas implicaciones no solo de carácter hidráulico, sino energético. Al proporcionar la altura piezométrica mínima necesaria, se garantiza una potencia mínima para cada instante de la red, resultando per se, la forma de regulación que nos incurre a un menor consumo de energía. Poder establecer la curva de consigna resulta importante para determinar la intersección entre esta y la curva motriz. Este punto proporciona el caudal y la altura piezométrica para la cual debe iniciar la puesta en marcha, o el apagado de cada una de las bombas que pudiese haber.

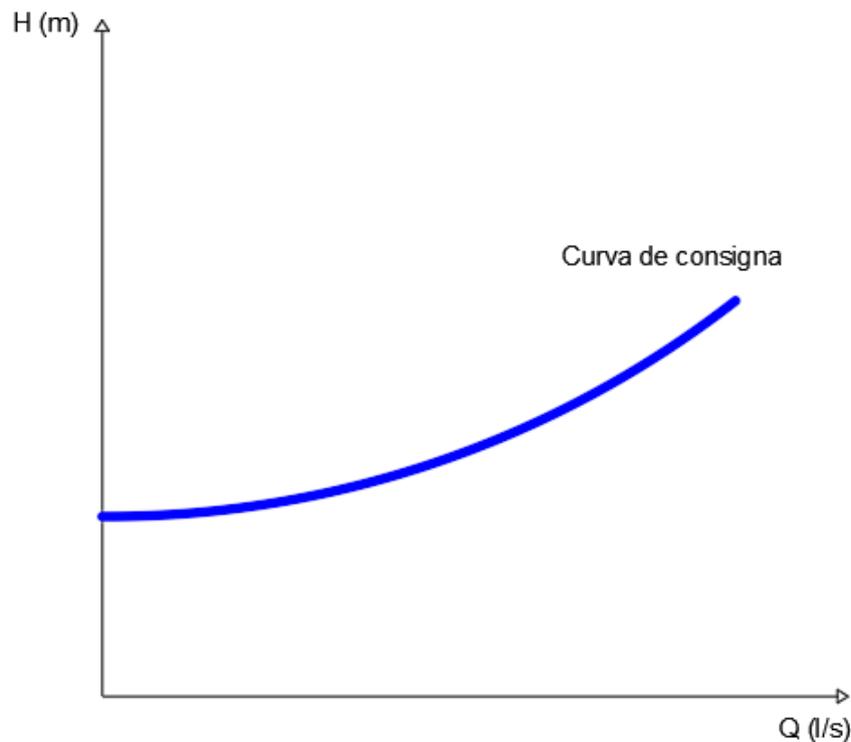


Figura 1. Curva de consigna



En la Figura 1 se ve el comportamiento de la curva de consigna, siendo esta de tipo exponencial. Debido que entre mayor sea el caudal demandado, mayor son las pérdidas de energía. Por lo tanto, necesita más altura piezométrica para poder suministrar el caudal demandado.

La consideración del concepto de curva de consigna supone asumir que la estación de bombeo a diseñar suministra directamente agua a la red. Esto supone que el caudal demandado por la estación de bombeo es prácticamente independiente de la altura. Al mismo tiempo, cualquier aumento en la altura supone un aumento en la presión en los diferentes nudos de la red.

La curva de consigna que se toma como ejemplo en este trabajo, fue desarrollada por el trabajo doctoral de León Celi (León-Celi et al., 2016). Cuyo propósito es poder encontrar la curva de consigna de una red, independiente de la cantidad de puntos de suministro que esta tenga. Desarrollando una metodología que contempla un método discreto, donde se evalúa un conjunto finito de combinaciones entre las estaciones de bombeo de cada punto de suministro y un método continuo, donde la búsqueda de una solución óptima, se da a partir del uso de algoritmos de optimización. Es así, como por medio de ese trabajo, se puede encontrar la presión de cabecera óptima lo más semejante a la curva de consigna, para todos los puntos de suministro que pueda tener una red.

2.2. Definición curva de modulación

La curva de modulación es una representación del comportamiento de una red de abastecimiento por medio de un coeficiente. Donde muestra la distribución del consumo de una población, generalmente a lo largo de un día.

La curva de modulación se obtiene del resultado de la curva de demanda, donde el caudal medio multiplicado por cada uno de los coeficientes de consumo que conforma la curva de modulación, nos da como resultado el caudal total que debe suministrar el equipo de bombeo para cada instante de tiempo.

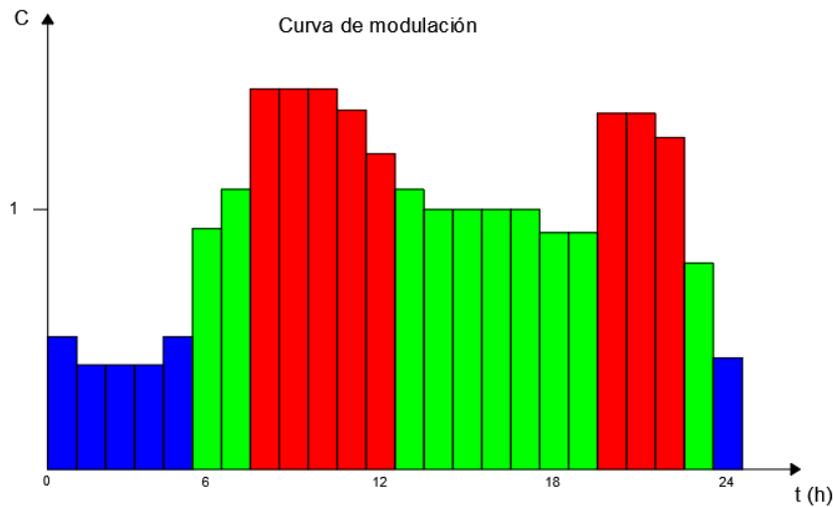


Figura 2. Ejemplo de curva de modulación

La Figura 2 muestra un ejemplo de una curva de modulación. En el comportamiento de esta red se evidencia que pasa por tres etapas de demanda durante el día. Las franjas azules que tienen un coeficiente de demanda inferior a 1 se conoce como demanda valle. Por su parte las franjas verdes, que tienen un coeficiente cercano a 1, se conoce como demanda llano y por último las franjas rojas que tienen un coeficiente mayor a 1 corresponde a la demanda punta. En todo caso el promedio de los coeficientes de demanda que componen la curva de modulación, debe ser igual a 1.

El comportamiento que presenta la Figura 2 o cualquier otra curva de modulación, tiene siempre el mismo estilo que la curva de demanda correspondiente a esta.

La curva de modulación y el caudal medio o en su defecto la curva de demanda, se utiliza para calcular la altura piezométrica junto con el caudal proporcionado por el equipo de bombeo y a su vez la potencia consumida en cada instante de tiempo.

2.3. Inyección directa a red mediante estaciones de bombeo

Las formas más comunes de suministro de agua potable son mediante el uso de depósitos elevados o inyección directa a red mediante estaciones de bombeo. Esta última resulta ser una solución viable cuando la inversión de construir un depósito elevado es mayor de lo presupuestado, no se cuente con el área requerida y también cuando la estructura de almacenamiento genera un impacto visual y/o ambiental considerable.

La inyección directa a red se realiza mediante el uso de bombas de velocidad fija, bombas de velocidad variable o una combinación de ambas; en su mayoría acopladas en paralelo. Usualmente las bombas que se disponen son de las mismas características, aunque se tenga una o más bombas de capacidad menor, esto con el fin de satisfacer las demandas de la hora valle. Se recomienda mínimo tener una bomba de reserva para



poder garantizar el correcto funcionamiento de la red, por si en algún momento una de las bombas llegase a fallar. La bomba de reserva debe de igual forma estar funcionando alternadamente, garantizando así que en caso de ser necesario su uso, esta cuente con las condiciones de funcionamiento óptimo.

Los principales objetivos de la inyección directa a red, son:

- Optimizar la operatividad de la estación de bombeo garantizando el funcionamiento de las bombas dentro de los rangos de mayor eficiencia.
- Simular el comportamiento la curva de consigna mediante el empleo de los distintos métodos de regulación.
- Minimizar en lo posible las magnitudes de los transitorios originados por los arranques y paros de los equipos de bombeo.
- Garantizar en la mayor medida el abastecimiento de agua, previendo la falta de suministro de energía o averías de los equipos (Cabrera et al., 1996).

2.4. Criterios usuales de selección de bombas

Normalmente cuando se desea seleccionar un equipo de bombeo, se busca identificar entre unos modelos determinados de bombas, cuál de estos puede suministrar la altura piezométrica máxima demandada por la red. Seguidamente se identifica la bomba que mayor capacidad hidráulica y eficiencia energética proporcione. Una vez hallado el modelo de bomba. Se determina a continuación el número de bombas necesarias para poder satisfacer el caudal máximo, donde en muchos de los casos resulta siendo tan solo una bomba (Pulido-Calvo & Gutiérrez-Estrada, 2011). Todo esto se hace sin calcular dentro de todas las posibles soluciones de modelos de bombas, el método de regulación que pueda ser más eficiente económicamente hablando.

Algunos autores como Jones, Bosserman, Sanks y Tchobanoglous, recomiendan antes de seleccionar el modelo de bomba que compondrá la estación de bombeo, se consulte con los operarios con cuales tipos y modelos de bombas están familiarizados. Con esto, la operación y mantenimiento de los equipos de bombeo se llevarán de una forma más eficiente. Al mismo tiempo se recomienda que el sistema de bombeo este compuesto por el mismo modelo de bomba, con el fin de simplificar la regulación y cuando sea necesario hacer reparaciones o intercambios de piezas entre las bombas, sea más sencillo (Jones, Bosserman, Sanks, & Tchobanoglous, 2006). Si es necesario escoger entre una bomba con curva motriz de pendiente pronunciada y una con pendiente plana, es mejor escoger la segunda, pues una bomba con una curva característica de pendiente plana, reproduce una gran variación de capacidad respecto a la variación piezométrica (Fitch & Hong, 1998).

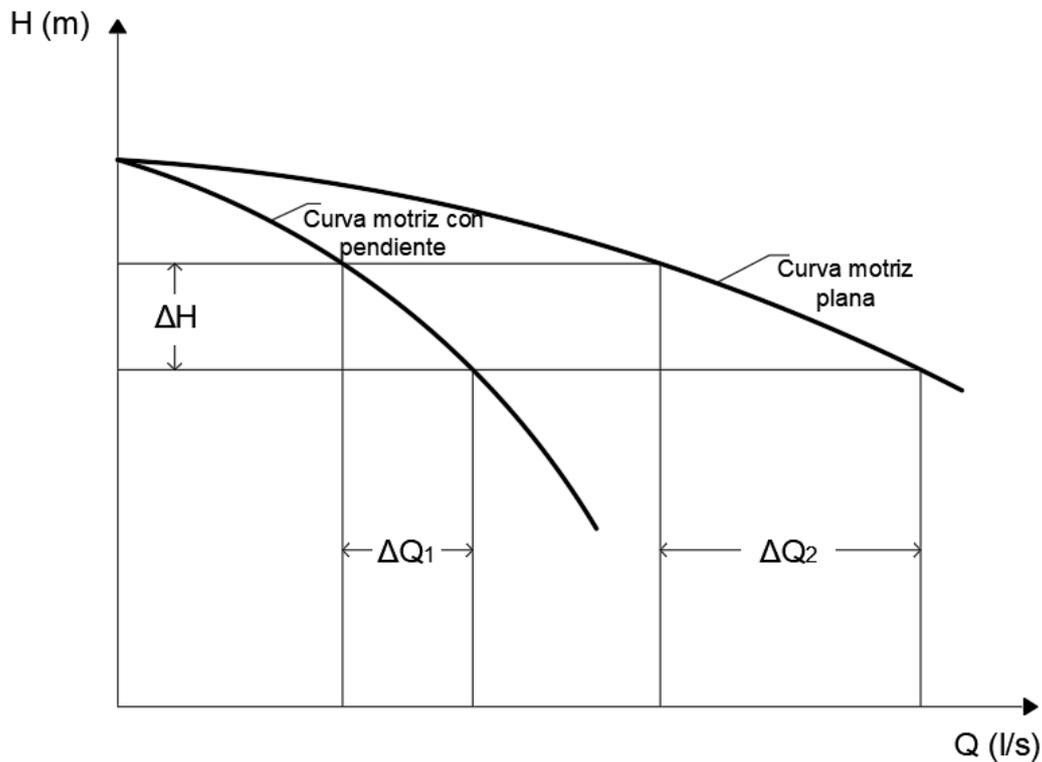


Figura 3. Curva motriz plana y con pendiente

En la Figura 3, se muestran dos curvas motrices características. Una con pendiente y otra plana. Para una misma diferencia de altura ΔH , el valor del caudal de una curva motriz con pendiente es menor que para una curva plana, por lo tanto, la curva con pendiente tiene una mayor posibilidad de regulación que la curva plana.

Como características principales para un correcto diseño de una estación de bombeo, se propone seguir en lo posible las siguientes consideraciones:

- Diseñar la estación de bombeo de forma tal que la demanda pico sea suplida por dos o tres bombas.
- Cuando se presente la demanda media, deberá estar en funcionamiento una sola bomba.
- Limitar en lo posible el número de modelos de bombas, cuando uno sería lo ideal (Jones et al., 2006).

Aunque en la anterior referencia se recomienda trabajar con una sola bomba cuando se presente la demanda media, es recomendable que sea así solo cuando la demanda sea baja. Con esto cuando la demanda sea media, habrán más de una bomba en funcionamiento y de esta forma se obtendrá unos mejores resultados en la regulación.

Es necesario tener en cuenta que el diseño que se considere, debe estar supeditado a la evaluación de crecimiento de demanda de la red. Por consiguiente, en algunos casos se recomienda inicialmente instalar bombas de pequeña capacidad para así ser



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

reemplazadas en un futuro por bombas de mayor capacidad. Aun si así no se hiciera, se recomienda dejar un espacio libre para la implementación de los futuros equipos de bombeo (Warring, 1984).

Según el Pump Handbook se deben tratar los siguientes parámetros al momento de escoger el sistema de bombeo:

- Conocer la altura piezométrica total, es decir, la suma entre la altura de las bombas y la altura de descarga, teniendo en cuenta las pérdidas de carga que se presenten a lo largo de la red.
- Es fundamental conocer las curvas características de las bombas. Con esto se podrá hacer un análisis de la conveniencia de escoger un modelo cuya curva motriz presente una pendiente más pronunciada o no, dependiendo de las variaciones de presión a la que esté expuesto el punto de descarga.
- Por último, se hace un análisis de cavitación, asegurándose de que la altura neta positiva de aspiración disponible sea mayor que la requerida (Karassik, Messina, Cooper, Heald, & others, 2001).

Es bastante usual ver el acoplamiento de bombas en paralelo en las estaciones de bombeo, con una buena regulación. Esta disposición permite transiciones de caudales más suaves a medida que el caudal fluctúa, obteniendo así una mayor eficiencia. El diseño debe garantizar que el funcionamiento de las bombas cuando trabajen en paralelo, no esté por encima o por debajo del rango para el que fueron diseñadas. Cuando se quiere adicionar una bomba más al diseño, es importante saber que el comportamiento de la estación no va a ser proporcional a este y la capacidad de bombeo se reduce. Por ello dos bombas funcionando en paralelo no proporcionan el doble de caudal del que haría solo una, debido que las pérdidas aumentan directamente proporcional al caudal transportado (Karassik et al., 2001).

Utilizar bombas de velocidad variable permite una mayor eficiencia en la operación de un sistema de bombeo convencional, ayudando a mejorar el funcionamiento del sistema, especialmente para caudales que son inferiores a los mínimos de diseño en los casos de bombas de velocidad fija. El procedimiento que se utiliza para determinar la cantidad de bombas de velocidad variable en un diseño, son las siguientes: Para un caudal de diseño inferior a la capacidad que proporciona una bomba, la bomba debe ser de velocidad variable; si el caudal es dos veces la capacidad de una bomba, las dos bombas deben ser de velocidad variable y por ultimo si el caudal de diseño es mayor de dos veces la capacidad de una bomba, se deben de implementar dos bombas de velocidad variable más las bombas de velocidad fijas que sean requeridas para cumplir el caudal de diseño (Moreno, Carrion, Planells, Ortega, & Tarjuelo, 2007).

Es de suma importancia especificar los modos de funcionamiento de la estación de bombeo antes de escoger el modelo de bombas que lo compondrán, con esto se sabrá

previamente si las bombas trabajaran en serie o paralelo, si funcionaran de forma continua o intermitente o si habrá unas que trabajen con velocidad fija o variable, entre otras. De igual manera el diseñador debe estimar la periodicidad de las labores de mantenimiento en los equipos de bombeo, la cual será determinarte en el número, tipo de bomba(s) y repuestos a considerar (Planells Alandi, Carrión Pérez, Ortega Álvarez, Moreno Hidalgo, & Tarjuelo Martín-Benito, 2005).

2.5. Tipos de control de una estación de bombeo

Los distintos métodos de control de medición de una estación de bombeo que inyecta directo a red, son necesarios para poder determinar cómo funciona el método de regulación con el que se esté trabajando. Debido a las variaciones de caudal y presión de la red, suponiendo que la demanda no es constante y que se tienen fluctuaciones de presión y por ende caudal, resulta necesario poder medir uno de los parámetros o ambos. Es por esto que los medios de control usados en los equipos de bombeo de una red de abastecimiento son manométricos, caudalimétrico o una combinación de ambos.

Antes de explicar los distintos tipos de control, es importante definir el concepto de recubrimiento. El recubrimiento se define como el rango de la zona útil de dos bombas sobre la curva de consigna. El recubrimiento me muestra el funcionamiento de las bombas. Es decir, si está encendida o apagada una de ellas. Es importante contar con un recubrimiento cuando se pasa de n bombas a $n+1$. Dado que, si el sistema esta funcionando en un rango de caudales donde no haya recubrimiento, se estaría excediendo el número máximo de encendido de la bomba, dado por el fabricante. Dado el caso en el que no haya recubrimiento, es importante contar con un calderín. Este equipo me permite poder suministrar el excedente de caudal del recubrimiento y así mismo, cuando la presión de la red aumente, el calderín se recargará.

2.5.1 Control manométrico

El control manométrico se da por medio de la lectura de la presión, normalmente a la salida de los equipos de bombeo. La lectura de la presión se hace a través de un presostato o un transductor de presión. El primero mide una o dos presiones de consigna (dependiendo de las características del instrumento), ya sea la presión de arranque o paro. El interruptor, al ver que la presión en el presostato de la red está marcando la de consigna, enviara una señal para el encendido o apagado de los sistemas de bombeo.

Los presostatos se ven usualmente en modos de regulación de bombas de velocidad fija, donde lo único que podrá determinar es la orden de encendido o apagado de cada una

de las bombas. Es por esto que habrá tantos interruptores para captar las señales del presostato, como bombas sean necesarias.

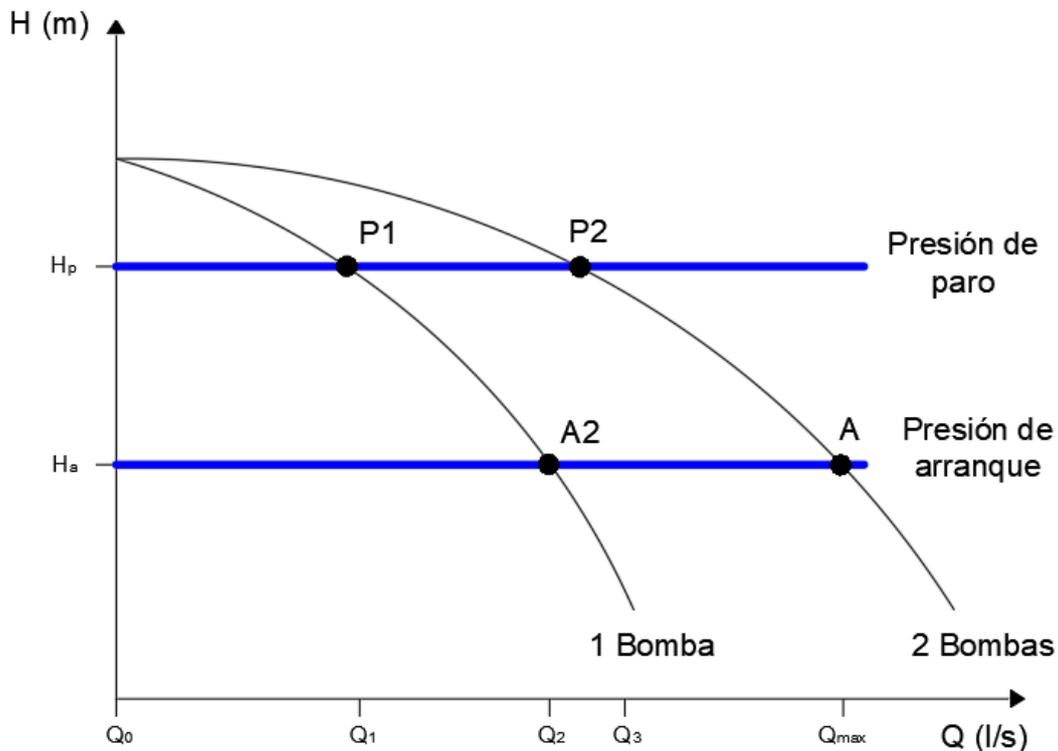


Figura 4. Funcionamiento control manométrico presostato

En la Figura 4 se observan los rangos de presiones establecidas en la red, comprendidas entre H_p y H_a , donde H_p significa la presión máxima de suministro en la red. Es decir, donde se debe apagar un equipo de bombeo y H_a establece la presión mínima de suministro de la red, donde un equipo de bombeo debe encenderse. En los rangos entre Q_0 y Q_1 , donde la demanda es mínima, no habrá ningún equipo de bombeo en funcionamiento, cuando la presión baja de P_1 y se encuentra en un rango entre P_1 y A_2 o Q_1 y Q_2 , estará encendida solo una bomba. Para este caso en particular, cuando el caudal demandado está entre Q_2 y Q_3 (donde no hay un recubrimiento), se recomienda contar con un calderín. La función de esta estructura aparte de proteger la red de transitorios, es poder suministrar caudales de pequeña proporción, asegurando que no haya un excesivo número de arranques de la segunda bomba en una fracción corta de tiempo. Por último, los caudales entre Q_3 y Q_{max} serán suministrados por los dos equipos de bombeo. Así como funciona este sencillo ejemplo con dos bombas, funcionara igual para todas las que sean necesarias.

Es necesario precisar que las presiones de arranque y paro, en caso de estar lo suficientemente cerca la una de la otra, deben de estar desfasadas. De lo contrario se pueden confundir las señales de encendido y apagado, llevando el sistema a funcionar de forma errónea.

Por otra parte, el control manométrico por medio de un transductor de presión busca medir la presión a cada instante, justo a la salida de los equipos de bombeo. Tiene como propósito enviar una señal a un autómatas programable, donde al obtener las coordenadas presión vs caudal, por medio de la ecuación (1), podrá hallar la velocidad de giro a la que debe ir las bombas de velocidad variable que compongan la red.

$$H = H_0 * \alpha^2 - A \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \quad (1)$$

Donde H corresponde a la altura piezométrica; H_0 es el termino constante de la ecuación motriz de la bomba; A el termino cuadrático; n el número de bombas que están en funcionamiento; Q el caudal; α la velocidad de giro (proporción entre la velocidad de giro N y la velocidad nominal N_0) de la bomba.

2.5.2 Control caudalimétrico

Otro método usual de control para las estaciones de bombeo es el caudalimétrico, cuyo objetivo es poder medir el caudal que circula por la red y así determinar el número de bombas en funcionamiento.

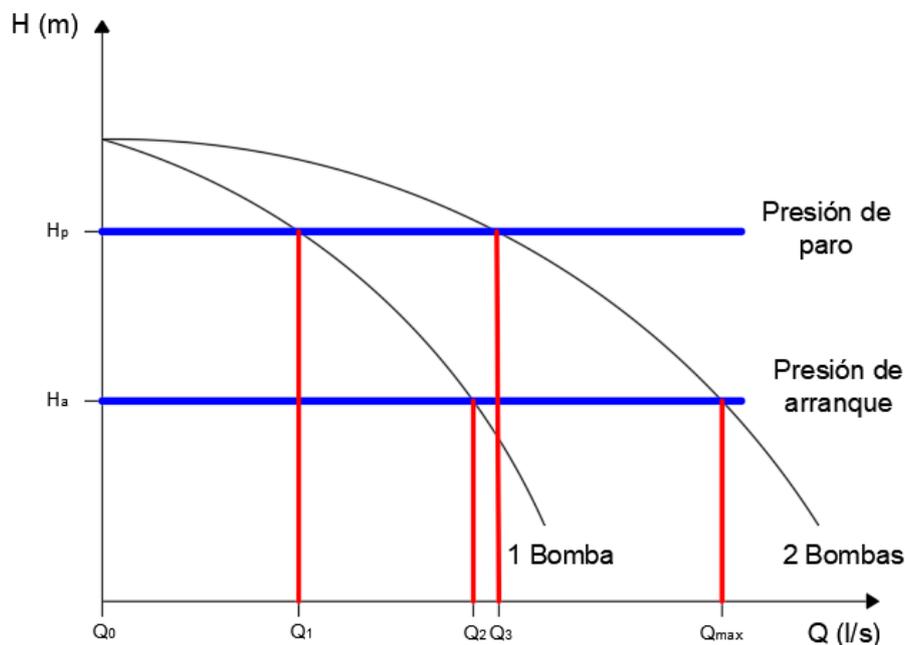


Figura 5. Funcionamiento control caudalimétrico

La Figura 5 muestra los distintos rangos de caudales y las bombas que están en funcionamiento para cada una de ellas. Funcionando igual que el método de regulación de la Figura 4 pero con distinto control de medición. Cabe resaltar que el control caudalimétrico se ajusta de mejor forma si son bombas de velocidad variable las que

componen el sistema de bombeo, debido a que el caudal demandado será igual al suministrado. En cambio, si las bombas son de velocidad fija, trabajarán dentro de un rango de caudales. Si las curvas motrices son más planas, es decir con menos pendiente, se garantizará de cierta forma un recubrimiento mayor (Cabrera et al., 1996).

2.5.3 Control mano-caudalimétrico

El control mano-caudalimétrico resulta de una combinación entre los dos apartados anteriores. Donde se busca adaptar el funcionamiento de las bombas a la curva de consigna. Para poder desarrollar este método, es necesario el uso de transductores de presión, que al medir la presión constantemente, le envían la información al autómata programable, que a su vez debe controlar el caudal demandado por la red. Cuando el caudal aumenta, al disminuir la presión de la red sobre la presión de consigna, el autómata dará la orden necesaria a las bombas, para que la regulación sea la necesaria. Por el contrario, cuando la presión aumenta, el autómata enviará una señal, modificando el funcionamiento de las bombas, hacia la presión de consigna.

El control mano-caudalimétrico al ser el que mejor se ajusta a la curva de consigna, es el que tiene una mayor regulación y por ende un menor costo de energía (HOMOGÉNEA, 2013).

2.6. Funcionamiento de bombas en paralelo

En este apartado se muestran los métodos de regulación de inyección directa a red más comunes dentro de las estaciones de bombeo. Donde su característica principal es el funcionamiento de una o varias bombas trabajando en paralelo, según la presión o caudal de consigna. El funcionamiento del equipo de bombeo puede ser de velocidad constante, trabajar con un variador de frecuencia o combinado.

2.6.1 Bombas de velocidad fija (BVF)

La regulación mediante el uso de bombas de velocidad fija que están funcionando en paralelo, se da con el encendido y apagado de cada una de las bombas que compone el sistema, por medio de unas señales de paro y arranque. Las señales se envían a un PLC a través de una lectura ya sea manométrica (mediante el uso de presostatos o manómetros) o caudalimétrica (mediante el uso de caudalímetros), con unos rangos de consigna, estableciendo los caudales o presiones máximas y mínimas.

De cierta manera, siempre que la curva motriz (curva de la bomba) se vea superada por la curva de consigna, se deberá encender la siguiente bomba. Igualmente, cuando la curva de consigna pase de estar de la curva de n bombas a la curva de n menos 1 bombas, se debe apagar una de ellas.

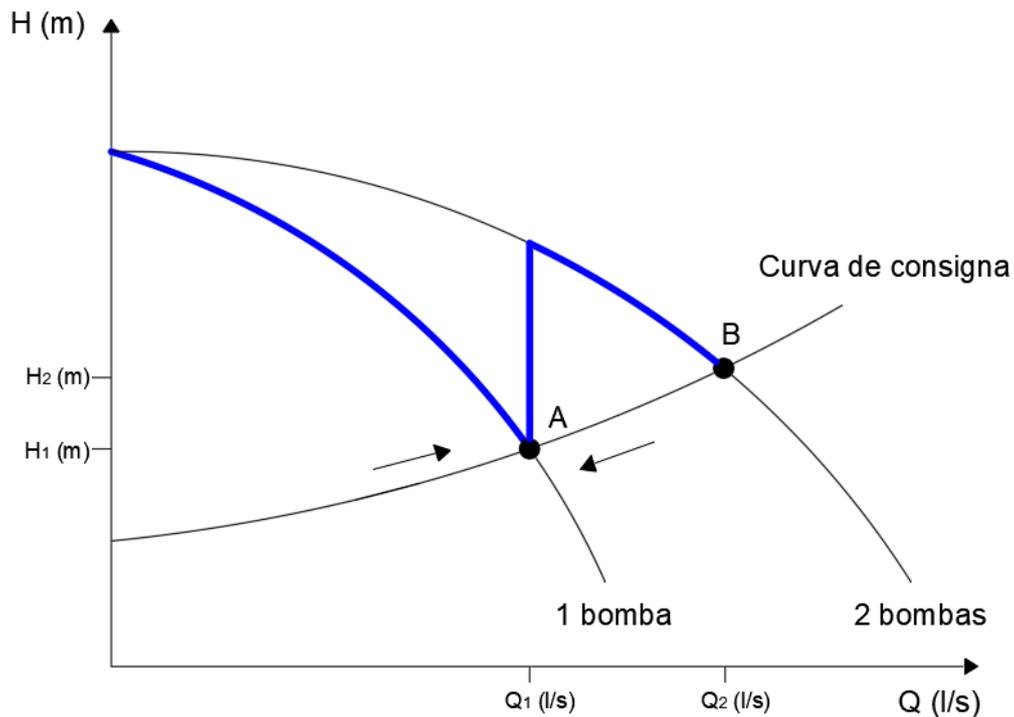


Figura 6. Funcionamiento BVF

Cuando el punto de funcionamiento del sistema es mayor a Q_1 (ver Figura 6), pasa de funcionar una bomba a dos, hasta llegar al punto B donde se muestra la capacidad máxima que puede proporcionar el equipo de bombeo. Una vez el consumo disminuye y pasa del punto B al punto A, se enviará una señal dando la orden de apagado de la segunda bomba. El camino que debe recorrer el sistema para poder satisfacer cada uno de los puntos de funcionamiento requerido por la red, se muestra en a través de la línea azul.

2.6.2 Bombas de velocidad variable (BVV)

La regulación mediante el uso de bombas de velocidad variable acopladas en paralelo se caracteriza por poder seguir la curva resistente durante toda su trayectoria. Esto se debe gracias a que los equipos de bombeo contienen un variador de frecuencia, el cual permite variar la velocidad rotacional del motor eléctrico, suministrando una menor potencia y proporcionalmente un menor consumo de energía.

La velocidad de giro reducida α , resultante de la proporción entre la velocidad de giro y la velocidad de giro nominal, es calculada cuando una señal de presión o caudal es enviada a un autómata programable el cual calcula la velocidad de giro, dependiendo de unas consignas previamente descritas.

Las ventajas que tiene la regulación mediante el uso de bombas de velocidad variable son:

- disminución de las pérdidas de carga en la impulsión al poder seguir la curva de consigna.
- El grupo de bombeo trabaja con un rendimiento más óptimo, disminuyendo el consumo de energía.
- Es necesario un menor número de bombas necesarias para hacer la regulación. La desventaja que tiene este método de regulación es el coste de inversión de los variadores de frecuencia (Cabrera et al., 1996).

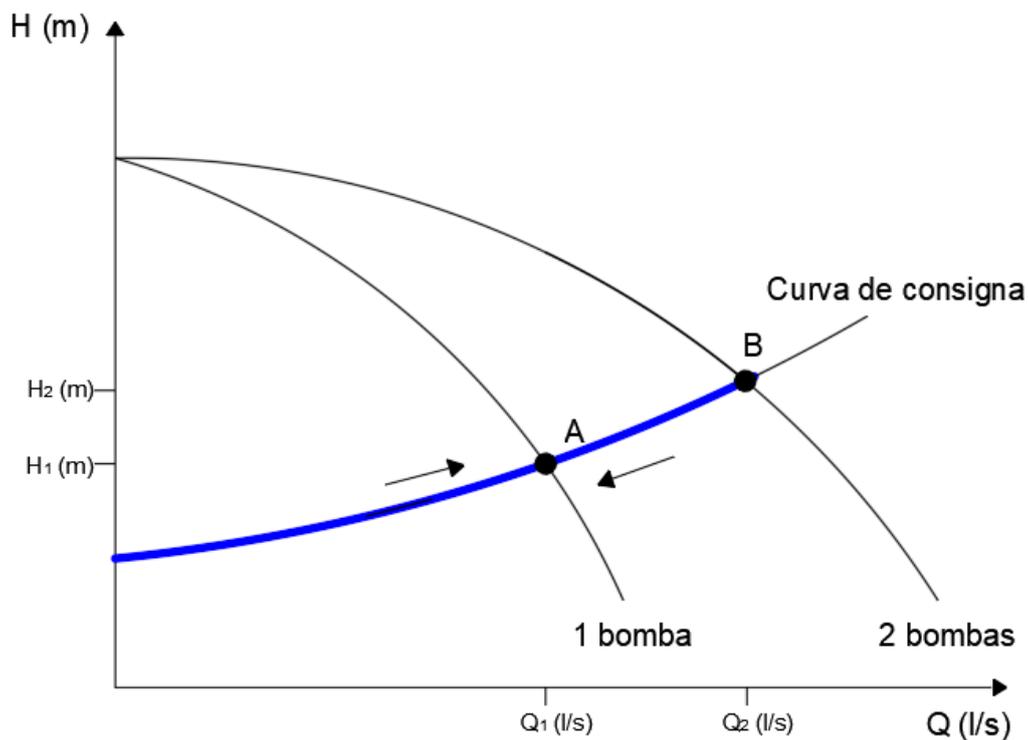


Figura 7. Funcionamiento BVV

Como se ve en la Figura 7, las bombas de velocidad variable siguen en cada instante la curva de consigna. Cuando las características de la red superen el Q_1 o el punto A, se encenderá la segunda bomba, proporcionándose cada una la mitad del caudal. De igual manera cuando las necesidades de la red estén por debajo del punto A, estará trabajando solo una bomba con la velocidad de giro correspondiente para esas coordenadas Q y H.

2.6.3 Bombas de velocidad fija y variable (BVF + BVV)

La regulación compartida de una estación de bombeo resulta de la combinación entre bombas de velocidad fija (BVF) y variable (BVV), normalmente asociadas en paralelo. Donde la bomba de velocidad fija proporciona el caudal total de un escalón y la bomba de velocidad variable suministra el caudal restante, entre el caudal total demandado y el caudal de la BVF. Las señales de paro, arranque y la velocidad de giro de la BVV, se

establecen de igual forma que los métodos de regulación descritos en los apartados 2.5.1 y 2.5.2, mediante el uso de un autómata programable el cual recibe la señal de un aparato de medición. Al tomar esos datos los analiza con las condiciones de consigna programadas previamente, determinando las acciones a realizar en los equipos de bombeo (Fuertes et al., 2002).

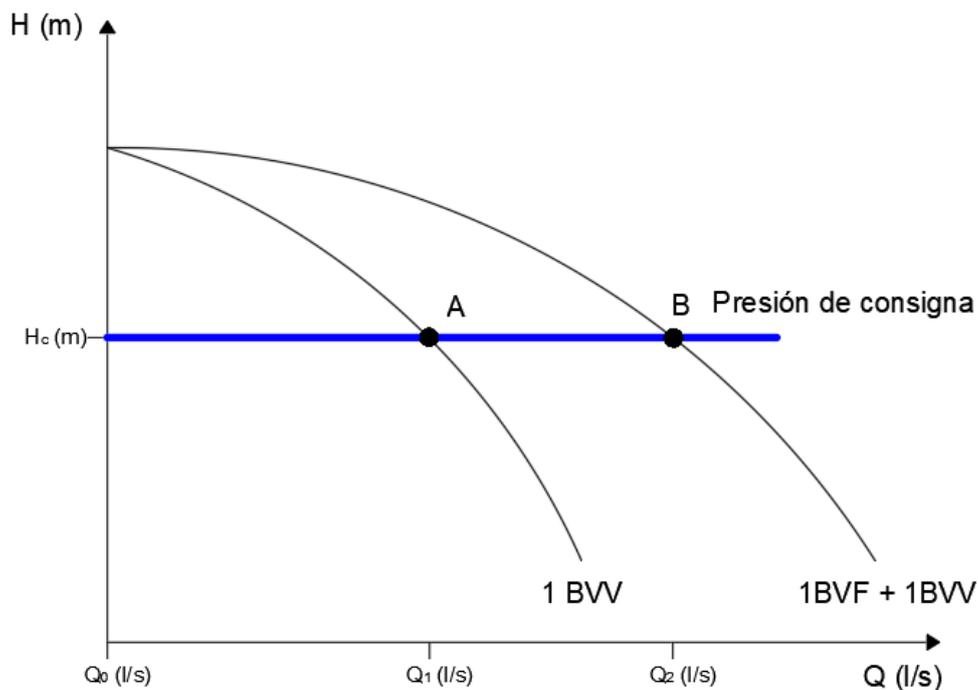


Figura 8. Funcionamiento BVF + BVV

En la Figura 8 se representan las curvas motrices de dos bombas, una de ellas de velocidad fija y la otra de velocidad variable, junto con una presión de consigna demandada por la red. Para los caudales desde Q_0 a Q_1 , justo donde la presión de consigna supera la curva motriz de una sola bomba, estará funcionando la BVV, luego para los rangos de caudal entre Q_1 y Q_2 , estará la BVF en su máxima capacidad junto con la BVV funcionando a una velocidad de giro necesaria para satisfacer los requerimientos de la red, siendo Q_2 el caudal máximo de diseño de la estación de bombeo.

CAPÍTULO III. MODOS DE REGULACIÓN

Dentro de los modos de regulación más comunes para una estación de bombeo, enunciados en el apartado 2.6, se seleccionaron la combinación entre modos de regulación y tipos de medición, resultando en total 7 distintos modos de regulación. De los cuales, en uno de ellos no se tendrá en cuenta la regulación. En los siguientes subcapítulos se tratará por separado cada uno de los distintos modos de regulación que se tienen en cuenta.

3.1. Bombas de velocidad fija (BVF)

El primero de los métodos a evaluar, será el más básico, el cual consiste en operar con una(s) bomba(s) de velocidad fija sin ningún tipo de medición. Por tanto, todas las bombas que componen el sistema de bombeo y que funcionan en paralelo, están trabajando en todo momento sin importar cuál sea la demanda que requiera la red. Aunque se sabe que al estar funcionando todos los equipos de bombeo que componen la estación, se está consumiendo la mayor cantidad de energía posible, también se sabe que es el método que menor costo de inversión requerirá, puesto que no contempla ningún elemento de medición o regulación. Es por esto, que se plantea como una posibilidad calcular y ver los resultados al operar con este sistema.

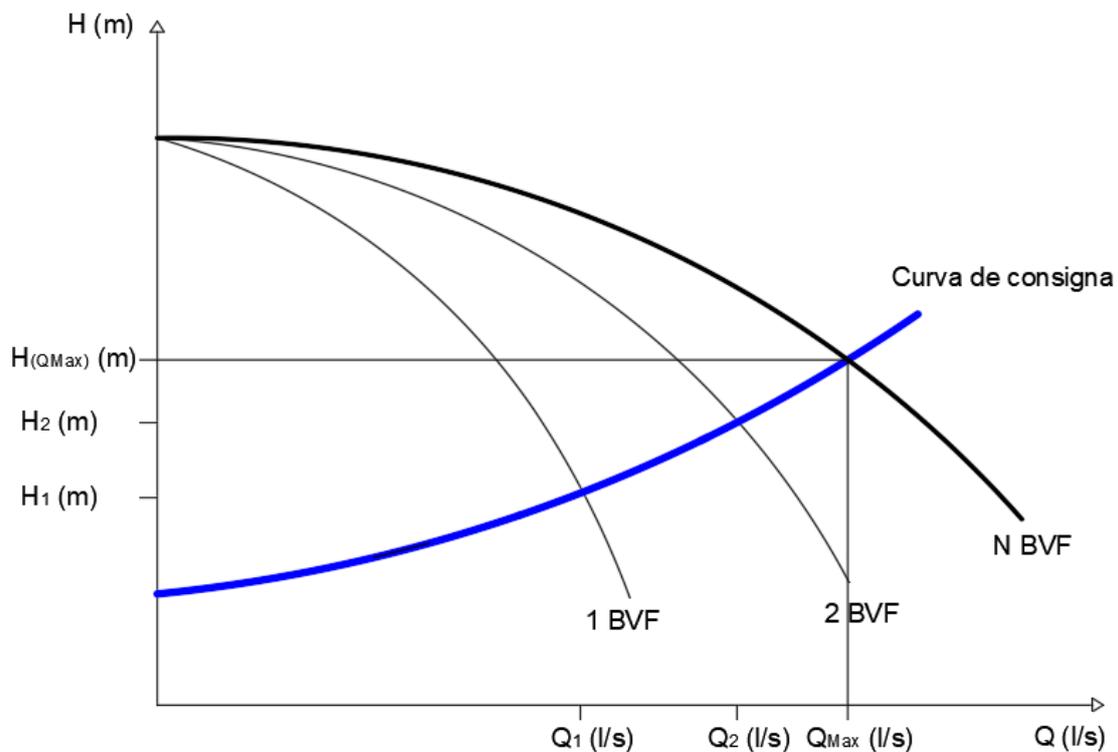


Figura 9. Funcionamiento BVF



En la Figura 9 se muestra como, sin importar el caudal demandado, la estación de bombeo va a estar suministrando la demanda con todos los equipos de bombeo (N BVF) al mismo instante. También muestra para caudales inferiores al caudal máximo (Q_{max}). Es decir, para Q_1 o Q_2 , la altura piezométrica que suministre el equipo de bombeo será mayor a la necesaria en todo instante y por consiguiente la potencia, sabiendo que esta es directamente proporcional a la altura piezométrica. De la anterior apreciación se deduce que, desarrollando el método de regulación con bombas de velocidad fija sin medición alguna, se consumirá la mayor energía posible sobre los otros métodos de regulación que se tendrán en cuenta en este trabajo. Sin embargo, es el método que menos costo de inversión requiere al no utilizar ningún modo de medición.

3.2. Bombas de velocidad fija con medición manométrica (BVF - M)

Este método de regulación se caracteriza por trabajar con bombas de velocidad fija junto con una medición manométrica. La medición se puede realizar con la ayuda de manómetros, donde a partir de unas señales de encendido y apagado según unas presiones de consigna, se dará la orden de arranque o paro de cada uno de los equipos que componen la estación de bombeo.

Todas estas señales de encendido y apagado se envían cuando las presiones sobre la red, establecidas previamente, superan o son inferiores a los datos encargados de activar la señal. A fin de evitar falsas señales en la medición de la presión en la red por parte de los presostatos, se aconseja que los umbrales de presión establecidos en el dispositivo, deben estar desfasados entre si un mínimo de 0.3-0.5 bar.

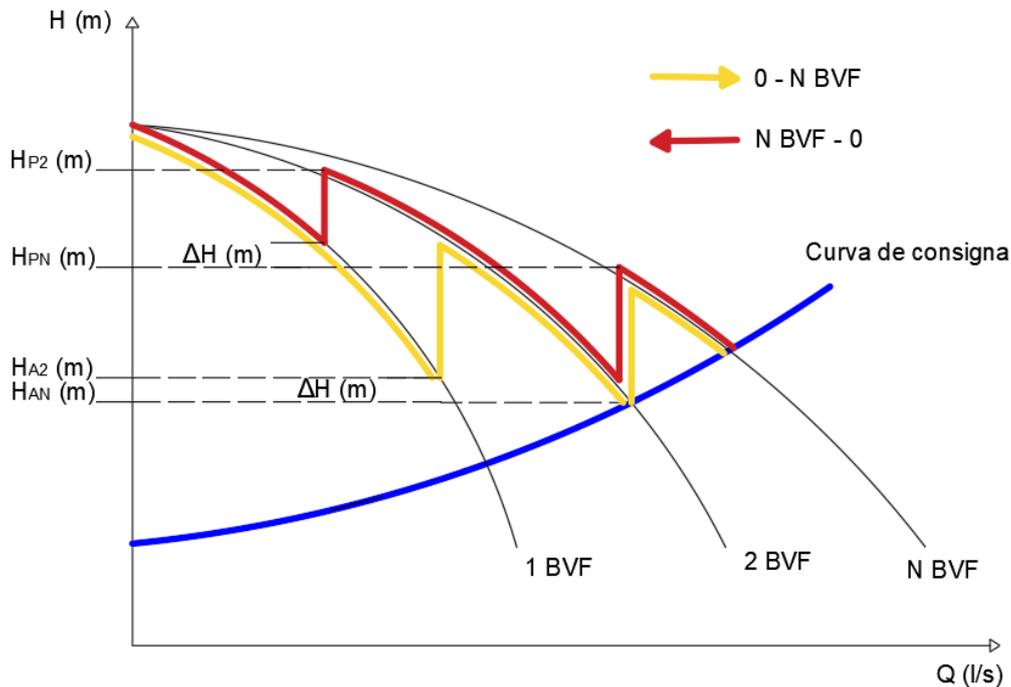


Figura 10. Funcionamiento BVF - M

En la Figura 10 se muestran los distintos puntos de arranque y paro de un número determinado de bombas, donde el comportamiento de trabajo de los equipos funcionara con consignas distintas de forma ascendente (franja amarilla) y descendente (franja roja). El punto de partida para poder determinar los puntos de arranque y paro de la última bomba (N), se da gracias a la intersección entre la curva motriz de N-1 (en este caso 2 BVF) y la curva de consigna. Mostrando una altura piezométrica de arranque de la bomba N (H_{AN}) y la de paro (H_{PN}). De igual forma el desfase de presión entre los manómetros, enunciado anteriormente es representado por ΔH .

Es necesario precisar que se pueden presentar casos en los que este modo de regulación no pudiese funcionar, como es el caso de haber tantas bombas en paralelo, que la altura piezométrica de paro de las últimas bombas, esté por encima de la altura inicial de la curva motriz. Entre más bombas compongan la estación de bombeo, es más probable que la altura de paro se encuentre por encima de la curva motriz, lo que tornaría imposible poder regular mediante este método.

3.3. Bombas de velocidad fija con medición caudalimétrica (BVF-Q)

El último método de regulación mediante la utilización de bombas de velocidad fija, es con un control caudalimétrico. Es decir, que mediante el uso de un dispositivo de medición de caudal como el caudalímetro, se puede calcular el caudal circundante de la red y a través un controlador lógico programable (PLC), con unos parámetros de

consigna ya estipulados, envía la orden de arranque y parada a cada una de las bombas del sistema.

El funcionamiento de la regulación por medición caudalimétrica al contar con menos consignas de arranque y paro de bombas, resulta ser más sencilla y menos restrictiva con el número de bombas, que la manométrica.

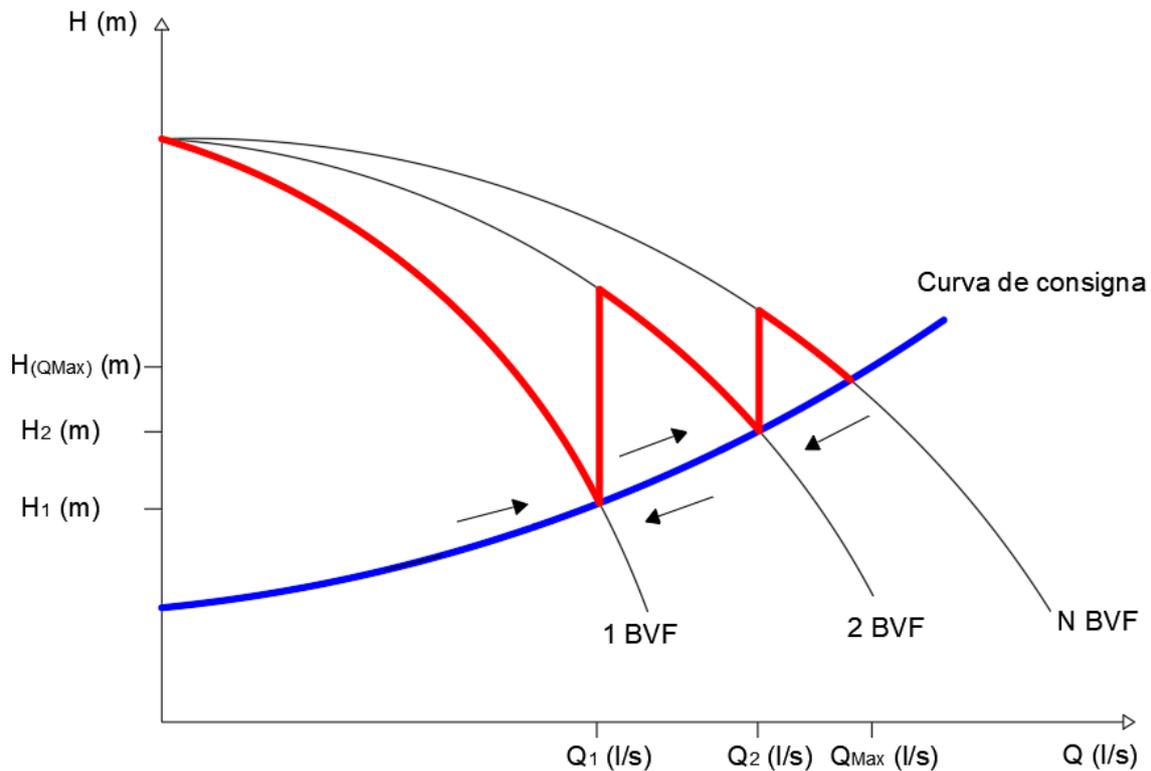


Figura 11. Funcionamiento BVF-Q

Los puntos que definen el encendido de las bombas, corresponden a los mismos puntos de apagado (Figura 11). Estos son calculados por la intersección entre todas las distintas curvas motrices y la curva de consigna.

La ecuación que definirá la curva motriz de las bombas en funcionamiento es la siguiente:

$$H = H_0 - A \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \quad (2)$$

Donde, H corresponde a la altura piezométrica proporcionada por la bomba; H_0 la altura inicial de la curva motriz; A es la constante que representa el comportamiento del término cuadrático; Q el caudal suministrado por la bomba; n el número de bombas en funcionamiento.

Como resultado de la igualdad entre la curva de consigna y la curva motriz se llega a la siguiente:

$$Q = \sqrt[2]{\frac{H_0 - DH}{\frac{A}{n^2} + R}} \quad (3)$$

Donde, Q es el caudal que resulta ser el punto de consigna para determinar el encendido y apagado de las bombas; H_0 la altura inicial de la curva motriz; DH una constante que corresponde a la altura inicial de la curva de consigna; A una constante que representa el comportamiento del termino cuadrático de la curva motriz; n el número de bombas en funcionamiento; R una constante que representa el comportamiento del termino cuadrático de la curva de consigna.

El número total de señales de paro y arranque para un equipo de bombeo, es el número total de bombas que componen la estación menos uno. Como en el caso de la Figura 11, las señales de arranque y paro serán 2.

3.4. Bombas de velocidad variable con medición piezométrica (BVV-P)

Este método de regulación se caracteriza por combinar el modo de bombas de velocidad variable junto con una medición piezométrica. El punto piezométrico de referencia es en todo momento la altura del caudal máximo de la curva de consigna, por lo tanto, la(s) bomba(s) que están en funcionamiento para cualquier caudal, suministra la misma altura.

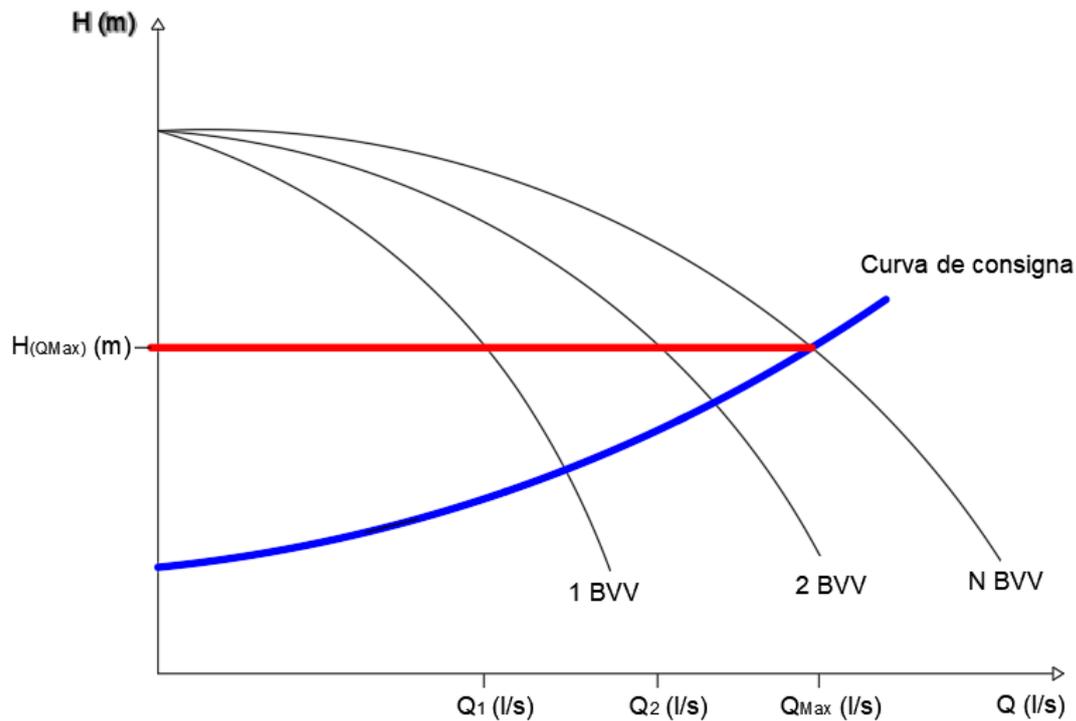


Figura 12. Funcionamiento BVV – P

En la Figura 12 se ve un breve ejemplo, donde la línea roja representa la altura piezométrica correspondiente al caudal máximo de la curva de demanda y la línea azul la curva de consigna. Los equipos de bombeo funcionan a una misma velocidad de giro para mantener una sola consigna de altura, de forma tal que, dependiendo del caudal, se sabe el número de bombas que están en funcionamiento.

Los puntos de consigna donde se determina el arranque y paro de las bombas, se hace igualando la ecuación (1) a la altura piezométrica para el caudal máximo de demanda de la curva de consigna, sabiendo que el término n cambia según el número de bombas que estén en funcionamiento.

Para poder llevar a cabo esta regulación es necesario contar con un transductor de presión, cuya función es leer la presión en todo momento. De esta forma los datos se envían a un PLC y se calcula el número de bombas en funcionamiento junto con el radio de giro al que debe de estar el variador de frecuencia.

3.5. Bombas de velocidad variable con medición caudalimétrica (BVV-Q)

Cuando una estación de bombeo funciona con un número suficiente de bombas de velocidad variable y cuenta con un modo de medición caudalimétrico, como lo es el caudalímetro. En este caso es posible hacer que la curva motriz se adapte en cada momento a la curva de consigna, como se explicara en la Figura 13.

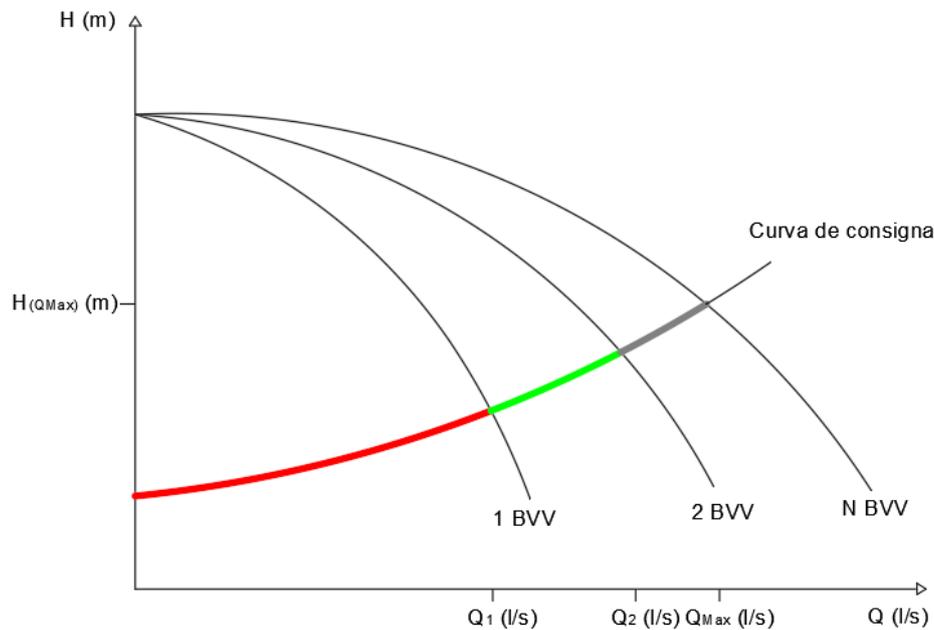


Figura 13. Funcionamiento BVV - Q

En el ejemplo de la Figura 13, hay una estación de bombeo que consta de tres bombas de velocidad variable acopladas en paralelo. Para cada rango de caudales hay un determinado número de bombas en funcionamiento. En el rango de la línea roja hay una bomba de velocidad variable trabajando a una velocidad de giro, determinada mediante el uso de la ecuación (1). Sobre la línea verde hay dos bombas trabajando, ambas de velocidad variable, con la misma velocidad de giro y suministrando en iguales proporciones el caudal demandado. De igual manera y por último, sobre la franja gris están trabajando tres bombas con las mismas características previamente descritas. El funcionamiento de un equipo de bombeo con un número determinado de BVV, corresponde al mismo descrito en este ejemplo.

Tanto este subcapítulo como el anterior, donde los equipos de bombeo cuentan con variadores de frecuencia, son los que tienen un mayor costo de inversión. Sabiendo que los otros subcapítulos o no tienen variadores de frecuencia o cuentan con un sistema de regulación combinado entre bombas de velocidad fija y variable, tal y como se muestra en los siguientes apartados.

3.6. Bombas de velocidad fija y variable con medición piezométrica (BVF + BVV - P)

Este método tiene en funcionamiento BVF y BVV acopladas en paralelo, cuya medición piezométrica es mediante el uso de un transductor de presión. Este método de regulación se tiene en cuenta solo cuando el número de bombas que componen la estación de bombeo son dos o más.

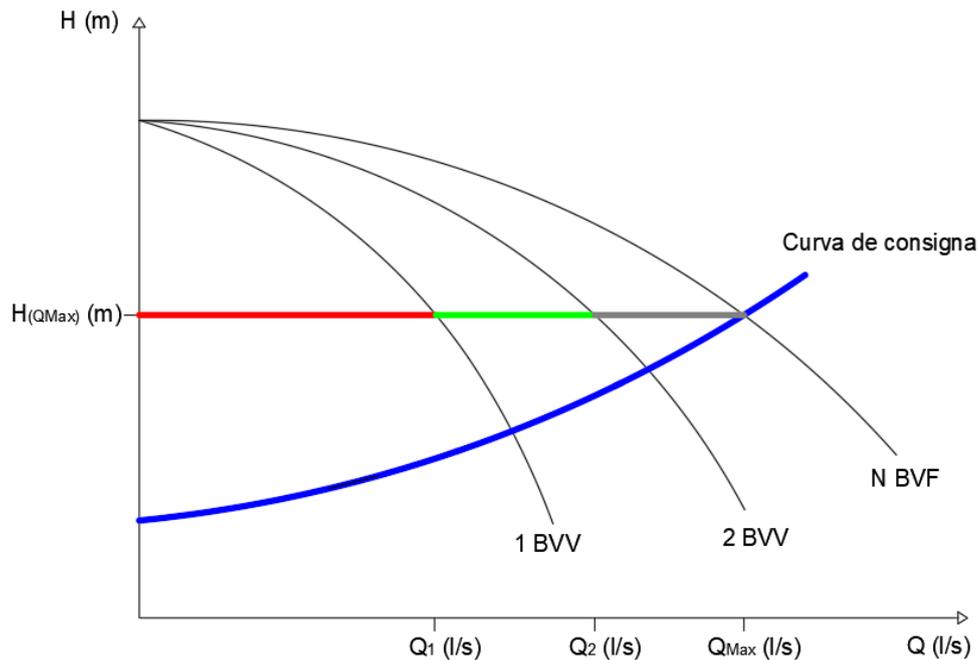


Figura 14. Funcionamiento BVF + BVV - P

El funcionamiento de este método se basa en el encendido de cada bomba mediante la lectura constante de la presión. Siempre que se sobrepase una presión de consigna o se baje de ella, se dará orden de encendido o apagado (Figura 14). De igual manera, también por medio del PLC se calcula la velocidad de giro a la que debe ir la o las BVV. Según sea la cantidad de BVV, en todo momento se encenderán primero todas las BVV y por último las BVF. Lo anteriormente dicho se hace con el fin de poder tener una mejor regulación, puesto que las bombas trabajaran con una mayor eficiencia y por ende se tendrá un menor consumo de energía.

El ejemplo de la Figura 14 muestra un sistema de bombeo con tres bombas, dos de velocidad variable y una de velocidad fija. La presión de consigna será en todo momento la altura piezométrica del caudal máximo de la curva de demanda. La franja roja es función de trabajo de una BVV, luego cuando el caudal supera a Q_1 , se encenderá la segunda BVV funcionando así sobre la franja verde dos BVV, cada una suministrando el mismo caudal, por lo que la velocidad de giro será igual para ambas. Luego que se supere Q_2 , se encenderá la BVF trabajando a su máxima potencia suministrando Q_1 y las dos BVV restantes la resta entre el caudal demandado en ese instante y Q_1 .

3.7. Bombas de velocidad fija y variable con medición caudalimétrica (BVF + BVV - Q)

En este método al igual del subcapítulo 3.5, los equipos de bombeo están siguiendo la curva de consigna en todo momento, la única diferencia es que en esta regulación hay una combinación entre BVF y BVV. El proceso de encendido de cada una de las bombas

se hace bajo el mismo criterio que el subcapítulo anterior, encendiendo con prioridad todas las BVV y por último las BVF. En la Figura 15, se muestra el funcionamiento cada que sea necesario aplicar este método.

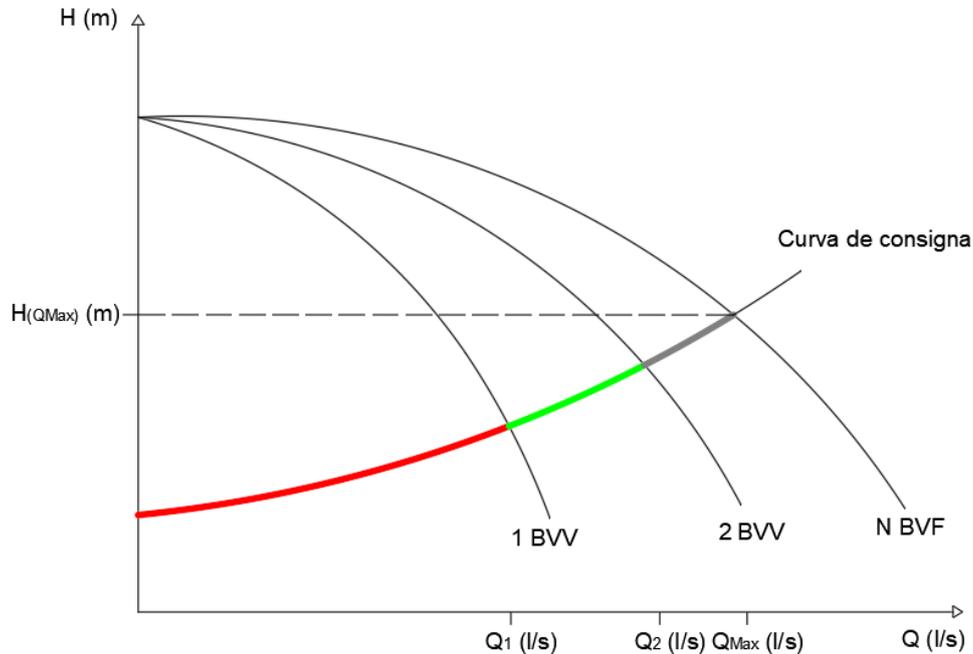


Figura 15. Funcionamiento BVF + BVV - Q

La única particularidad que diferencia la Figura 13 de la Figura 15, es al momento de superar el Q_2 , entrara en funcionamiento una BVF. La distribución de caudales y funcionamiento del método descrito es igual al del subcapítulo 3.6. Sin embargo, hay dos factores preponderantes que los diferencian, una las presiones o caudales de consigna (regulación) y otra el tipo de control (medición).

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

La metodología propuesta en el presente documento consiste en la obtención de una frontera de Pareto, mediante la estimación global de costes de inversión y explotación que pueda incurrir una estación de bombeo (EB). Para poder obtener los costos finales, es necesario realizar una selección multicriterio de todas las posibles soluciones que satisfagan las necesidades hidráulicas de la red en estudio.

La metodología planteada toma como hipótesis iniciales disponer de varios elementos básicos de partida: la curva de consigna; la curva de modulación; una base de datos con los parámetros característicos de las curvas candidatas a ser seleccionadas en el proyecto de la estación de bombeo; un diseño básico de la estación de bombeo parametrizado; y las tarifas eléctricas (ver Figura 16).

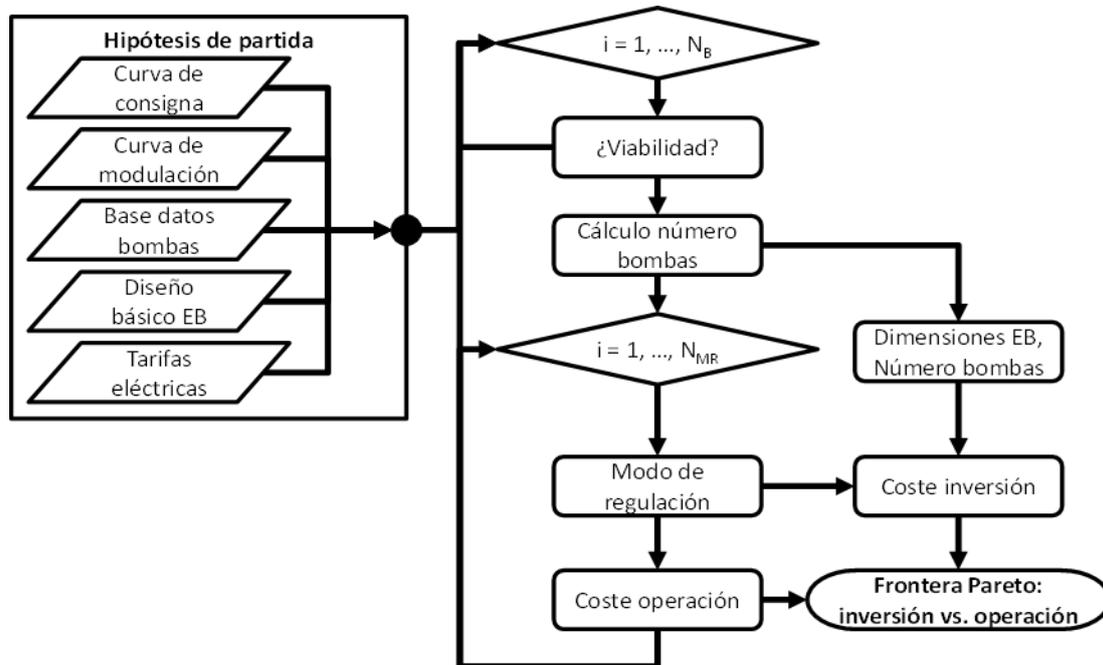


Figura 16. Esquema de la metodología

Una vez establecidas las hipótesis de partida, se procede a realizar un análisis de cada uno de los modelos de bomba definidos en la base de datos. Se comienza analizando si el modelo es viable, teniendo como punto de partida la altura del caudal máximo de la curva de consigna, es decir $H_b > H(Q_{max})$. En caso de no ser viable el modelo, se continúa con el siguiente. Por el contrario, de ser viable el modelo, se calcula el número de bombas y junto con él, un diseño parametrizado de la estación de bombeo. A partir del diseño tipo de la EB, se obtiene parte del coste de inversión en base a una serie de funciones de coste.

Luego de calcular cada modelo de bomba válido, se analizan los diferentes modos de

regulación con su respectivo tipo de control de medición. Cada uno de estos modos de operación conduce a definir el coste de regulación de la solución considerada. Al mismo tiempo, cada modo de regulación tiene asociados unos costos en particular. Por ello, una vez considerado el modo de operación, quedan completados los costes de inversión asociados.

La fase final analiza cada una de las soluciones (modelo y número de bombas) y modos de operación. Este análisis permite establecer la frontera de Pareto que compara costes de inversión y de explotación. No obstante, a fin de analizar adecuadamente las soluciones, estas fronteras se analizan para cada modo de regulación de la estación de bombeo y al final se obtendrá una única frontera de Pareto, mostrando las opciones más óptimas a implementar de cada uno de los distintos métodos de regulación.

En los próximos apartados se describen todos y cada uno de los pasos definidos en el esquema de la Figura 16.

4.1. Hipótesis de trabajo

Para poder desarrollar la metodología propuesta en este trabajo, se plantean unas hipótesis de partida fundamentales, que van desde datos de fabricantes como lo son las características principales de los modelos de bombas, hasta propiedades hidráulicas de la red, como lo es la curva de consigna. Cada una de las hipótesis de partida, se presentarán en los siguientes apartados.

4.1.1. Curva de consigna

Conocer la curva de consigna es necesaria para poder seleccionar los modelos de bombas que puedan satisfacer los requerimientos de la red y calcular mediante la regulación del equipo de bombeo los costos de operación.

La metodología de cálculo de la curva de consigna puede seguirse en León-Celi et al. (2016). Sin embargo, a fin de poder representarla matemáticamente se ha formulado dicha curva mediante la expresión:

$$H = DH + RQ^2 \quad (4)$$

donde, H corresponde a la altura mínima de la curva de consigna; DH es un término adoptado como constante; R es una constante que representa el comportamiento del término cuadrático; Q el caudal suministrado por la estación de bombeo.

4.1.2. Curva de modulación

La curva de modulación con su respectivo caudal medio de la red, es necesario para poder hacer el cálculo de la potencia consumida por la estación de bombeo a lo largo del día. Además de esto, sirve para poder determinar las zonas de funcionamiento de cada una de las bombas, según sea su método de regulación.

4.1.3. Base de datos de bombas

El equipo de bombeo estará compuesto por un modelo de bomba previamente definido. Por ello, se selecciona una base de datos de bombas, que serán las candidatas a formar parte de la solución final. Esta base de datos deberá ser tan amplia como fuese posible, con esto las posibles soluciones serán en mayor número. El método requiere caracterizar hidráulicamente cada uno de los modelos considerados en la base de datos. Los parámetros que tienen mayor importancia a la hora de caracterizar cada bomba son: la curva motriz de alturas, la curva de rendimiento, la potencia del motor eléctrico y el rango de caudal en el que debe funcionar el equipo.

Los datos proporcionados por parte del fabricante permiten poder calcular si el modelo de bomba satisface o no las necesidades hidráulicas de la red. Además, las diferentes curvas permiten evaluar la potencia consumida para cada instante de funcionamiento del equipo de bombeo.

Con los datos de las bombas se calcula: el precio aproximado del equipo de bombeo, el número de bombas que compone el sistema de bombeo, parte de los costos de accesorios y la energía consumida.

4.1.4. Diseño básico de la estación de bombeo

Un aspecto fundamental de la metodología desarrollada es la definición de un esquema tipo de la estación de bombeo que se está proyectando. La idea es definir una EB paramétrica en la que a partir del modelo de bomba queden definidos el resto de parámetros del proyecto.

El esquema (ver Figura 17) representa la cantidad de bombas que componen la EB trabajando en paralelo. El sistema dispone de dos válvulas de seccionamiento principales a la entrada y salida de la EB. Asimismo, cada bomba dispone de sendas válvulas de seccionamiento y una válvula de retención. Las dimensiones L1, L2 y L3 se parametrizan en función de las características de la EB, siendo el diámetro de la tubería el factor determinante, de forma que una vez seleccionado el modelo de bomba quedan determinadas distancias como la separación entre bombas, la longitud de cada línea de bombeo y la distancia de toma y descarga del equipo de bombeo respectivamente.

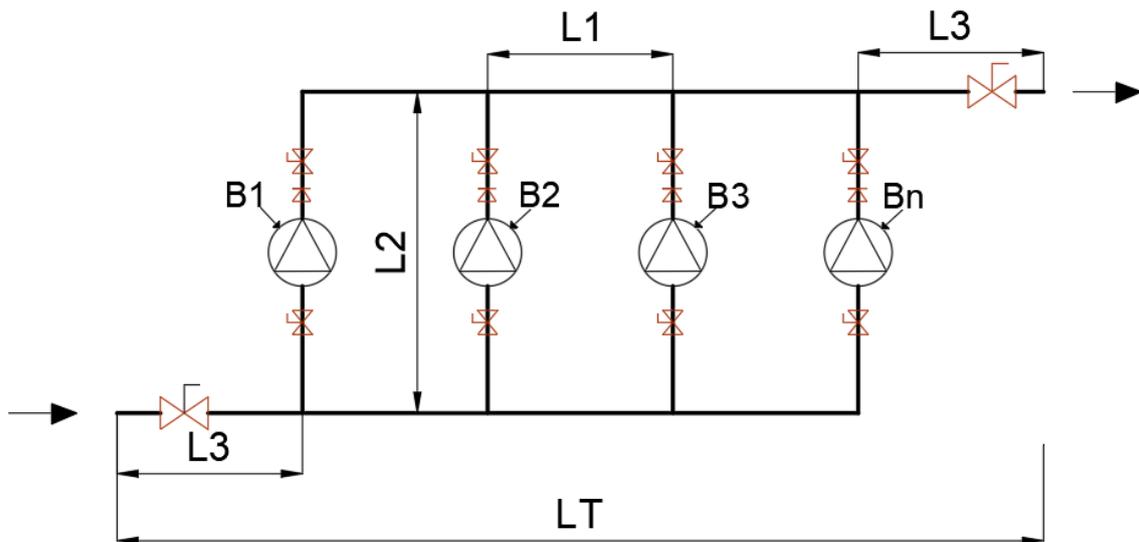


Figura 17. Esquema tipo del equipo de bombeo

Las longitudes L , están en función de unos coeficientes n , que al multiplicarse por el diámetro de la tubería que representa cada uno, da como resultado la longitud 1, 2 o 3. A partir de las siguientes ecuaciones, se definen las longitudes.

$$L1 = n1 * D_{1-3} \quad (5)$$

$$L2 = n2 * D_2 \quad (6)$$

$$L3 = n3 * D_{1-3} \quad (7)$$

$$LT = 2 * L3 + (Bn - 1) * L1 \quad (8)$$

Los diámetros D_{1-3} y D_2 están en función del caudal que transporta cada uno. Mientras D_{1-3} está diseñado para el caudal máximo de suministro de la estación de bombeo, D_2 está diseñado para el caudal máximo que suministre una bomba.

$$D = \sqrt[2]{\frac{4 * Q}{\pi * V}} \quad (9)$$

Donde D es el diámetro; Q el caudal y V la velocidad de diseño. Es importante fijar una velocidad de diseño antes de pre dimensionar la estación de bombeo, con esto se tendrán todos los datos necesarios para el cálculo del diámetro.

Resulta fundamental plantear el esquema tipo desde la fase inicial. Con este se puede determinar los costos de los accesorios más importantes de la EB, ya sean válvulas, tubería, codos, tees, entre otros. Es necesario precisar que el costo de inversión de todos los accesorios tenidos en cuenta en la EB depende del número de bombas, la velocidad máxima de diseño y el caudal máximo demandado por de la red.

4.1.5. Tarifas eléctricas

Para poder calcular el costo de operación es necesario obtener la potencia consumida por el equipo de bombeo (hallada previamente por la curva de modulación y características de la bomba) y la tarifa eléctrica para esa hora definida. El producto de estas dos variables da como resultado el costo de operación. Las tarifas eléctricas contemplan una discriminación horaria variable a lo largo del día, de forma que las tarifas puedan cambiar. No obstante, para el análisis realizado se tendrá en cuenta únicamente el coste de la energía y no el coste asociado a la potencia contratada.

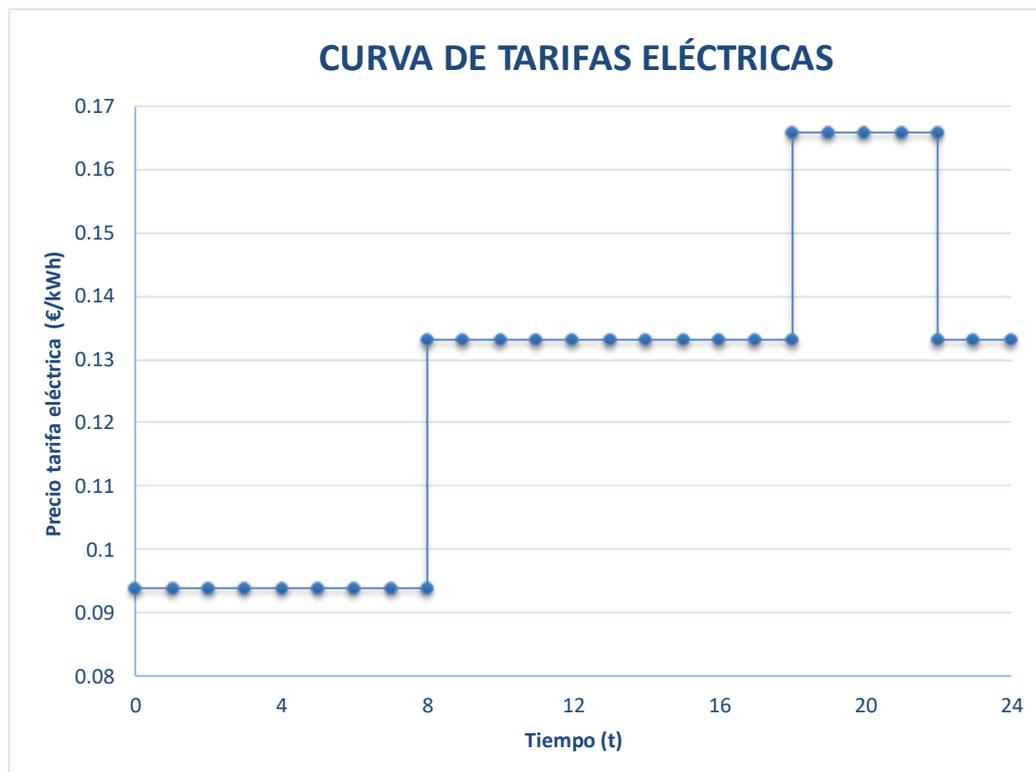


Figura 18. Ejemplo tarifa eléctrica - Endesa

En la Figura 18 se muestra un ejemplo de la tarifa eléctrica con una discriminación horaria, tomada de la página web de Endesa. Así como la curva de modulación, las tarifas eléctricas también cuentan con una distribución de hora punta, llano y valle a lo largo del día. En este ejemplo, la hora punta se presenta durante la franja horaria en la que hay menos luz solar, teniendo su hora pico entre las 18:00 - 22:00 y su hora valle entre las 00:00 – 08:00.

Las tarifas eléctricas resultan ser una parte esencial de este trabajo, porque es gracias a estas que se puede calcular como resultado final el costo de operación. Sin embargo, es preciso aclarar que el cálculo que se realiza tendrá un periodo de duración de 24 horas. En consecuencia, las tarifas que se necesitan para realizar los distintos cálculos serán horarias con una duración de un día. Cabe resaltar que hay lugares donde la tarifa

eléctrica es constante durante todo el día, simplificando así el cálculo del costo de suministro de energía

4.2. Selección de modelos de bombas viables

Los distintos modelos de bombas que puedan satisfacer las necesidades hidráulicas de la red, son seleccionados con un criterio de altura piezométrica, donde todo modelo que pueda garantizar la presión máxima de la red, será seleccionado como posible solución. La presión máxima ($H(Q_{max})$) se calcula gracias a la curva de consigna y el caudal máximo de la curva de demanda (Q_{max}). Luego de determinar cada uno de los modelos, se calcula el número de bombas que funcionan en paralelo. El cálculo del número de bombas se hace partiendo del Q_{max} y el caudal máximo de suministro del modelo de bomba ($Q(H_{max})$). Tal y como se muestra en la ecuación.

$$Nb = \frac{Q_{max}}{Q_{Hmax}} \quad (10)$$

Donde, Nb es el número de bombas aproximado al número siguiente; Q_{max} es el caudal máximo de demanda; $Q(H_{max})$ es el caudal máximo de suministro de la bomba para una altura piezométrica máxima de la red (H_{max}). Cabe resaltar, para este trabajo se tendrá un límite de número de bombas el cual será uno no mayor a nueve, con el fin de poder obtener soluciones viables. Entre mayor sea la diferencia de H_{max} y la altura máxima de la bomba (H_o) y más plana sea la curva motriz, mayor capacidad tendrá la bomba, por lo que menor será el número de bombas que necesite la estación y viceversa. La selección de los modelos de bombas capaces de suministrar las condiciones hidráulicas que requiere la red, se ve representado en el diagrama de flujo de la Figura 19.

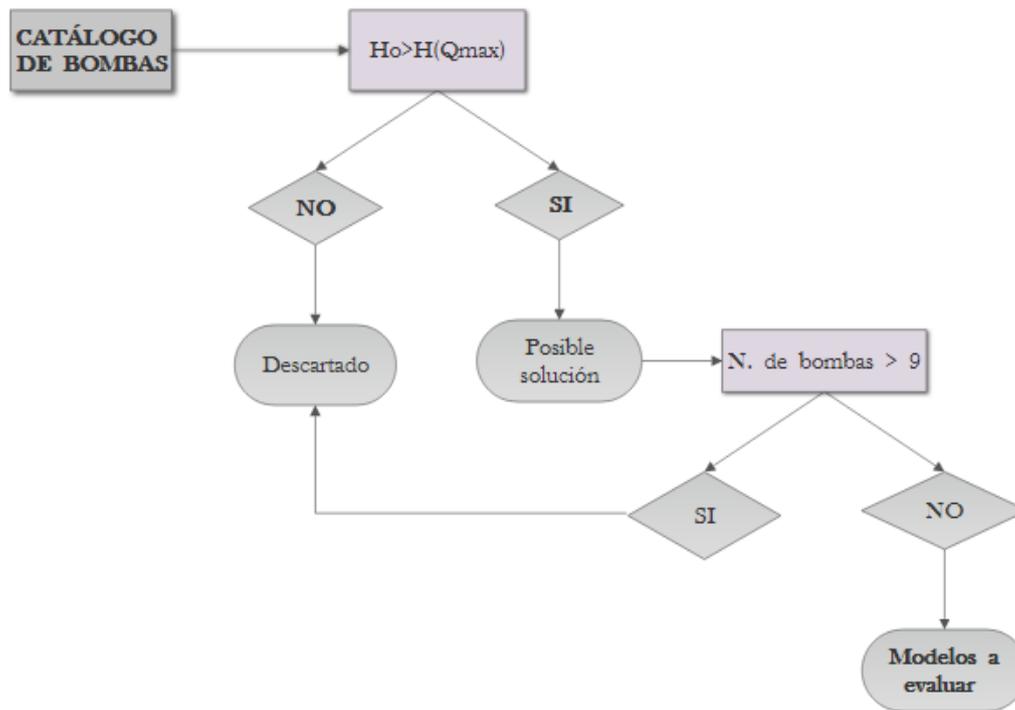


Figura 19. Diagrama de flujo selección de bombas

Del catálogo de bombas se extrae la altura piezométrica máxima proporcionada por cada modelo de bombas. Si esta altura es mayor a la máxima demandada por la red, el modelo es una posible solución. Si esta posible solución, al calcular el número de bombas da como resultado más de 9 unidades, queda descartada junto con los otros modelos que no proporcionaban la altura máxima demandada.

4.3. Métodos de regulación aplicados

Los métodos de regulación que serán empleados en la presente metodología se explican a detalle en el CAPÍTULO III. En este se identificarán los tipos de regulación, elementos de medición o control y especificaciones de regulación especiales para cada caso.

4.4. Costos

La base metodológica del método propuesto se basa en la estimación de costes. Esta estimación de costes es posiblemente una de las partes fundamentales del trabajo presentado. De hecho, la adopción de un valor u otros es determinante al momento de descartar una posible solución frente a otra.

Los costos tenidos en cuenta para poder determinar las distintas soluciones optimas según esta metodología, son: los costos de inversión y el costo de operación. Ambos costos están descritos en los siguientes apartados.

4.4.1. Costo de operación

El costo de operación, necesario para calcular las opciones óptimas de regulación y equipos de bombeo. Comprende una sola variable, resultante del costo de la energía consumida por el equipo de bombeo durante un tiempo determinado. Para esta metodología el tiempo de duración para calcular el costo total de operación es de 24 horas (1 día). Las variables que logran determinar el costo de operación son: la energía consumida por la estación de bombeo y el costo de la energía. Las operaciones necesarias para calcular la potencia, están definidas por las ecuaciones (11) y (12).

$$\eta = E \frac{Q}{\alpha} - F \left(\frac{Q}{\alpha} \right)^2 \quad (11)$$

Donde η es un número adimensional que representa el rendimiento de la estación de bombeo; E y F son constantes que definen la ecuación característica de rendimiento para cada modelo de bomba; α es la velocidad de giro.

Hallada la eficiencia y teniendo las características hidráulicas de altura y caudal, es posible hallar la potencia mediante la ecuación (12).

$$P = \frac{\gamma Q H}{\eta} \quad (12)$$

Donde P es la potencia consumida por la EB en Kw; γ el peso específico del agua (9.81 kN/m³); η el rendimiento de las bombas hallado en la ecuación (11).

El costo de operación para una duración de 24 horas se calcula como resultado del producto de la energía consumida (potencia por tiempo de trabajo kWh) y el costo de la energía proporcionada por la empresa en una fracción e tiempo (€/kWh). Dando como resultado el costo energético de la EB durante un día (ver ecuación (13)).

$$\sum_{t=1}^{24} E(kWh) * C(€/kWh) \quad (13)$$

Para poder hallar la energía consumida de cada uno de los modelos de bombas con los distintos métodos de regulación de forma más automatizada, es necesario desarrollar un algoritmo capaz de calcular el costo de operación de cada una de las posibles soluciones.

4.4.2. Costos de inversión

El costo de inversión representa un conglomerado de los costos más relevantes, necesarios para poner en marcha una estación de bombeo. Dentro de los distintos

costos a evaluar, se tienen en cuenta los de equipos y accesorios y se descarta cualquier costo de obra necesario.

Con el objetivo de estimar los costos de inversión se toman los precios del mercado de cada una de las variables que lo componen. Con estos valores por medio de una regresión se calculan las funciones de costos capaces de representar de forma más aproximada los valores reales (Marchionni, Cabral, Amado, & Covas, 2016).

La variable que determina que función de coste puede representar las variables que componen el costo de inversión, es el coeficiente de determinación (R^2). Entre más cercano sea el coeficiente de determinación a 1, más se aproxima el costo de la ecuación de regresión al costo real (Walski & Creaco, 2016).

Dados los distintos costos de inversión, es necesario poder determinar de forma más aproximada el valor real de los elementos más importantes que componen un sistema de bombeo. Los costos contemplados en el presente trabajo corresponden a los siguientes elementos:

- Equipo de bombeo. Este coste se obtiene directamente de la base de datos inicial de todos los modelos de bombas contemplados y representa el coste de adquisición de la bomba. El costo de los equipos de bombeos va en función del rendimiento máximo que pueda dar cada uno. Entre mayor sea el rendimiento, más costoso será el equipo.
- Válvulas de seccionamiento y retención. Este coste se obtiene a partir del diseño parametrizado de la estación de bombeo definido en el apartado 4.1.4. Una vez definido el número de bombas y las diferentes dimensiones de las variables que compone la estación de bombeo, queda definido el número de válvulas necesarias y el diámetro de estas. Con la ayuda de las ecuaciones de costos, se calcula el precio aproximado del total de las válvulas teniendo como única variable definida el diámetro.
- Tuberías y accesorios (codos, tes, ...). Otra consecuencia del diseño parametrizado de la estación de bombeo tipo, son las conducciones y accesorios necesarios para un correcto funcionamiento. El costo de este rubro se hace más importante dentro del total de costos, dependiendo del material que se vaya a usar en la instalación. El costo total es estimado mediante el uso de funciones de costo, teniendo como única variable el diámetro de cada uno de los elementos.

Los costes de inversión anteriores quedan completamente definidos una vez seleccionado el modelo y número de bombas. Sin embargo, hay una serie de costes de inversión que están asociados al modo de regulación y tipo de medición seleccionado para la estación de bombeo. Estos costes de inversión corresponden a los siguientes elementos:

- Variadores de velocidad. Son necesarios únicamente en el caso de que se desee emplear bombas de velocidad variable. Es decir, de los siete modos de regulación tenidos en cuenta a calcular, está presente en cuatro de ellos. El costo de los variadores de velocidad queda en función de la potencia del motor eléctrico de la bomba en el que esté instalado.
- Presostatos, transductores de presión y caudalímetros. Necesarios dependiendo del tipo de magnitud que es necesario medir durante el modo de regulación. Para el control manométrico (presostato y transductor de presión) se busca el costo único de un elemento capaz de ser lo suficientemente flexible como para abarcar gran parte de las condiciones hidráulicas tanto de la red como de las bombas. En el control caudalimétrico (caudalímetro), se busca una función de costo que represente de forma acertada el valor real en función del diámetro de la tubería.
- Equipo de regulación. Existen modos de regulación simples que no requieren apenas coste. Tal es el caso de la regulación de bombas de velocidad fija que arrancan y paran mediante presostatos. Por el contrario, otros modos de regulación con bombas de velocidad variables y medición de caudal, requieren de la instalación de algún tipo de elemento de regulación (sistema SCADA, PLC, ...).

La valoración de los costos de inversión, se calcula mediante el uso de curvas de coste. Esta metodología es empleada con el objetivo de facilitar el cálculo del valor aproximado de algunos elementos, de los cuales no se tenía información de su valor real como lo son los codos, los variadores de frecuencia, entre otros. Poder aplicar las curvas de costo a los elementos, facilita el proceso de cálculo de los costos totales de inversión inicial de cualquier estación de bombeo y el análisis de viabilidad económica del mismo.

4.5. Cálculo y análisis de soluciones óptimas

Gracias al algoritmo desarrollado, una vez obtenidos los costos de inversión y operación, resulta necesario analizar de todas las distintas soluciones posibles y definir cuáles de ellas resultan ser las más óptimas. Lo descrito se puede realizar utilizando un concepto llamado frontera de Pareto.

La frontera de Pareto está conformada por óptimos de Pareto, quienes representan las soluciones no dominadas (dominadoras), descartando así las soluciones dominadas. Para poder representar de forma más explícita el concepto de frontera de Pareto ver la Figura 20.

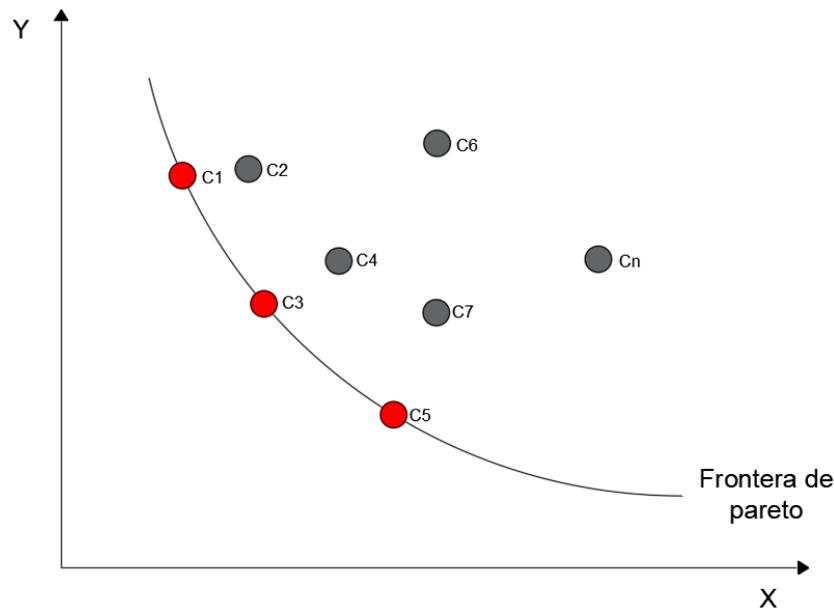


Figura 20. Representación frontera de Pareto

Una vez se tienen los datos de los costos de inversión versus los costos de operación representados gráficamente, mediante el uso de una ecuación de selección objetiva, se determinan los óptimos de Pareto, donde los datos representados en la Figura 20: C1, C3 y C5 conformarían la frontera de Pareto, pues ninguno de los otros datos resulta siendo una solución dominadora (Pareto, 1906).

Para poder calcular la frontera con los óptimos de Pareto, se organizan numéricamente los datos sobre una de las coordenadas, ya sea Y (costo de inversión) o X (costo de operación). Luego se seleccionan los datos de forma tal que aumenten en una sola dirección. Si llegase a aumentar en las dos coordenadas pasara a ser una solución dominada, por lo que sería descartada por una solución dominadora. Así hasta filtrar todos los datos que se tengan. En la Figura 20 se ve como C1 descarta a los datos C2 y C6, C3 descarta a C4 y por último C5 descarta a C7. Al final se quedará con los puntos rojos, que juntos representa la frontera de Pareto.

La selección de la solución óptima global de la frontera de Pareto, se realiza con base en la amortización realizada a cada proyecto. Esta amortización depende de factores como (Bezerra, Silva, Gomes, & Salvino, 2014):

- Vida útil del proyecto
- Periodo de amortización
- Tasa de interés
- Presupuesto de inversión y operación por parte del abastecimiento
- Tiempo de retorno del capital



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

Teniendo en cuenta que estos factores son únicos para cada proyecto y dependerán no solo del diseñador, sino también del inversionista. Identificar el óptimo global no se encuentra dentro del presente documento.

Se realiza un análisis de cuales de los óptimos de Pareto pueden ser prescindidos. Donde los extremos que muestran tanto el mayor costo de inversión como el de operación, se recomienda descartarlos. Reduciendo aún más las posibles soluciones.

CAPÍTULO V. CASO DE ESTUDIO

Para aplicar la metodología descrita en el CAPÍTULO IV, se buscó una red que contara con una característica fundamental y es la inyección directa a red por medio de una estación de bombeo. Además de esto, era importante contrastar la metodología con el cálculo en diferentes puntos de abastecimiento. Esto con el fin de obtener distintas soluciones a cada uno de los puntos de suministro y así poder sacar resultados concluyentes entre ellos.

La red de abastecimiento seleccionada como caso de estudio es la red TF. La cual pertenece a una ciudad española que abastece a un total de 30.000 habitantes, desde 4 puntos de suministro.

Todos los datos relevantes de la red, necesarios para poder desarrollar los cálculos del presente capítulo, son tomados del siguiente trabajo doctoral (León-Celi et al., 2016).

En los siguientes apartados se mostrará la aplicación a la red TF de la metodología expuesta en el capítulo III. Mostrando las distintas soluciones óptimas del diseño de la estación de bombeo y su correspondiente modo de regulación para cada uno de los cuatro puntos de suministro.

5.1. Caracterización de la red TF

Los cuatros puntos de suministro, realizado mediante una estación de bombeo, correspondiente a la red TF son: PS1, PS2, PS3 Y PS4 (ver Figura 21). Cada uno de estos puntos tiene una distribución del caudal total de la red que va variando a lo largo del día, de forma tal que haya un abastecimiento total, por tanto, garantizando el cumplimiento de las características mínimas hidráulicas demandadas por la red. Entre ellas una presión mínima requerida de 45m.

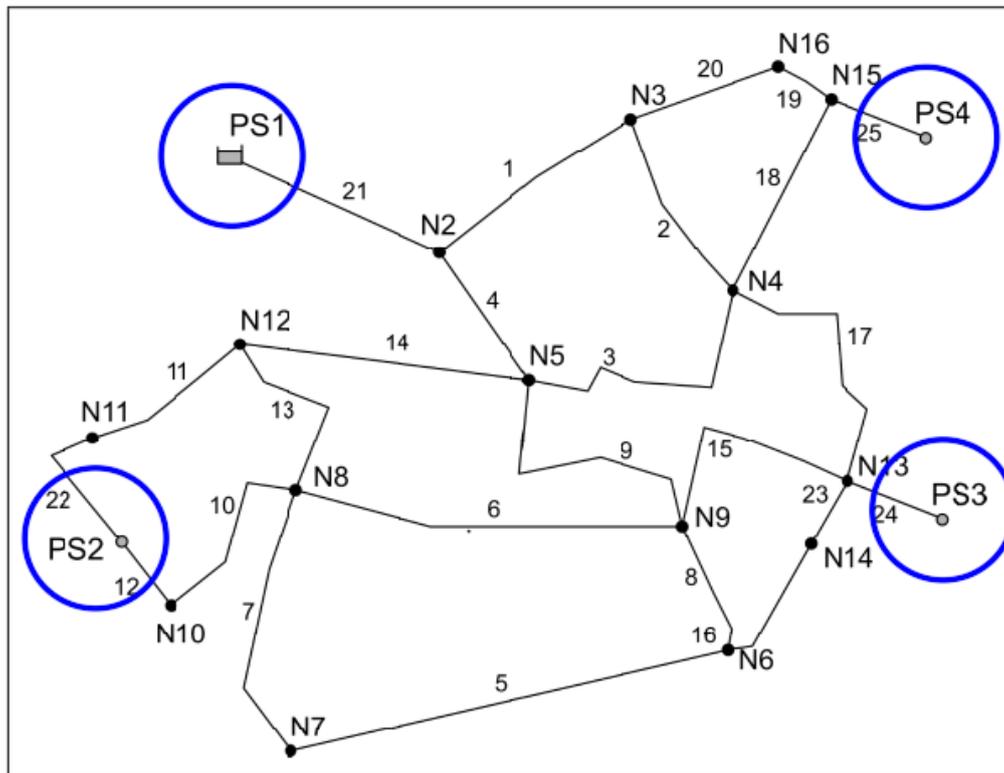


Figura 21. Red TF

La red TF de característica mallada, cuenta en total con 18 nudos y 24 tuberías. El caudal medio de la red es de aproximadamente 103 l/s.

5.2. Hipótesis de partida

Ahora se empiezan a definir cada una de las hipótesis de partida descritas en el capítulo 2. Cada una de las hipótesis son necesarias para poder llegar al cálculo final de la frontera de Pareto.

5.2.1 Curva de consigna

Las curvas de consigna que representan cada uno de los puntos de suministro de la red, son las siguientes:

Tabla 1. Curvas de consigna

	Curvas de consigna			
Punto	PS1	PS2	PS3	PS4
DH	31.55	17.95	25.64	28.18
R	0.0111	0.0232	0.0332	0.0405

$$H = DH + RQ^2$$

Como se puede observar en la Tabla 1 y recordando la ecuación (4). Las curvas de consigna distan bastante una de la otra, esto se debe a las diferencias entre las características hidráulicas de cada uno de los nodos que debe abastecer los distintos puntos de suministro. Las curvas de consigna acá mencionadas fueron halladas gracias a la metodología usada en el trabajo doctoral de León Celi.

5.2.2 Curva de modulación (Red TF)

La curva de modulación de cada fuente de suministro se calculó de las curvas de inyección. Las curvas de inyección son producto del proceso de optimización realizado en el trabajo doctoral de León Celi (ver Tabla 2).

Tabla 2. Distribución de la demanda

T (h)	Caudal de cada fuente (l/s)				Q Total (l/s)
	PS1	PS2	PS3	PS4	
0	15.10	11.78	6.32	6.80	40.00
1	15.10	11.78	6.32	6.80	40.00
2	15.10	11.78	6.32	6.80	40.00
3	15.10	11.78	6.32	6.80	40.00
4	15.10	11.78	6.32	6.80	40.00
5	23.56	19.53	15.33	11.59	70.00
6	23.56	19.53	15.33	11.59	70.00
7	60.18	43.86	37.49	28.48	170.00
8	42.00	31.50	26.46	20.04	120.00
9	23.56	19.53	15.33	11.59	70.00
10	23.56	19.53	15.33	11.59	70.00
11	60.18	43.86	37.49	28.48	170.00
12	71.00	51.40	44.10	33.50	200.00
13	71.00	51.40	44.10	33.50	200.00
14	60.18	43.86	37.49	28.48	170.00
15	34.70	26.65	22.00	16.65	100.00
16	27.36	21.88	17.56	13.20	80.00
17	38.39	29.10	24.20	18.32	110.00
18	38.39	29.10	24.20	18.32	110.00
19	38.39	29.10	24.20	18.32	110.00
20	52.95	38.93	33.08	25.05	150.00
21	52.95	38.93	33.08	25.05	150.00
22	38.39	29.10	24.20	18.32	110.00
23	15.10	11.78	6.32	6.80	40.00

La importancia de las fuentes de suministro va en forma ascendente teniendo a PS1 con un caudal medio de 36.29 l/s, PS2 27.39 l/s, PS3 22.04 l/s y PS4 17.20 l/s. Con los datos de los caudales medios de cada fuente, se calcula la curva de modulación dividiendo el caudal suministrado en cada instante de tiempo sobre el caudal medio. Dando como resultado la Tabla 3.

Tabla 3. Datos de la modulación

Curva de modulación				
T (h)	PS1	PS2	PS3	PS4
0	0.42	0.43	0.29	0.40
1	0.42	0.43	0.29	0.40
2	0.42	0.43	0.29	0.40
3	0.42	0.43	0.29	0.40
4	0.42	0.43	0.29	0.40
5	0.65	0.71	0.70	0.67
6	0.65	0.71	0.70	0.67
7	1.66	1.60	1.70	1.66
8	1.16	1.15	1.20	1.17
9	0.65	0.71	0.70	0.67
10	0.65	0.71	0.70	0.67
11	1.66	1.60	1.70	1.66
12	1.96	1.88	2.00	1.95
13	1.96	1.88	2.00	1.95
14	1.66	1.60	1.70	1.66
15	0.96	0.97	1.00	0.97
16	0.75	0.80	0.80	0.77
17	1.06	1.06	1.10	1.06
18	1.06	1.06	1.10	1.06
19	1.06	1.06	1.10	1.06
20	1.46	1.42	1.50	1.46
21	1.46	1.42	1.50	1.46
22	1.06	1.06	1.10	1.06
23	0.42	0.43	0.29	0.40

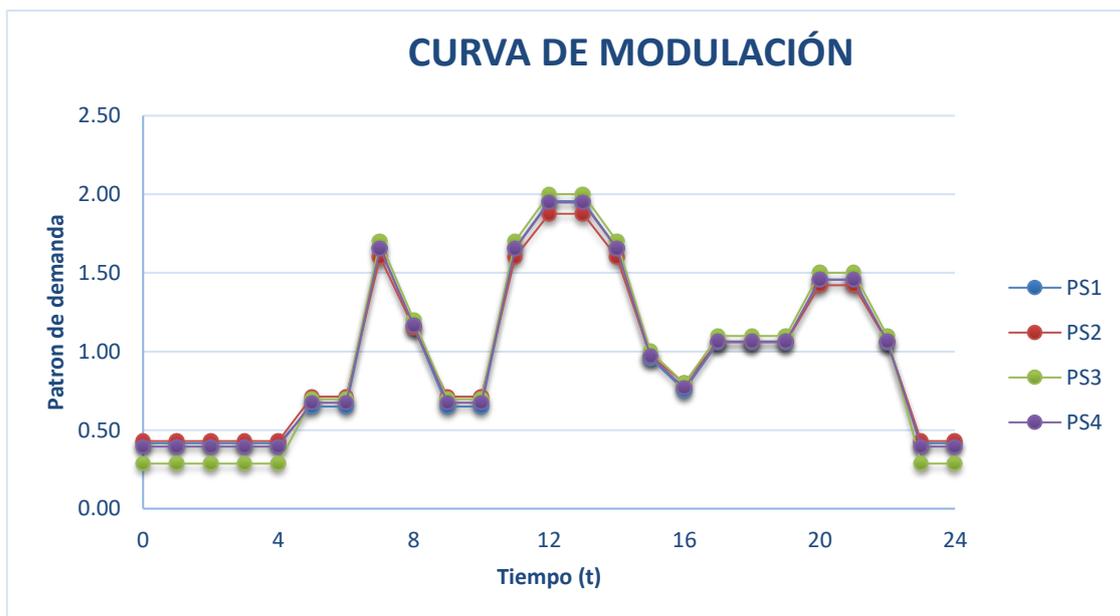


Figura 22. Curva de modulación

De los datos de la Tabla 3, se desprenden las curvas de modulación de los distintos puntos de suministro, presentadas en la Figura 22. Curva de modulación

En la Figura 22 se observa que el comportamiento de la curva de modulación de cada punto de suministro es idéntico a lo largo del día. También se observa que durante el día hay tres horas pico, una a las 7:00, la mayor en una franja del medio día y por último a las 20:00.

5.2.3 Base de datos de modelos de bombas

Las bombas seleccionadas para poder desarrollar este trabajo son de un catálogo comercial de un fabricante de bombas normalizadas. El catálogo tiene un total de 67 distintos modelos de bombas, las cuales tienen una capacidad de suministro entre 19.63 l/s hasta 50.74 l/s y una altura piezométrica máxima de 105m. En el anexo se encuentra el catálogo de bombas usado junto con sus características hidráulicas.

Las características necesarias para poder desarrollar los cálculos hidráulicos son:

- Curva motriz. se determina si el modelo de bomba puede dar la altura máxima demandada por la red y así calcular el número de bombas. Así mismo, también sirve para poder determinar los rangos de trabajo de cada una de las bombas en los distintos tipos de regulación que se tienen presentes.
- Curvas de rendimiento. Son necesarias para calcular de forma más exacta la potencia consumida para un instante de tiempo.
- Potencia de trabajo del motor eléctrico. Es necesario saberla, porque de este valor depende una variable de las curvas de costo como lo es el costo de los variadores de velocidad.

5.2.4 Tarifas eléctricas

Las tarifas eléctricas que están presentes en la región donde se ubica el caso de estudio, son determinadas por la empresa suministradora de energía llamada ENDESA. De los 4 puntos de suministro, solo dos de ellos tienen la misma tarifa, los dos restantes tienen una tarifa diferenciada.

Las tarifas de los puntos de suministro PS1, PS2, PS3 y PS4 son presentadas en las siguientes tablas:

Tabla 4. Tarifas eléctricas ENDESA

Tarifa eléctrica de cada fuente (€/kWh)				
T (h)	PS1	PS2	PS3	PS4
0	0.094	0.092	0.09	0.09
1	0.094	0.092	0.09	0.09
2	0.094	0.092	0.09	0.09
3	0.094	0.092	0.09	0.09
4	0.094	0.092	0.09	0.09

Tabla 5. Tarifas eléctricas ENDESA - Continuación

Tarifa eléctrica de cada fuente (€/kWh)				
T (h)	PS1	PS2	PS3	PS4
5	0.094	0.092	0.09	0.09
6	0.094	0.092	0.09	0.09
7	0.094	0.092	0.09	0.09
8	0.133	0.131	0.129	0.129
9	0.133	0.131	0.129	0.129
10	0.133	0.131	0.129	0.129
11	0.133	0.131	0.129	0.129
12	0.133	0.131	0.129	0.129
13	0.133	0.131	0.129	0.129
14	0.133	0.131	0.129	0.129
15	0.133	0.131	0.129	0.129
16	0.133	0.131	0.129	0.129
17	0.133	0.131	0.129	0.129
18	0.166	0.164	0.162	0.162
19	0.166	0.164	0.162	0.162
20	0.166	0.164	0.162	0.162
21	0.166	0.164	0.162	0.162
22	0.133	0.131	0.129	0.129
23	0.133	0.131	0.129	0.129

Aunque los precios de la energía no son los mismo para todos los puntos de suministro, la disposición del aumento y disminución del precio a lo largo del día tiene el mismo comportamiento. Contando durante las 24 horas del día 4 variaciones, teniendo como mayor costo en la franja horaria que se comprende entre las 18:00-22:00 y menor costo entre las 00:00-08:00.

La grafica que representa el comportamiento de los datos expuestos en la Tabla 4 y Tabla 5, es presentada en la Figura 23.

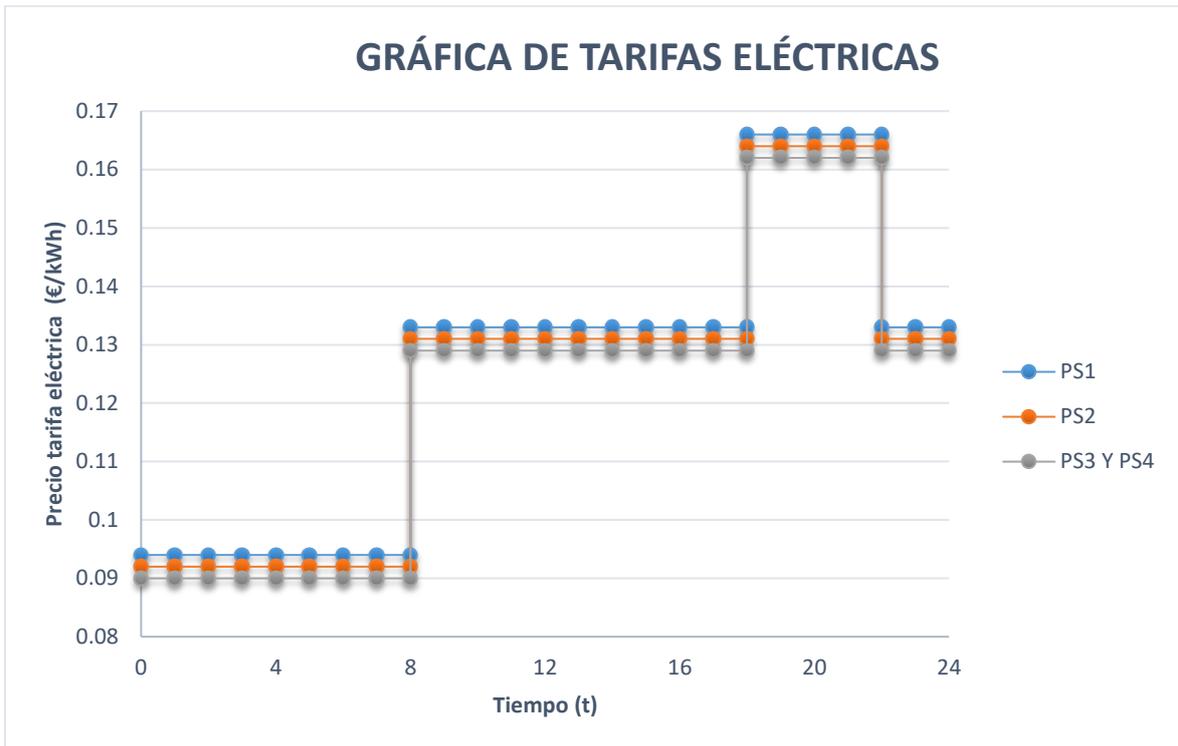


Figura 23. Gráfica tarifas eléctricas

Los costos de la tarifa de acceso a la energía, más los impuestos, no son contemplados en el estudio de los costos operacionales.

5.3. Cálculo de modelos de bombas viables

Con la curva de consigna y la curva de modulación, es posible determinar cuál es la altura piezométrica máxima demandada por la red. Con este valor es posible calcular que modelos de bombas pueden suministrar esa altura, como también el número de bombas necesarias.

Retomando los datos de las curvas de consigna de la Tabla 1 y los caudales máximos de cada una de las fuentes de la Tabla 2, se llegan a los siguientes resultados:

Tabla 6. Altura piezométrica máxima

H (Qmax)			
PS1	PS2	PS3	PS4
87.52 m	79.26 m	90.29 m	73.68 m

Ahora con las alturas máximas de la Tabla 6, se determinan los modelos y el número de bombas necesaria para cumplir con los requerimientos de la red:

Tabla 7. Definición de parámetros

Modelo	Hace referencia al modelo de bomba
P (kW)	Potencia del motor eléctrico de la bomba
Rmax	Rendimiento máximo
H0 (m)	Altura piezométrica máxima
Qmax (l/s)	Caudal máximo
Qopt (l/s)	Caudal óptimo. Máximo rendimiento
Hopt (m)	Altura óptima. Máximo rendimiento
Q (Hmax)	Caudal para la altura piezométrica máxima
Nº Bombas	Numero de bombas que componen la estación de bombeo

Tabla 8. Modelos de bombas posibles para PS1

PS1									
	Modelo	P (kW)	Rmáx	H0 (m)	Qmax (l/s)	Qopt (l/s)	Hopt (m)	Q (Hmax)	Nº Bombas
10	GNI 32-26/20	15.00	0.43	92.35	19.29	9.65	69.26	4.41	17
11	GNI 32-26/25	18.50	0.45	102.75	21.18	10.59	77.06	8.15	9
21	GNI 40-26/30	22.00	0.55	100.47	30.18	15.09	75.35	10.84	7
33	GNI 50-26/40	30.00	0.63	104.98	48.63	24.32	78.73	19.84	4
44	GNI 65-26/60	45.00	0.75	93.45	17.41	8.71	70.09	4.39	17
45	GNI 65-26/75	55.00	0.77	104.25	18.11	9.06	78.19	7.26	10
56	GNI 80-26/100	75.00	0.80	100.97	26.83	13.41	75.73	9.79	8

Tabla 9. Modelos de bombas posibles para PS2

PS2									
	Modelo	P (kW)	Rmáx	H0 (m)	Qmax (l/s)	Qopt (l/s)	Hopt (m)	Q (Hmax)	Nº Bombas
10	GNI 32-26/20	15.00	0.43	92.35	19.29	9.65	69.26	7.26	8
11	GNI 32-26/25	18.50	0.45	102.75	21.18	10.59	77.06	10.13	6
21	GNI 40-26/30	22.00	0.55	100.47	30.18	15.09	75.35	13.87	4
32	GNI 50-26/30	22.00	0.61	81.41	45.42	22.71	61.06	7.38	7
33	GNI 50-26/40	30.00	0.63	104.98	48.63	24.32	78.73	24.07	3
43	GNI 65-26/50	37.00	0.73	82.74	16.16	8.08	62.06	3.31	16
44	GNI 65-26/60	45.00	0.75	93.45	17.41	8.71	70.09	6.79	8
45	GNI 65-26/75	55.00	0.77	104.25	18.11	9.06	78.19	8.87	6
55	GNI 80-26/75	55.00	0.82	86.11	24.78	12.39	64.58	6.99	8
56	GNI 80-26/100	75.00	0.80	100.97	26.83	13.41	75.73	12.44	5
64	GNI 100-26/100	75.00	0.83	82.03	33.94	16.97	61.52	6.23	9

Tabla 10. Modelos de bombas posibles para PS3

PS3									
	Modelo	P (kW)	R _{máx}	H ₀ (m)	Q _{max} (l/s)	Q _{opt} (l/s)	H _{opt} (m)	Q (H _{max})	Nº Bombas
10	GNI 32-26/20	15.00	0.43	92.35	19.29	9.65	69.26	2.88	16
11	GNI 32-26/25	18.50	0.45	102.75	21.18	10.59	77.06	7.38	6
21	GNI 40-26/30	22.00	0.55	100.47	30.18	15.09	75.35	9.61	5
33	GNI 50-26/40	30.00	0.63	104.98	48.63	24.32	78.73	18.19	3
44	GNI 65-26/60	45.00	0.75	93.45	17.41	8.71	70.09	3.20	14
45	GNI 65-26/75	55.00	0.77	104.25	18.11	9.06	78.19	6.63	7
56	GNI 80-26/100	75.00	0.80	100.97	26.83	13.41	75.73	8.73	6

Tabla 11. Modelos de bombas posibles para PS4

PS4									
	Modelo	P (kW)	R _{máx}	H ₀ (m)	Q _{max} (l/s)	Q _{opt} (l/s)	H _{opt} (m)	Q (H _{max})	Nº Bombas
10	GNI 32-26/20	15.00	0.43	92.35	19.29	9.65	69.26	8.68	4
11	GNI 32-26/25	18.50	0.45	102.75	21.18	10.59	77.06	11.27	3
20	GNI 40-26/20	15.00	0.53	75.21	25.40	12.70	56.41	3.63	10
21	GNI 40-26/30	22.00	0.55	100.47	30.18	15.09	75.35	15.59	3
32	GNI 50-26/30	22.00	0.61	81.41	45.42	22.71	61.06	14.00	3
33	GNI 50-26/40	30.00	0.63	104.98	48.63	24.32	78.73	26.56	2
43	GNI 65-26/50	37.00	0.73	82.74	16.16	8.08	62.06	5.35	7
44	GNI 65-26/60	45.00	0.75	93.45	17.41	8.71	70.09	8.01	5
45	GNI 65-26/75	55.00	0.77	104.25	18.11	9.06	78.19	9.81	4
55	GNI 80-26/75	55.00	0.82	86.11	24.78	12.39	64.58	9.42	4
56	GNI 80-26/100	75.00	0.80	100.97	26.83	13.41	75.73	13.95	3
64	GNI 100-26/100	75.00	0.83	82.03	33.94	16.97	61.52	10.83	4

En las Tabla 8, Tabla 9,

Tabla 10 y Tabla 11 se muestran los distintos modelos de bombas que funcionan para cada punto de abastecimiento, junto con sus principales características hidráulicas. Cabe resaltar que se tiene como planteamiento que dado el caso en que una solución de como resultado el uso de 10 o más unidades de bombeo, quedara descartado por considerarlo inviable. Esta característica se encuentra en varios modelos para cada uno de los puntos de suministro.

Es de esperar que entre menor sean los requerimientos hidráulicos, mayor será el número de modelos de bombas que cumplan con ellos. Se puede ver que mientras la altura máxima de PS3 es igual a 90.29 m, tienen como solución 7 modelos distintos, mientras que el punto de suministro PS4 con una altura de 63.68 m, cuenta con 12.

5.4. Cálculo costo de operación

Con los modelos de bombas definidos, las curvas de modulación y curvas de consigna, es posible determinar el costo de operación de cada una de las estaciones de bombeo tipo, para cada uno de los modos de regulación que se plantearon en la metodología.

Ahora se escogerá un modelo que pueda satisfacer los 4 puntos de suministro para mostrar como fue el procedimiento de la obtención del costo de operación para cada uno de los distintos modos de regulación. El modelo seleccionado y la red de ejemplo son el 33 y PS1 respectivamente.

El modelo 33 cumple en todos los casos con el máximo número de bombas que es 9, en este caso particular el sistema de bombeo está compuesto por 4 bombas asociadas en paralelo (para ver más características del modelo ver Tabla 8).

Para todos los sistemas de regulación se tendrá la misma grafica de las curvas motrices, haciendo uso de la ecuación (1), de igual forma para la red PS1 se tiene la misma curva de consigna. Las curvas motrices y curva de consigna se presentan a continuación:

Tabla 12. Curva de consigna y motrices PS1 M33

CURVA DE CONSIGNA Y CURVAS MOTRICES					
Q (l/s)	Cc (m)	H1 (m)	H2 (m)	H3 (m)	H4 (m)
0.00	31.55	104.98	104.98	104.98	104.98
7.10	32.11	102.74	104.42	104.73	104.84
14.20	33.78	96.03	102.74	103.98	104.42
21.30	36.58	84.84	99.94	102.74	103.72
28.40	40.50	69.18	96.03	101.00	102.74
35.50	45.54	49.04	91.00	98.76	101.48
42.60	51.69	24.43	84.84	96.03	99.94
49.70	58.97	-	77.57	92.80	98.13
56.80	67.37	-	69.18	89.07	96.03
63.90	76.88	-	59.67	84.84	93.65
71.00	87.52	-	49.04	80.12	91.00

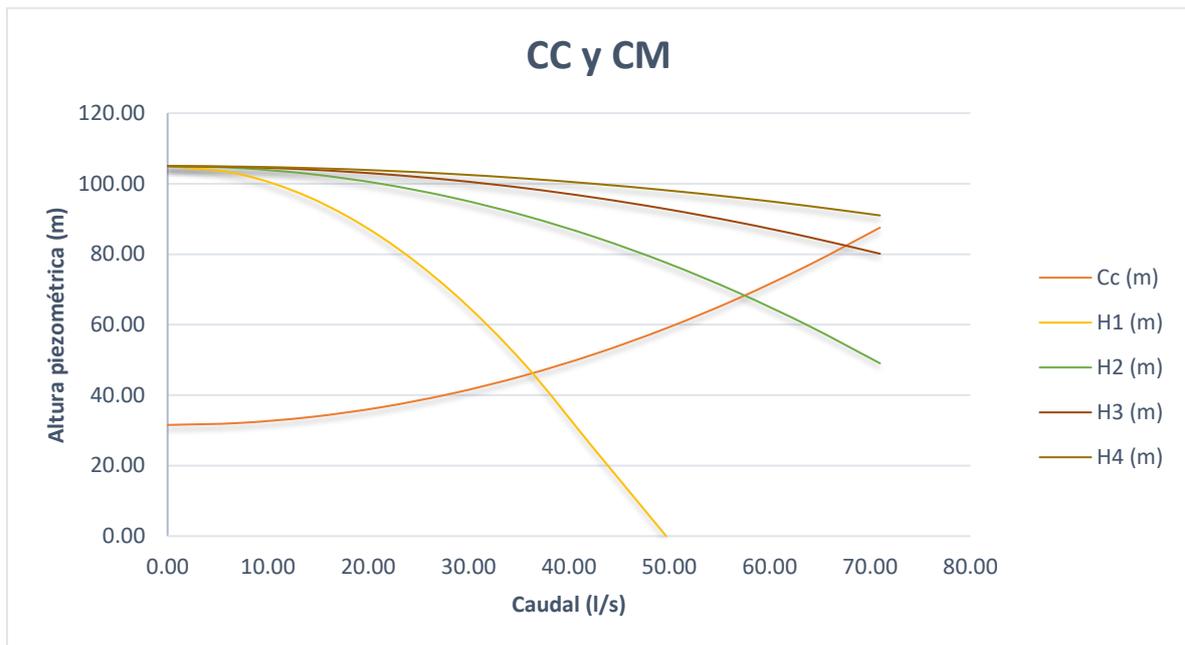


Figura 24. Curva de consigna y curva motriz

En los datos de la Tabla 12, representados en la Figura 24, se observa que la curva motriz resultante del funcionamiento de toda la estación de bombeo, en este caso H4, siempre está por encima de la curva de consigna. Lo que demuestra que la estación de bombeo que está en funcionamiento, puede en todo caso suplir los requerimientos que demande la red.

5.4.1 Costo de operación BVF

Según lo explicado en el apartado 3, todas las bombas están en marcha, por lo tanto, será solo la curva motriz de las 4 bombas la que esté en funcionamiento en todo momento, sin importar el caudal que sea demandado. Es por esto que el sistema de bombeo no contempla ninguna señal de arranque y paro de cada una de las bombas que compongan el equipo de bombeo.

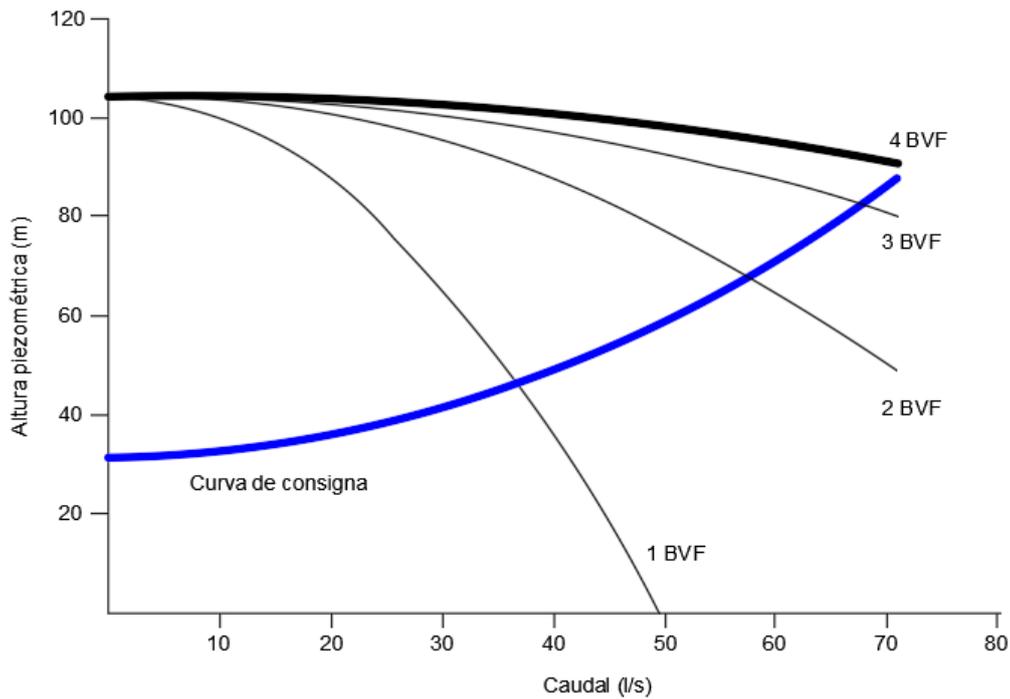


Figura 25. Zona de trabajo BVF

En la Figura 25 se muestra la zona de trabajo del equipo de bombeo para este modo de regulación. Donde la línea negra resaltada, muestra el comportamiento general del equipo de bombeo.

Ahora en la Tabla 13 y Tabla 14 se muestra el resultado de los cálculos necesarios para poder llegar al valor del costo de operación:

Tabla 13. Costo de operación BVF

COSTO DE OPERACIÓN BVF								
t (h)	Cm(t)	Q (t)	Nº B	H (t)	reND	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste (€)
0	0.42	15.10	4	104.35	0.18	85.671	0.094	8.05
1	0.42	15.10	4	104.35	0.18	85.671	0.094	8.05
2	0.42	15.10	4	104.35	0.18	85.671	0.094	8.05
3	0.42	15.10	4	104.35	0.18	85.671	0.094	8.05
4	0.42	15.10	4	104.35	0.18	85.671	0.094	8.05
5	0.65	23.56	4	103.44	0.27	89.126	0.094	8.38
6	0.65	23.56	4	103.44	0.27	89.126	0.094	8.38
7	1.66	60.18	4	94.93	0.54	104.094	0.094	9.78
8	1.16	42.00	4	100.09	0.43	96.664	0.133	12.86
9	0.65	23.56	4	103.44	0.27	89.126	0.133	11.85
10	0.65	23.56	4	103.44	0.27	89.126	0.133	11.85
11	1.66	60.18	4	94.93	0.54	104.094	0.133	13.84
12	1.96	71.00	4	91.00	0.58	108.516	0.133	14.43
13	1.96	71.00	4	91.00	0.58	108.516	0.133	14.43

Tabla 14. Costo de operación BVF – Continuación

COSTO DE OPERACIÓN BVF								
t (h)	Cm(t)	Q (t)	Nº B	H (t)	reND	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste (€)
14	1.66	60.18	4	94.93	0.54	104.094	0.133	13.84
15	0.96	34.70	4	101.64	0.37	93.681	0.133	12.46
16	0.75	27.36	4	102.90	0.30	90.681	0.133	12.06
17	1.06	38.39	4	100.89	0.40	95.189	0.133	12.66
18	1.06	38.39	4	100.89	0.40	95.189	0.166	15.80
19	1.06	38.39	4	100.89	0.40	95.189	0.166	15.80
20	1.46	52.95	4	97.20	0.50	101.139	0.166	16.79
21	1.46	52.95	4	97.20	0.50	101.139	0.166	16.79
22	1.06	38.39	4	100.89	0.40	95.189	0.133	12.66
23	0.42	15.10	4	104.35	0.18	85.671	0.133	11.39
Precio (€/d)							286.34	

Para poder calcular el resultado final es necesario aplicar las ecuaciones (10), (11), (12), (13) y (14). Esto para todas las tablas de los distintos modos de regulación que sea necesario evaluar el costo de operación.

5.4.2 Costo de operación BVF - P

El método de regulación del apartado 3.2 a diferencia del 3, necesita de una regulación que parte del fundamento de estar en funcionamiento el número de bombas necesarios para una determinada presión. Es decir, para este método es necesario determinar las señales de arranque y paro de los grupos de bombeo, según sea la presión que se tenga de consigna.

Para este caso el diferencial de presión que se tiene dentro de los parámetros de diseño para evitar falsas señales en la medición de la presión en la red por parte de los presostatos, es de 0.5 bar, equivalente a 5 m. Ahora en la Tabla 15 se muestra los resultados de las señales de paro y arranque.

Tabla 15. Arranque y paro BVF-P

PARÁMETROS DE ARRANQUE Y PARO							
N	Arr	Qarr (l/s)	Harr (m)	Par	H₂ (m)	Qpar (l/s)	Hpar (m)
1	1-2	16.84	92.39	2-1	102.27	15.61	102.27
2	2-3	39.81	87.39	3-2	97.27	39.52	97.27
3	3-4	67.67	82.39	4-3	92.27	67.67	92.27

Para calcular la presión de arranque de cada uno de los equipos de bombeo, como se explicó en el apartado 3.2, se necesita calcular el punto de intersección entre la curva

de consigna y la curva motriz para N-1, que en este caso es la curva motriz para 3 bombas. Las demás alturas de arranque son definidas por la suma del diferencial de presión (ΔH) igual a 5 m. El cálculo de la altura de paro (H_{par}), se define del mayor entre la altura de arranque (H_{arr}) y la altura de paro del total de bombas que estén funcionando en ese instante de tiempo (H_2).

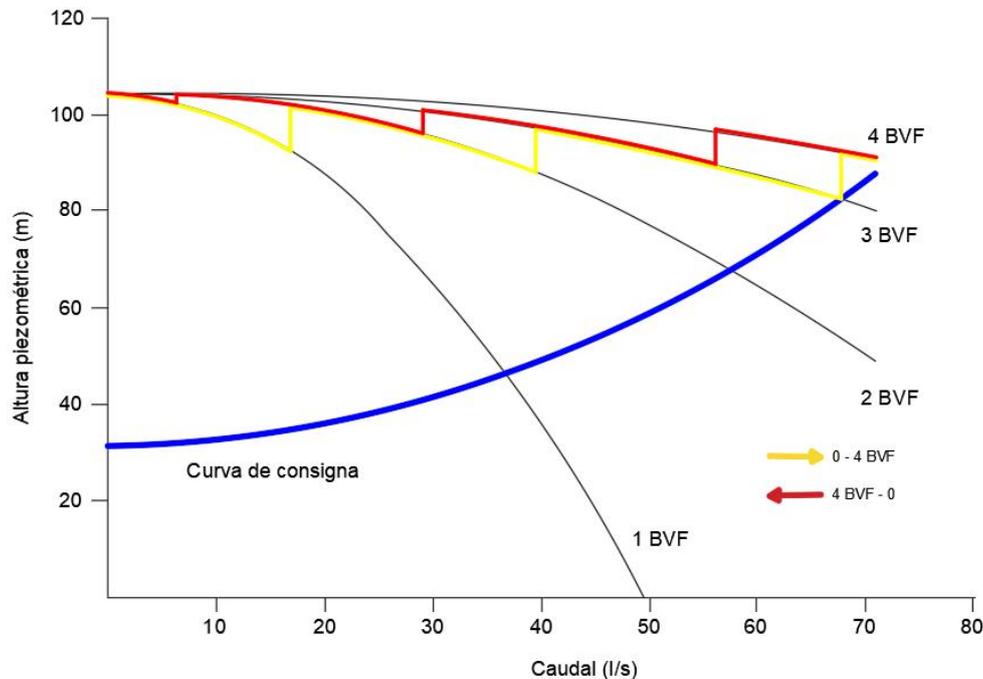


Figura 26. Zona de trabajo BVF – P

En la Figura 26 se ve representado a escala el comportamiento de la estación de bombeo para cada uno de los rangos de caudal. Siendo la línea amarilla la muestra del recorrido del funcionamiento de las bombas siempre que el caudal sea ascendente. De forma contraria, la línea roja muestra el recorrido de la curva motriz cuando el caudal va de forma descendente.

Se puede presentar el caso en el que la altura de paro sea mayor a la altura inicial de la curva motriz, esto se puede presentar cuando la curva motriz es considerablemente plana o la estación de bombeo cuenta con una cantidad de bombas suficiente para que el H_{par} sea mayor al H_0 . En este caso el H_0 es igual a 104.98 m, mientras la altura máxima de paro que es para pasar de dos unidades de bombeo a una unidad, es igual a 102.27 m.

Ahora definidas las consignas de paro y arranque, se procede a calcular el costo de operación de forma similar a como se calculó en el anterior apartado.

Tabla 16. Costo de operación BVF + P

COSTO DE OPERACIÓN BVF + P									
t (h)	Cm(t)	Q (t)	Nº B	H (t)	reND	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste	
0	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45	
1	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45	
2	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45	
3	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45	
4	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45	
5	0.65	23.56	2	98.82	0.46	49.376	0.094	4.64	
6	0.65	23.56	2	98.82	0.46	49.376	0.094	4.64	
7	1.66	60.18	3	87.12	0.61	84.219	0.094	7.92	
8	1.16	42.00	3	96.28	0.52	76.789	0.133	10.21	
9	0.65	23.56	2	98.82	0.46	49.376	0.133	6.57	
10	0.65	23.56	2	98.82	0.46	49.376	0.133	6.57	
11	1.66	60.18	3	87.12	0.61	84.219	0.133	11.20	
12	1.96	71.00	4	91.00	0.58	108.516	0.133	14.43	
13	1.96	71.00	4	91.00	0.58	108.516	0.133	14.43	
14	1.66	60.18	3	87.12	0.61	84.219	0.133	11.20	
15	0.96	34.70	2	91.62	0.58	53.931	0.133	7.17	
16	0.75	27.36	2	96.67	0.51	50.931	0.133	6.77	
17	1.06	38.39	2	88.63	0.60	55.439	0.133	7.37	
18	1.06	38.39	2	88.63	0.60	55.439	0.166	9.20	
19	1.06	38.39	2	88.63	0.60	55.439	0.166	9.20	
20	1.46	52.95	3	91.15	0.58	81.264	0.166	13.49	
21	1.46	52.95	3	91.15	0.58	81.264	0.166	13.49	
22	1.06	38.39	2	88.63	0.60	55.439	0.133	7.37	
23	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.133	3.46	
Precio (€/d)							181.60		

Como es de esperarse, el costo del presente método de regulación es significativamente más económico que el primero. Exactamente la diferencia entre uno y el otro es de 104.74 (€/d), equivalente a una reducción del 37%.

También es evidente que el costo de inversión de BVF es menor que el presente (BVF + P), a causa de que el primero no cuenta con ningún tipo de medición y en el segundo es necesario el uso de presostatos.

5.4.3 Costo de operación BVF – Q

Con la regulación caudalimétrica, se define las señales de arranque y paro mediante la ecuación (3), igualando la curva motriz para cada bomba con la curva de consigna. Resultando de ella el caudal de arranque y paro de cada una de las bombas.

El resultado de las señales de consigna medidas gracias al uso del caudalímetro, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 17. Arranque y paro BVF - Q

PARÁMETROS DE ARRANQUE Y PARO			
N	Arr-Par	Q (l/s)	H (m)
1	1-2	36.38	46.24
2	2-3	57.51	68.27
3	3-4	67.67	82.39

Ahora en la Figura 27 se ve representado el comportamiento de la estación de bombeo a lo largo de la curva de consigna.

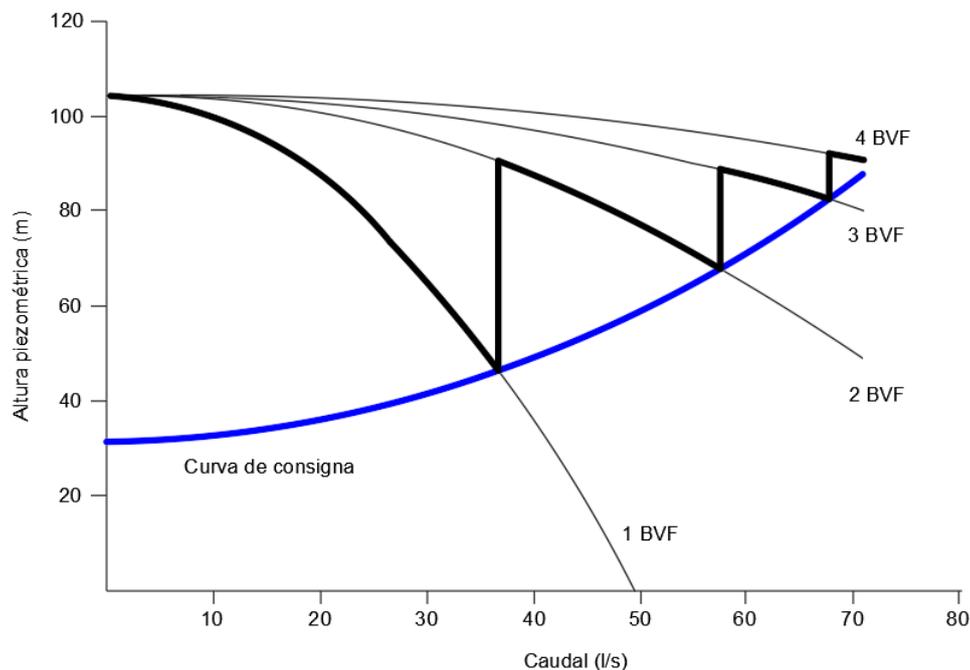


Figura 27. Zona de trabajo BVF - Q

Como se observa en la Figura 27, la parte resaltada sobre la curva motriz, representa los puntos de altura y caudal que se suministra para cada instante de la curva de consigna. Es evidente que el caudal suministrado por 2 bombas, no representa el doble de lo que suministra una. Esto se puede ver gráficamente, al aumentar el caudal, aumentan las pérdidas, por lo tanto, el rango de caudales cada vez se hace menor.

Con los puntos de arranque y paro de los equipos de bombeo, es posible determinar el costo de operación para el presente método de regulación.

Tabla 18. Costo de operación BVF + Q

COSTO DE OPERACIÓN BVF + Q								
t (h)	Cm(t)	Q (t)	Nº B	H (t)	reND	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste
0	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45
1	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45
2	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45
3	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45
4	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.094	2.45
5	0.65	23.56	1	80.35	0.63	29.501	0.094	2.77
6	0.65	23.56	1	80.35	0.63	29.501	0.094	2.77
7	1.66	60.18	3	87.12	0.61	84.219	0.094	7.92
8	1.16	42.00	2	85.41	0.62	56.914	0.133	7.57
9	0.65	23.56	1	80.35	0.63	29.501	0.133	3.92
10	0.65	23.56	1	80.35	0.63	29.501	0.133	3.92
11	1.66	60.18	3	87.12	0.61	84.219	0.133	11.20
12	1.96	71.00	4	91.00	0.58	108.516	0.133	14.43
13	1.96	71.00	4	91.00	0.58	108.516	0.133	14.43
14	1.66	60.18	3	87.12	0.61	84.219	0.133	11.20
15	0.96	34.70	1	51.54	0.52	34.056	0.133	4.53
16	0.75	27.36	1	71.75	0.62	31.056	0.133	4.13
17	1.06	38.39	2	88.63	0.60	55.439	0.133	7.37
18	1.06	38.39	2	88.63	0.60	55.439	0.166	9.20
19	1.06	38.39	2	88.63	0.60	55.439	0.166	9.20
20	1.46	52.95	2	73.87	0.63	61.389	0.166	10.19
21	1.46	52.95	2	73.87	0.63	61.389	0.166	10.19
22	1.06	38.39	2	88.63	0.60	55.439	0.133	7.37
23	0.42	15.10	1	94.86	0.54	26.046	0.133	3.46
							Precio (€/d)	158.05

El costo de operación del presente método de regulación es un 13% más económico que el al anterior. Esto se debe a dos factores, al número de bombas que hay en operación en distintas franjas horarias del día y la más importante, en el presente método se trabaja más cerca de la curva de consigna, por lo tanto, menor es la altura proporcionada para un mismo caudal.

5.4.4 Costo de operación BVV – P

El presente método de regulación es el primero que contempla la adición del uso de variadores de frecuencia en los equipos de bombeo. Se garantiza por medio de la lectura de la presión a la salida de la estación, una presión constante, igual a la máxima de la curva de consigna.

Para calcular el rango en el que está en funcionamiento el número de bombas necesario, se iguala la ecuación (2) a la altura del caudal máximo de la curva de consigna, que en este caso es igual a 87.52 m. Lo único que varía para poder hallar el caudal que determina que bomba se enciende o apaga, es el número de bombas que están en funcionamiento (termino n) de ahí, se desprenden los siguientes resultados:

Tabla 19. Arranque y paro BVV - P

PARÁMETROS DE ARRANQUE Y PARO			
N	Arr	Q (l/s)	H (m)
1	1-2	19.84	87.52
2	2-3	39.67	87.52
3	3-4	59.51	87.52

La diferencia de rangos de caudales para 1, 2 y 3 bombas, es exactamente la misma (19.84 l/s). La representación gráfica de cómo trabaja el equipo de bombeo para la red que se tomó como ejemplo (PS1), se ve en la siguiente figura:

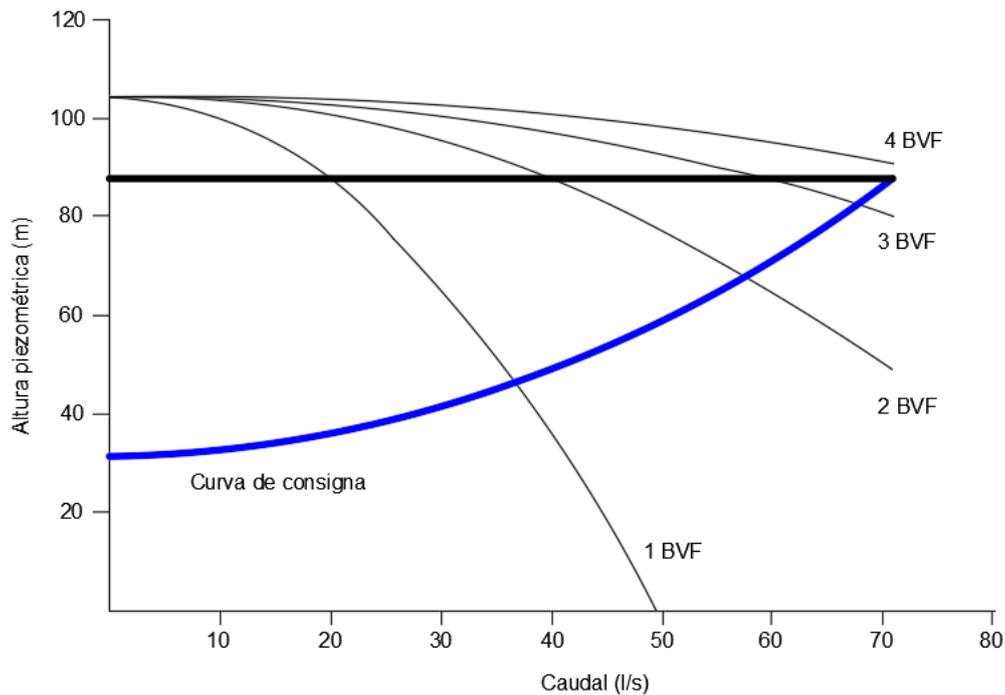


Figura 28. Zona de trabajo BVV - P

La zona de trabajo del equipo de bombeo, se muestra resaltada de color negro. El variador de velocidad de las bombas que estén en funcionamiento van a la misma velocidad, sin importar cuantas bombas estén trabajando, por consiguiente, el caudal demandado por cada bomba será igual al total, dividido por el número de bombas.

Teniendo los parámetros expuestos en la Tabla 19, lo que prosigue es calcular el costo de operación del método. Para garantizar una presión constante, los presostatos miden

la presión actual de la red, con este dato, utilizando la ecuación (4), es posible hallar el caudal que circula por la red. Luego el caudal demandado se reemplaza en la ecuación (1), de esta forma la única incógnita resultante es la velocidad de giro (α) a la que deben ir las bombas. Ya con todos estos datos es posible determinar cuál es el costo de operación, el cual se ve en la Tabla 20:

Tabla 20. Costo de operación BVV + P

COSTO DE OPERACIÓN BVV + P									
t (h)	Cm(t)	Q (t)	Nº B	H (t)	α	reND	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste (€)
0	0.42	15.10	1	87.52	0.96	0.55	23.57	0.09	2.22
1	0.42	15.10	1	87.52	0.96	0.55	23.57	0.09	2.22
2	0.42	15.10	1	87.52	0.96	0.55	23.57	0.09	2.22
3	0.42	15.10	1	87.52	0.96	0.55	23.57	0.09	2.22
4	0.42	15.10	1	87.52	0.96	0.55	23.57	0.09	2.22
5	0.65	23.56	2	87.52	0.94	0.48	42.09	0.09	3.96
6	0.65	23.56	2	87.52	0.94	0.48	42.09	0.09	3.96
7	1.66	60.18	4	87.52	0.96	0.55	94.08	0.09	8.84
8	1.16	42.00	3	87.52	0.96	0.53	68.05	0.13	9.05
9	0.65	23.56	2	87.52	0.94	0.48	42.09	0.13	5.60
10	0.65	23.56	2	87.52	0.94	0.48	42.09	0.13	5.60
11	1.66	60.18	4	87.52	0.96	0.55	94.08	0.13	12.51
12	1.96	71.00	4	87.52	0.98	0.59	103.64	0.13	13.78
13	1.96	71.00	4	87.52	0.98	0.59	103.64	0.13	13.78
14	1.66	60.18	4	87.52	0.96	0.55	94.08	0.13	12.51
15	0.96	34.70	2	87.52	0.98	0.58	51.07	0.13	6.79
16	0.75	27.36	2	87.52	0.96	0.52	44.87	0.13	5.97
17	1.06	38.39	2	87.52	0.99	0.60	54.64	0.13	7.27
18	1.06	38.39	2	87.52	0.99	0.60	54.64	0.17	9.07
19	1.06	38.39	2	87.52	0.99	0.60	54.64	0.17	9.07
20	1.46	52.95	3	87.52	0.98	0.59	77.44	0.17	12.86
21	1.46	52.95	3	87.52	0.98	0.59	77.44	0.17	12.86
22	1.06	38.39	2	87.52	0.99	0.60	54.64	0.13	7.27
23	0.42	15.10	1	87.52	0.96	0.55	23.57	0.13	3.13
Precio (€/d)									174.96

Para poder hallar la velocidad de giro reducida (α), es necesario despejarla de la ecuación (1), resultando en la siguiente ecuación.

$$\alpha = \sqrt{\frac{H + A * \left(\frac{Q}{n}\right)^2}{H_0}} \quad (14)$$

Para este caso en particular, el costo de operación es un 10% más costoso que el anterior. Esto se puede evidenciar gráficamente, cuando en gran parte de la zona de

trabajo del método 5.4.3, está por debajo de la altura de consigna (87.52 m) del presente método. Representando así, una menor altura para el mismo caudal y por consiguiente una menor potencia.

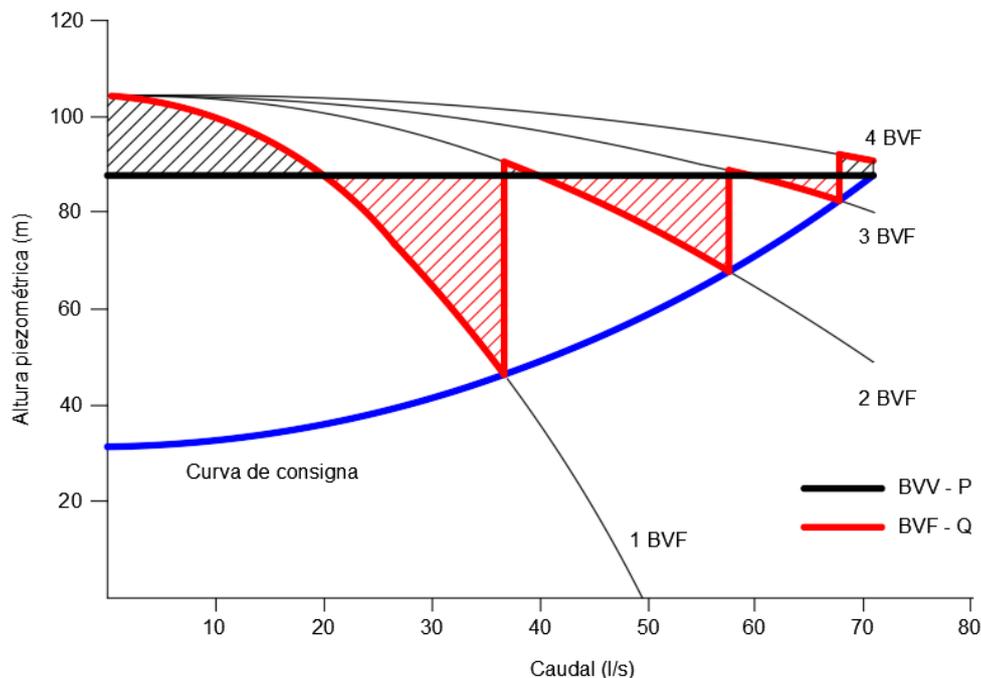


Figura 29. Comparación BVV - P y BVF - Q

En la Figura 29 se observa como el rango de caudales de operación inferiores a 87.52 m, correspondiente al método de regulación de BVF - Q, es mayor al de BVV - P. En gran medida hace que al ser menor la altura, sea menor la potencia. La grafica da un indicio, pues no significa que en todos los casos se cumpla esta premisa. Se puede dar el caso de que la gran mayoría de tiempo, la demanda se ubique sobre la línea de trabajo de BVV - P y así dar un resultado contrario al obtenido.

5.4.5 Costo de operación BVV - Q

Para el presente método, se asume que la curva motriz de trabajo sigue el mismo comportamiento a la curva de consigna. En teoría, esta metodología de regulación representaría el costo de operación más bajo, dado que se garantizaría que la altura y el caudal aportado a la red por el sistema de bombeo, será el mínimo necesario en todo momento.

Las consignas de arranque y paro, que son determinadas por la intersección entre las curvas motrices de las n bombas y la curva de consigna, corresponden a los mismos valores calculados previamente en la Tabla 17. Por consiguiente, la curva de trabajo queda representada de la siguiente manera:

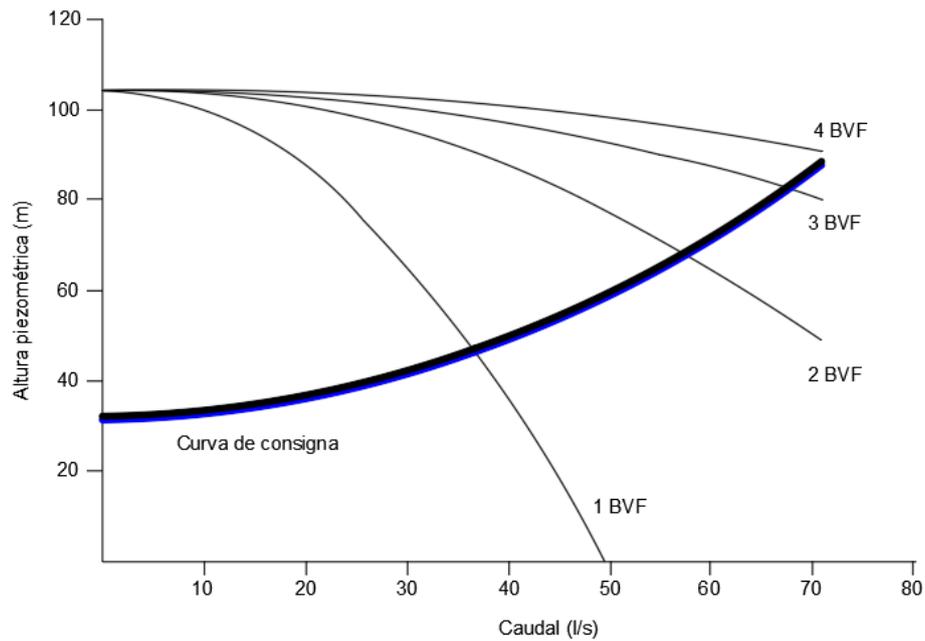


Figura 30. Zona de trabajo BVV – Q

En este caso, el caudalímetro no funciona solo como el tipo de medición para el sistema de regulación, sino además con los registros de caudales se pueden realizar cálculos posteriores. Por medio del análisis de la Figura 30 o los datos de la Tabla 17, es posible establecer el número de bombas que están en funcionamiento para un caudal específico en la red. Posteriormente, con el caudal demandado y la altura hallada por la curva de consigna, es posible determinar mediante el uso de la ecuación (14), la velocidad de giro de las bombas para cualquier tipo de demanda.

Los resultados obtenidos del cálculo de costos de operacionales, son los siguientes:

Tabla 21. Costo de operación BVV + Q.

COSTO DE OPERACIÓN BVV + Q									
t (h)	C_m(t)	Q (t)	Nº B	H (t)	α	reND	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste (€)
0	0.42	15.10	1	34.08	0.65	0.63	8.03	0.09	0.75
1	0.42	15.10	1	34.08	0.65	0.63	8.03	0.09	0.75
2	0.42	15.10	1	34.08	0.65	0.63	8.03	0.09	0.75
3	0.42	15.10	1	34.08	0.65	0.63	8.03	0.09	0.75
4	0.42	15.10	1	34.08	0.65	0.63	8.03	0.09	0.75
5	0.65	23.56	1	37.71	0.77	0.59	14.81	0.09	1.39
6	0.65	23.56	1	37.71	0.77	0.59	14.81	0.09	1.39
7	1.66	60.18	3	71.76	0.92	0.62	68.02	0.09	6.39
8	1.16	42.00	2	51.13	0.82	0.63	33.53	0.13	4.46
9	0.65	23.56	1	37.71	0.77	0.59	14.81	0.13	1.97
10	0.65	23.56	1	37.71	0.77	0.59	14.81	0.13	1.97

Tabla 22. Costo de operación BVV + Q.- Continuación

COSTO DE OPERACIÓN BVV + Q									
t (h)	Cm(t)	Q (t)	Nº B	H (t)	α	reND	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste (€)
11	1.66	60.18	3	71.76	0.92	0.62	68.02	0.13	9.05
12	1.96	71.00	4	87.52	0.98	0.59	103.64	0.13	13.78
13	1.96	71.00	4	87.52	0.98	0.59	103.64	0.13	13.78
14	1.66	60.18	3	71.76	0.92	0.62	68.02	0.13	9.05
15	0.96	34.70	1	44.91	0.97	0.49	31.31	0.13	4.16
16	0.75	27.36	1	39.86	0.83	0.55	19.33	0.13	2.57
17	1.06	38.39	2	47.91	0.78	0.63	28.64	0.13	3.81
18	1.06	38.39	2	47.91	0.78	0.63	28.64	0.17	4.75
19	1.06	38.39	2	47.91	0.78	0.63	28.64	0.17	4.75
20	1.46	52.95	2	62.68	0.95	0.62	52.90	0.17	8.78
21	1.46	52.95	2	62.68	0.95	0.62	52.90	0.17	8.78
22	1.06	38.39	2	47.91	0.78	0.63	28.64	0.13	3.81
23	0.42	15.10	1	34.08	0.65	0.63	8.03	0.13	1.07
Precio (€/d)								109.50	

Contrario al 5.3, donde el costo de operación es el más elevado y el de inversión más bajo, los resultados obtenidos en el presente método derivan en el menor costo de operación de los casos analizados hasta el momento, llegando a ser un 45% más económico que el promedio de los métodos anteriores. Mientras que, el costo de inversión como era de esperarse será el mayor registrado, debido al costo adicional de los variadores de frecuencia.

5.4.6 Costo de operación BVF + BVV – P

Teniendo en cuenta que el presente caso de evaluación cuenta con 4 bombas en total, se hace necesario plantear 3 posibles escenarios de regulación. El número de escenarios en todos los casos corresponderá a n-1, siendo n el número de bombas totales. Los posibles escenarios se plantean con dos hipótesis principales:

- Siempre se garantizará el uso de las bombas de velocidad variable en primera instancia y las de velocidad fija entraran en funcionamiento una vez las primeras hayan llegado a su capacidad máxima;
- Deben siempre ser usadas bombas de velocidad variable y fija en cada posible escenario a analizar, en el caso de que todas las bombas tuvieran las mismas características sería necesario remitirse a los apartados 5.4.2 y 5.4.4, donde se evaluó previamente este planteamiento de regulación. De forma tal, que se obtienen los siguientes escenarios para el presenta caso de estudio:



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

- 1 BVF + 3 BVV
- 2 BVF + 2 BVV
- 3 BVF + 1 BVV

Al igual que el caso del apartado 5.4.4, el comportamiento de la curva motriz de trabajo debe ser constante. Por consiguiente, la gráfica que representa el escenario de funcionamiento del presente apartado corresponde de igual forma a la Figura 28.

Considerando que en el presente caso es necesario el análisis de 3 escenarios diferentes, se procederá a explicar detalladamente el proceso de solo uno de estos (1 BVF + 3 BVV).

Tabla 23. Costo de operación 3 BVV + 1 BVF - P

COSTO DE OPERACIÓN 3 BVV + 1 BVF - P												
t (h)	Cm(t)	Q (t)	Nº B	Q BVF	Q BVV	H (t)	α	Rend BVF	Rend BVV	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste (€)
0	0.42	15.10	1	0.00	15.10	87.52	0.96	0.00	0.55	23.57	0.09	2.22
1	0.42	15.10	1	0.00	15.10	87.52	0.96	0.00	0.55	23.57	0.09	2.22
2	0.42	15.10	1	0.00	15.10	87.52	0.96	0.00	0.55	23.57	0.09	2.22
3	0.42	15.10	1	0.00	15.10	87.52	0.96	0.00	0.55	23.57	0.09	2.22
4	0.42	15.10	1	0.00	15.10	87.52	0.96	0.00	0.55	23.57	0.09	2.22
5	0.65	23.56	2	0.00	23.56	87.52	0.94	0.00	0.48	42.09	0.09	3.96
6	0.65	23.56	2	0.00	23.56	87.52	0.94	0.00	0.48	42.09	0.09	3.96
7	1.66	60.18	4	19.84	40.34	87.52	0.95	0.61	0.52	94.76	0.09	8.91
8	1.16	42.00	3	0.00	42.00	87.52	0.96	0.00	0.53	68.05	0.13	9.05
9	0.65	23.56	2	0.00	23.56	87.52	0.94	0.00	0.48	42.09	0.13	5.60
10	0.65	23.56	2	0.00	23.56	87.52	0.94	0.00	0.48	42.09	0.13	5.60
11	1.66	60.18	4	19.84	40.34	87.52	0.95	0.61	0.52	94.76	0.13	12.60
12	1.96	71.00	4	19.84	51.16	87.52	0.98	0.61	0.58	103.77	0.13	13.80
13	1.96	71.00	4	19.84	51.16	87.52	0.98	0.61	0.58	103.77	0.13	13.80
14	1.66	60.18	4	19.84	40.34	87.52	0.95	0.61	0.52	94.76	0.13	12.60
15	0.96	34.70	2	0.00	34.70	87.52	0.98	0.00	0.58	51.07	0.13	6.79
16	0.75	27.36	2	0.00	27.36	87.52	0.96	0.00	0.52	44.87	0.13	5.97
17	1.06	38.39	2	0.00	38.39	87.52	0.99	0.00	0.60	54.64	0.13	7.27
18	1.06	38.39	2	0.00	38.39	87.52	0.99	0.00	0.60	54.64	0.17	9.07
19	1.06	38.39	2	0.00	38.39	87.52	0.99	0.00	0.60	54.64	0.17	9.07
20	1.46	52.95	3	0.00	52.95	87.52	0.98	0.00	0.59	77.44	0.17	12.86
21	1.46	52.95	3	0.00	52.95	87.52	0.98	0.00	0.59	77.44	0.17	12.86
22	1.06	38.39	2	0.00	38.39	87.52	0.99	0.00	0.60	54.64	0.13	7.27
23	0.42	15.10	1	0.00	15.10	87.52	0.96	0.00	0.55	23.57	0.13	3.13
Precio (€/d)												175.24

El procedimiento de cálculo presentado en la Tabla 23 se realiza para los 2 escenarios restantes. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 31, donde se puede identificar como solución óptima desde el punto de vista económico al primer escenario, correspondiente a 1 BVF + 3 BVV.

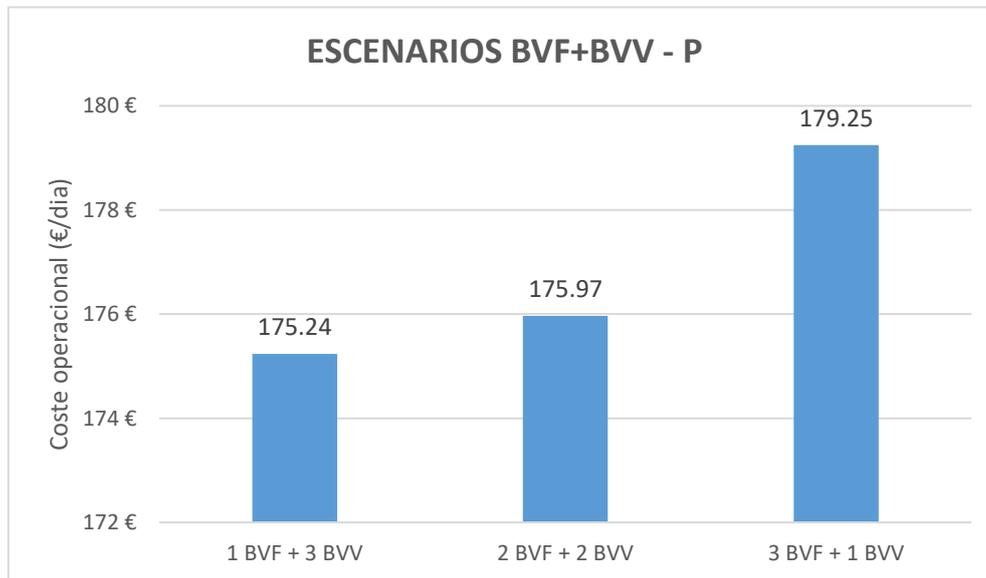


Figura 31. Resultados escenarios evaluados – (BVV + BVF – P)

Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que el ahorro energético está directamente relacionado con el número de BVV. No obstante, la diferencia de ahorro cuando plantea el uso de 1 a 2 BVV (3.28 €), resulta más significativo que el uso de 2 a 3 (0.73 €).

5.4.7 Costo de operación BVF + BVV – Q

El planteamiento de este nuevo caso se realiza bajo las mismas hipótesis y posibles escenarios de bombeo propuestos en el apartado 5.4.6. No obstante, los parámetros evaluados serán diferentes, al tener un tipo de medición caudalímetro y no manométrico. El comportamiento de la curva motriz de trabajo debe seguir el mismo comportamiento de la curva de consigna. Por consiguiente, la gráfica que representa el escenario de funcionamiento del presente apartado corresponde de igual forma a la Figura 30.

Tabla 24. Costo de operación 3 BVV + 1 BVF - Q

COSTO DE OPERACIÓN 3 BVV + 1 BVF - Q												
t (h)	Cm(t)	Q (t)	Nº B	Q BVF	Q BVV	H (t)	α	ReND BVF	ReND BVV	Potencia (kW)	Precio E (€/kWh)	Coste (€)
0	0.42	15.10	1	0.00	15.10	34.08	0.65	0.00	0.63	8.03	0.09	0.75
1	0.42	15.10	1	0.00	15.10	34.08	0.65	0.00	0.63	8.03	0.09	0.75
2	0.42	15.10	1	0.00	15.10	34.08	0.65	0.00	0.63	8.03	0.09	0.75
3	0.42	15.10	1	0.00	15.10	34.08	0.65	0.00	0.63	8.03	0.09	0.75
4	0.42	15.10	1	0.00	15.10	34.08	0.65	0.00	0.63	8.03	0.09	0.75
5	0.65	23.56	1	0.00	23.56	37.71	0.77	0.00	0.59	14.81	0.09	1.39
6	0.65	23.56	1	0.00	23.56	37.71	0.77	0.00	0.59	14.81	0.09	1.39
7	1.66	60.18	3	0.00	60.18	71.76	0.92	0.00	0.62	68.02	0.09	6.39
8	1.16	42.00	2	0.00	42.00	51.13	0.82	0.00	0.63	33.53	0.13	4.46
9	0.65	23.56	1	0.00	23.56	37.71	0.77	0.00	0.59	14.81	0.13	1.97
10	0.65	23.56	1	0.00	23.56	37.71	0.77	0.00	0.59	14.81	0.13	1.97
11	1.66	60.18	3	0.00	60.18	71.76	0.92	0.00	0.62	68.02	0.13	9.05
12	1.96	71.00	4	19.84	51.16	87.52	0.98	0.61	0.58	103.77	0.13	13.80
13	1.96	71.00	4	19.84	51.16	87.52	0.98	0.61	0.58	103.77	0.13	13.80
14	1.66	60.18	3	0.00	60.18	71.76	0.92	0.00	0.62	68.02	0.13	9.05
15	0.96	34.70	1	0.00	34.70	44.91	0.97	0.00	0.49	31.31	0.13	4.16
16	0.75	27.36	1	0.00	27.36	39.86	0.83	0.00	0.55	19.33	0.13	2.57
17	1.06	38.39	2	0.00	38.39	47.91	0.78	0.00	0.63	28.64	0.13	3.81
18	1.06	38.39	2	0.00	38.39	47.91	0.78	0.00	0.63	28.64	0.17	4.75
19	1.06	38.39	2	0.00	38.39	47.91	0.78	0.00	0.63	28.64	0.17	4.75
20	1.46	52.95	2	0.00	52.95	62.68	0.95	0.00	0.62	52.90	0.17	8.78
21	1.46	52.95	2	0.00	52.95	62.68	0.95	0.00	0.62	52.90	0.17	8.78
22	1.06	38.39	2	0.00	38.39	47.91	0.78	0.00	0.63	28.64	0.13	3.81
23	0.42	15.10	1	0.00	15.10	34.08	0.65	0.00	0.63	8.03	0.13	1.07
											Precio (€/d)	109.54

Al igual que el caso anterior, solo se muestran los cálculos de 1 de los 3 escenarios (Tabla 24). Los resultados obtenidos para la totalidad de escenarios planteados, se presentan en la Figura 32. Es esta, se puede identificar como solución óptima desde el punto de vista económico al primer escenario, correspondiente a 1 BVF + 3 BVV.

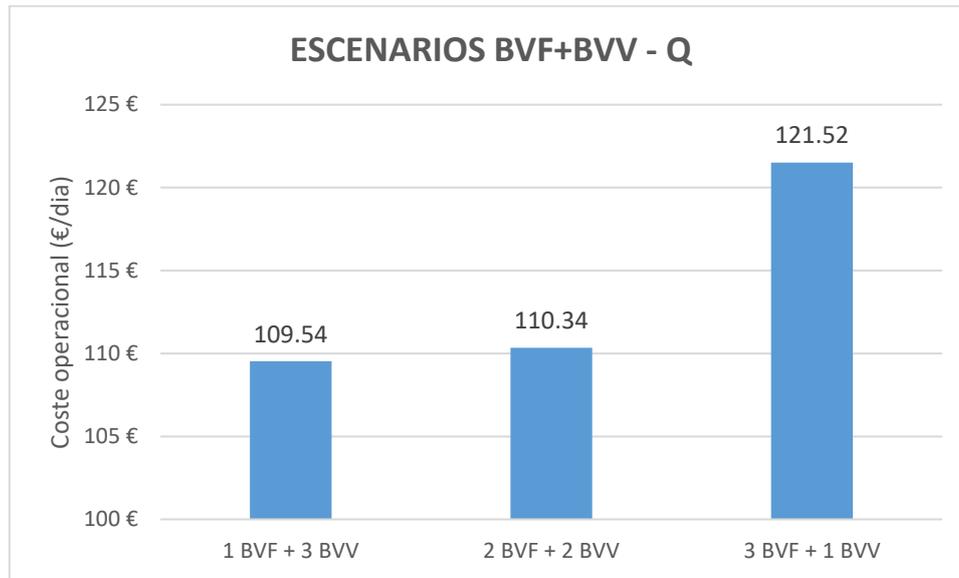


Figura 32. Resultados escenarios evaluados – (BVV + BVF – Q)

Sobre los resultados de este caso se puede hacer la misma conclusión obtenida previamente en el anterior apartado. Donde se evidencia que el ahorro energético está directamente relacionado con el número de BVV. No obstante, la diferencia de ahorro cuando plantea el uso de 1 a 2 BVV (11.78 €), resulta mucho más significativo que el uso de 2 a 3 (0.80 €).

5.4.8 Análisis de resultados

En la Figura 33 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para todos los métodos de regulación.



Figura 33 Resumen de costos de operación

Los resultados mostrados corresponden al costo operacional en €/d de los distintos métodos de regulación, aplicado al modelo de bomba número 33. Donde todos los casos expuestos constan de 4 unidades de bombeo. El costo más elevado corresponde al método número 1 (BVF), donde no se cuenta con un método de medición. Por lo tanto, no es posible regular.

El costo menos elevado se presenta en el método de regulación número 5, donde todos los equipos de bombeo cuentan con un variador de velocidad, el cual hace que la bomba siga una altura determinada en cada momento. La altura que debe seguir es igual a la curva de consigna. Esto hace que, al proporcionar la altura mínima necesaria para cualquier caudal, de igual manera se esté consumiendo la potencia mínima.

Para este caso, según el método de regulación, resulta más económico regular con medición caudalimétrica en lugar de piezométrica. La regulación entre BVF-P y BVF-Q

paso de 181.60 €/día a 158.05 €/día, resultando una disminución de 23.55 €/día. De igual forma la regulación con BVV muestra una disminución entre la medición piezométrica y caudalimétrica de 65.45 €/día.

De igual forma como se obtuvieron los resultados del costo de operación para el ejemplo del modelo de bomba número 33 en el punto de la red PS1, es necesario hacer todos los cálculos correspondientes a los restantes modelos con los demás puntos de suministro. Para poder desarrollar esta metodología de forma ágil, es necesario desarrollar un algoritmo capaz de reemplazar todos los datos de las bombas y la red, en cada uno de los métodos de regulación. Si corresponde a una solución factible, tomar el resultado final que es el costo de operación para ese método.

Hasta el momento ninguno de los resultados hallados en este capítulo puede ser descartado, puesto que aún no se han determinado los costos de inversión que conllevan cada uno de estos. Por lo tanto, todos los datos hallados previamente, son igual de válidos.

5.5. Costos de inversión

Además del costo de operación hallado previamente, la otra parte fundamental del trabajo es el coste de inversión. Es con estos dos resultados que se puede descartar una solución óptima sobre una factible.

El costo de inversión que se tiene en cuenta para desarrollar la metodología propuesta, contempla los elementos básicos necesarios para poner en marcha una estación de bombeo. Entre los que se encuentra el costo de los equipos de bombeo, tubería, accesorios, válvulas, variadores de velocidad, elementos de medición y programación. Los costos de mano de obra e infraestructura no se tienen contemplados.

En los siguientes apartados se menciona como se obtienen cada uno de los costos mencionados anteriormente. Teniendo en cuenta en muchos de ellos un concepto llamado coeficiente de determinación. El cual es un valor que representa la capacidad de ajuste de una ecuación hallada por medio de una regresión a una variable, que en este caso puede ser el diámetro, la potencia, el caudal o la altura.

5.5.1 Costo de inversión bombas

El catálogo de bombas utilizado para poder representar de alguna forma los costos de los equipos de bombeo, corresponde a un catálogo comercial de un fabricante de bombas normalizadas.

Al analizar los datos de las alturas y caudales óptimos de cada uno de los 67 modelos del catálogo, se evidencia una diferencia de precios según el rendimiento nominal de cada

uno. Por lo tanto, resulta necesario aplicar ecuaciones distintas, según el rendimiento que ofrezca cada modelo de bomba.

Para tener un resultado más certero al momento de representar los valores reales por medio de las ecuaciones de costo, se debe hacer un análisis de sensibilidad, donde se depuren los datos que puedan afectar el resultado final. En este caso de los 67 modelos del catálogo fue necesario depurar 14 de ellos, pues correspondían a valores que alteraban el comportamiento de los demás. Los valores depurados en su mayoría correspondían a valores por debajo de lo normal, lo que se puede ser por causas de promociones del fabricante, cambio de inventario, etc.

Según el análisis de datos, a partir de un rendimiento del 65%, el costo variaba significativamente, de manera que ese valor es el punto de partida para definir cuál de las dos ecuaciones planteadas se puede utilizar.

Las ecuaciones que representa el costo de un equipo de bombeo, aparte de tener como condicionante el rendimiento nominal, está en función del caudal y la altura nominal. Para llegar a estas ecuaciones es necesario realizar las respectivas regresiones y calcular cuál de estas tiene un coeficiente de determinación más cercano a 1, es decir, que plasme de manera más acertada el valor real. De las regresiones realizadas, la que obtuvo un coeficiente de determinación mayor fue una ecuación de orden exponencial, arrojando un coeficiente para las dos ecuaciones de aproximadamente 0.96. Las ecuaciones que representan los costos de inversión son las siguientes:

Bombas con rendimiento (η) superior a 65%:

$$F(\text{€}), \eta > 0.65 = 203.14 * (QH)^{0.6115} \quad (15)$$

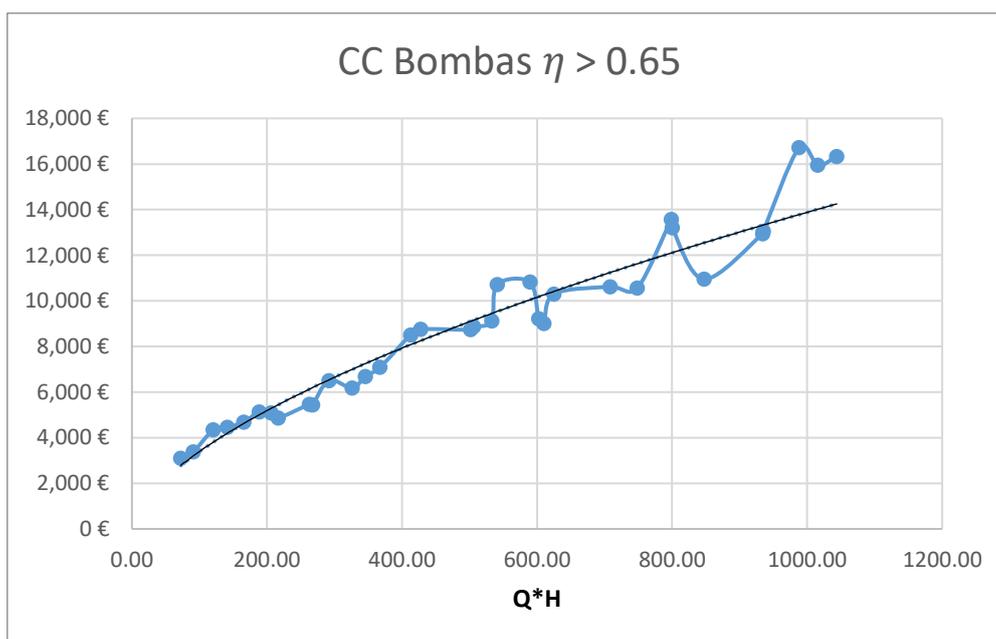


Figura 34. Grafica CC Bombas $\eta > 0.65$

Bombas con rendimiento superior a 65%:

$$F(\text{€}), \eta < 0.65 = 142.88 * (QH)^{0.5437} \quad (16)$$

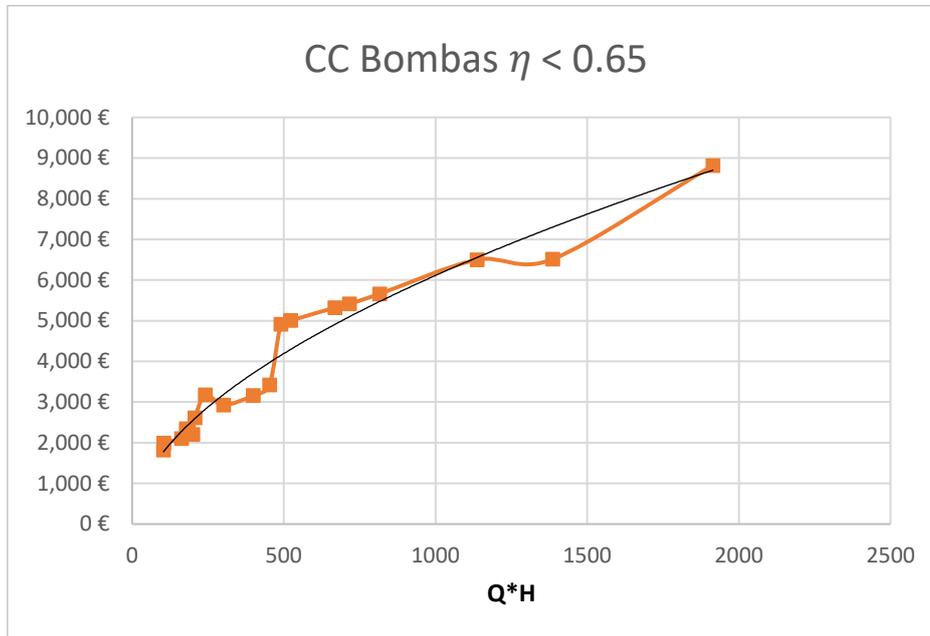


Figura 35. Gráfica CC Bombas $\eta < 0.65$

En la Figura 34 y Figura 35 se ilustran las curvas de costos aproximadas a los valores reales de las bombas. En las ecuaciones (15) y (16), $H(\text{mca})$ y $Q(\text{l/s})$, representan respectivamente la altura y el caudal en el punto óptimo de funcionamiento de la bomba. Es evidente que entre mayor sea el rendimiento que pueda ofrecer un equipo de bombeo, mayor será su costo.

El rendimiento de la bomba que se tomó como ejemplo, cuyo número de serie es 33, tiene un rendimiento máximo de 63%, por lo tanto, se aplica la ecuación número (16). El caudal y la altura óptima de esta bomba es 24.32 l/s y 78.73 m respectivamente. Remplazando los datos y sabiendo que se necesitan cuatro unidades de bombeo, el precio total de los equipos de bombeo es de 34.793,14 €.

5.5.2 Costo de variadores de velocidad

Los variadores de velocidad resultan ser una parte importante en el trabajo, puesto que gracias a estos dispositivos es posible implementar cuatro de los siete métodos de regulación propuestos.

Como precios de referencia para representar el costo de los variadores, se tomaron precios del mercado donde sus características variaban desde 1.5kW hasta 75 kW. Al igual que el apartado anterior, se descartaron datos que no correspondían al comportamiento normal del análisis de sensibilidad. La variable a utilizar en la ecuación

de costo del variador, es la potencia del motor, cuyo parámetro está relacionado directamente con la potencia del motor de las bombas donde se desee instalar.

La función resultante de la regresión aplicada a los datos de partida, arroja una ecuación polinómica de segundo orden, la cual se muestra a continuación:

$$F(€) = 168.19 + 116.08 * P - 0.6033 * P^2 \quad (17)$$

Donde P(kW) corresponde la potencia máxima de trabajo del variador. La curva de costes tiene en este caso un coeficiente de determinación del 0.99. En la Figura 36 se ilustra la curva de costo aproximada a los valores de los variadores de velocidad.

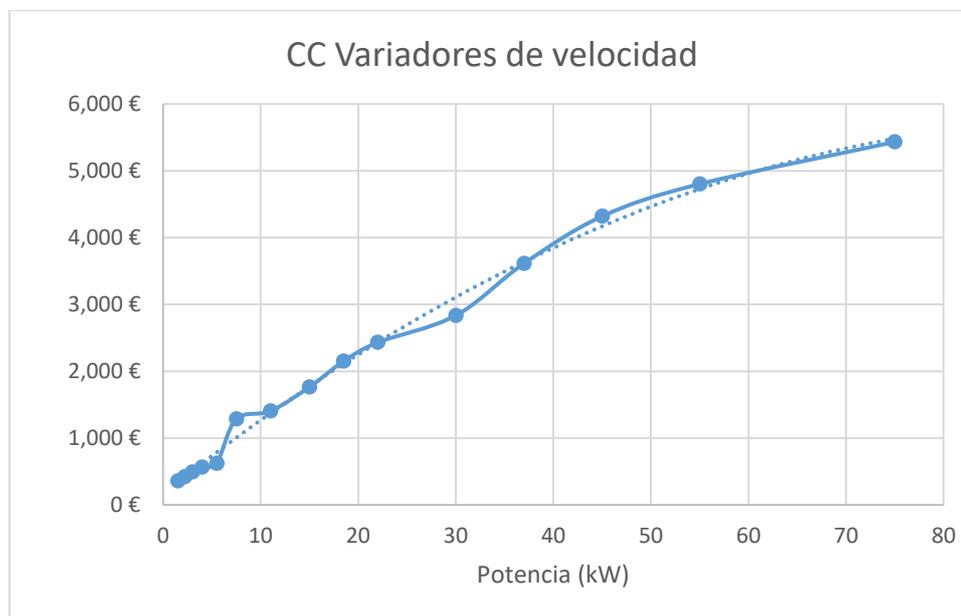


Figura 36. Grafico CC Variadores de velocidad

La potencia del motor de la bomba es de 30 kW, por lo que el costo de cada variador es de 3.107,62 €. El precio y número de los variadores de velocidad se tendrán en cuenta solo en los métodos donde sean necesarios utilizarlos.

5.5.3 Costo de tubería y accesorios

Dentro de los costos de inversión para la implementación de una estación de bombeo, está la compra de tubería y accesorios necesarios para el correcto transito del agua, desde la entrada a la estación de bombeo, hasta la salida.

El material de la tubería y accesorios es de fundición dúctil. Aparte de la tubería, los accesorios tenidos en cuenta en el presente apartado son las tees y los codos. El número de codos según la Figura 17, serán en todo momento dos, en cambio el número de tees necesarias son: para solo una unidad de bombeo no sería necesaria ninguna pero para

Nb + 1 unidades de bombeo, el número de tees corresponde a dos veces la resta entre el número de bombas menos uno. ($2 \times (Nb-1)$).

Los precios tomados del mercado para poder realizar las respectivas regresiones, variaban entre 60mm y 500mm. De los cuales se llegaron a las siguientes ecuaciones polinómicas de segundo grado:

$$F_{Tee}(\text{€}) = 144.24 - 1.7447 * D_n + 0.0125 * D_n^2 \quad (18)$$

$$F_{codo}(\text{€}) = 269.49 - 4.2252 * D_n + 0.0202 * D_n^2 \quad (19)$$

$$F_{tuberia}(\text{€}) = 8.009 - 0.1497 * D_n + 0.0004 * D_n^2 \quad (20)$$

Donde D_n es el diámetro nominal de los accesorios en milímetros. La Ecuación (18), (19) y (20) tienen un coeficiente de determinación de 0.97, 0.98 y 0.99, respectivamente. La selección del diámetro correspondiente a n_1-3 y n_2 se realiza en base a considerar que cada bomba trasiega aproximadamente el caudal óptimo y que se debe seleccionar una velocidad de diseño.

Ahora en la Figura 37, Figura 38 y Figura 39 se ilustran las curvas de coste de los accesorios:

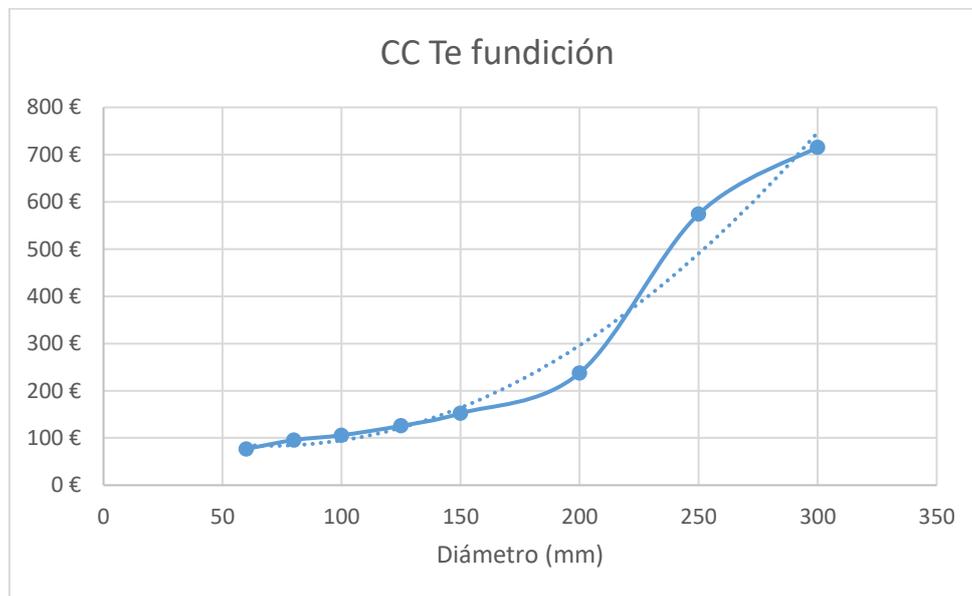


Figura 37. Gráfico CC Tee

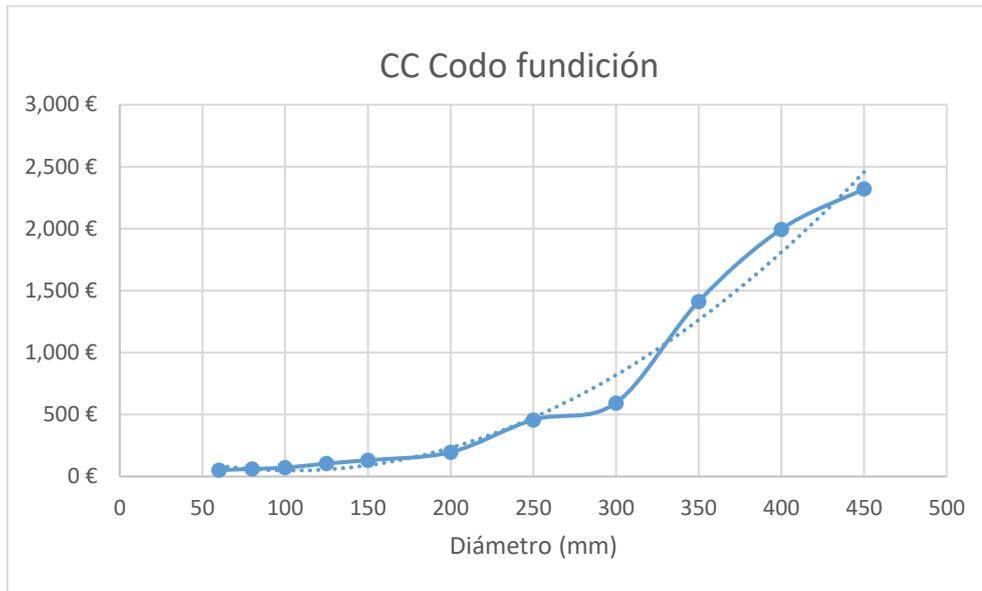


Figura 38. Gráfico CC Codo

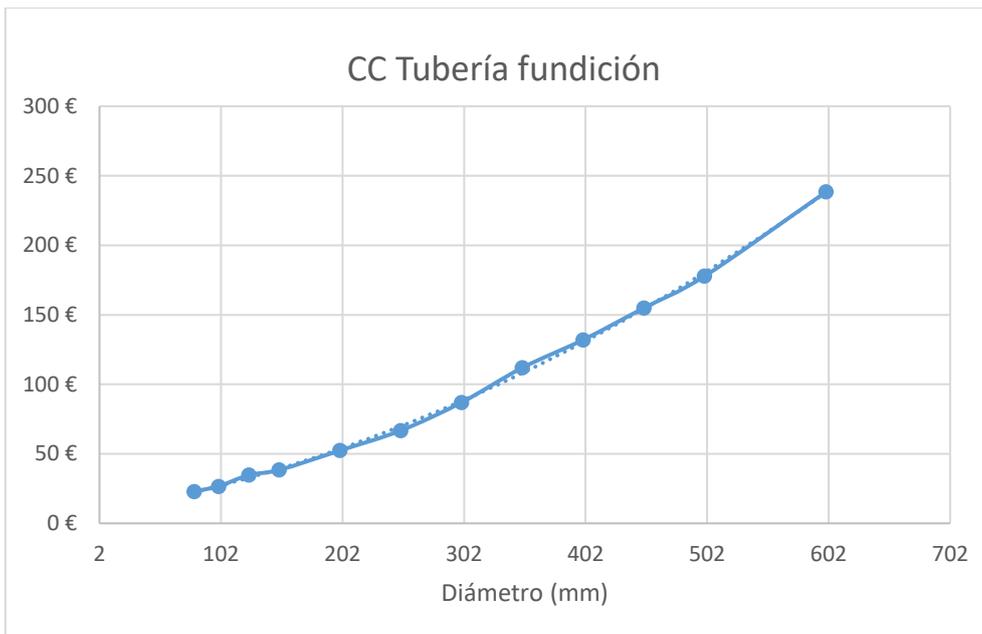


Figura 39. Gráfico CC tubería

Ahora en la se muestran los parámetros de diseño correspondientes al dimensionamiento de la Figura 17, donde está la velocidad máxima de diseño y valores para n_1 , n_2 y n_3 .

Tabla 25. Parámetros de diseño de EB

	PUNTO DE SUMINISTRO			
	PS1	PS2	PS3	PS4
V máx. (m/s)	2.00	2.00	2.00	2.00
n1	20	20	15	20
n2	60	60	60	60
n3	10	15	10	15

Sabiendo que:

$$Q = V * \frac{\pi * D^2}{4} \quad (21)$$

Es posible mediante la ecuación (21) hallar el valor del diámetro de la tubería n1-3 y n2. Sabiendo que el caudal para n1-n3 es igual al caudal máximo de suministro y el caudal para n2 es el caudal máximo dividido el número de bombas.

Aplicando la ecuación (21), para el ejemplo que se está realizando, el diámetro n1-3 y n2 aproximado al valor superior comercial es igual a 250 mm y 125 mm respectivamente.

Hallados los datos necesarios para calcular el costo de la tubería y accesorios. Aplicándolos a las ecuaciones (18), (19) y (20). Da como resultado 3.454,34€ para las tuberías y 3.887,27€ los accesorios.

Para el ejemplo realizado, el modelo tipo de la estación de bombeo de la Figura 17, da como resultado la Figura 40:

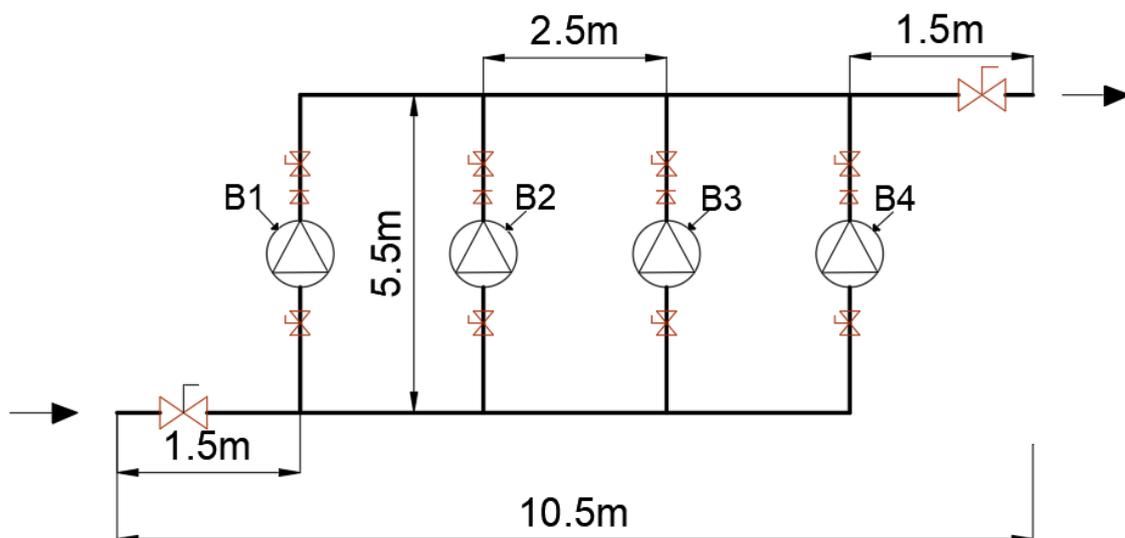


Figura 40. Esquema tipo de ejemplo

5.5.4 Costos de válvulas

Las válvulas que se tienen en cuenta en el presente apartado son las válvulas de seccionamiento y las válvulas de retención, según se muestra en la Figura 17. El número de válvulas de retención es igual al número total de bombas, con un diámetro correspondiente al de la tubería n_1 o n_3 . Por otra parte, el número de válvulas de seccionamiento, son igual a dos veces el número de bombas con diámetro n_1 o n_3 más otras dos válvulas cada una ubicada en la entrada y salida de los equipos de bombeo, con un diámetro de la tubería n_2 .

Las dos curvas de costo resultantes para cada tipo de válvula, fueron calculadas mediante la regresión aplicada a los valores representativos del mercado. Los datos tomados corresponden a válvulas de fundición dúctil. Ambas ecuaciones tienen como termino dependiente el diámetro expresado en milímetros.

Las ecuaciones de costo que se representa de forma más aproximada al realizar las regresiones, son polinómicas de segundo grado, teniendo como resultado un coeficiente de determinación igual a 0.99.

$$F_{\text{válvula secc.}}(\text{€}) = 11.818 + 1.5268 * D_n + 0.0103 * D_n^2 \quad (22)$$

$$F_{\text{válvula ret.}}(\text{€}) = 14.551 + 0.2485 * D_n + 0.0057 * D_n^2 \quad (23)$$

Donde D_n corresponde al diámetro nominal de la válvula expresado en milímetros. El diámetro de la válvula es igual al diámetro de la tubería a la que esta corresponda.

Como resultado de las curvas de costo de las válvulas, resultan la Figura 41 y Figura 42.

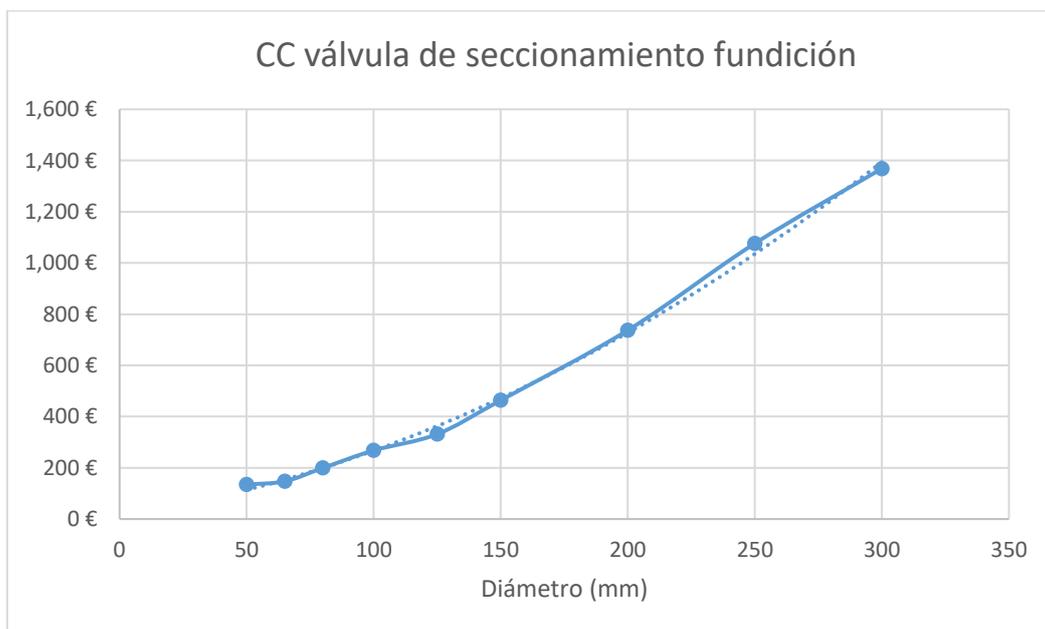


Figura 41. Gráfico CC válvula de seccionamiento fundición

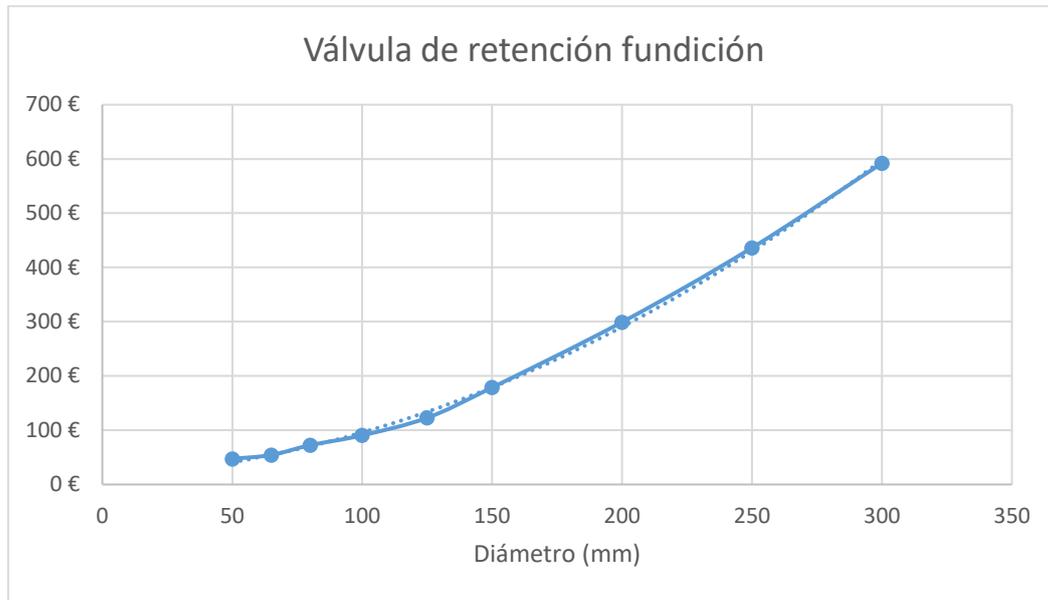


Figura 42. Grafico Válvula de retención fundición

Ahora, con los diámetros de las tuberías definidos, es posible determinar el costo de las válvulas de seccionamiento y retención, aplicando las ecuaciones número (22) y (23). Dando como resultado un valor de 3.726,94€ y 538,70€ respectivamente.

5.5.5 Costo equipos de medición y regulación

Los equipos de medición y regulación son elementos que complementan el proceso de regulación de 6 de los 7 métodos propuestos. Los equipos que se evalúan para desarrollar la metodología son: Presostato, Transductor de presión, caudalímetro y controlador lógico programable (PLC).

En la Tabla 26 se muestra en que métodos de regulación se usan cada uno de los elementos de medición y control:

Tabla 26. Elementos de medición y control

	Presostato	Transductor de presión	Caudalímetro	PLC
BVF	X	X	X	X
BVF + P	✓	X	X	X
BVF + Q	X	X	✓	✓
BVV + P	X	✓	X	X
BVV + Q	X	X	✓	✓
BVF + BVV - P	X	✓	X	✓
BVF + BVV - Q	X	X	✓	✓

El único elemento de medición y/o programación que tiene una curva de costo, es el caudalímetro. Los elementos restantes tienen un costo fijo.

La curva de costo correspondiente al caudalímetro viene dada por una regresión hecha a los datos representativos del mercado, variando diámetros entre 50 mm y 300mm. La ecuación resultante es polinómica de segundo grado. Teniendo un coeficiente de determinación de 0.99.

$$F_{caudalimetro}(\text{€}) = 716.64 - 7.9118 * D_n + 0.0509 * D_n^2 \quad (24)$$

donde D_n es el diámetro nominal del caudalímetro en milímetros. Al remplazar el diámetro de la tubería n1-3 (250 mm), da como resultado 1.919,94 €.

En la xxx se ilustra la curva de costo aproximada a los valores reales:

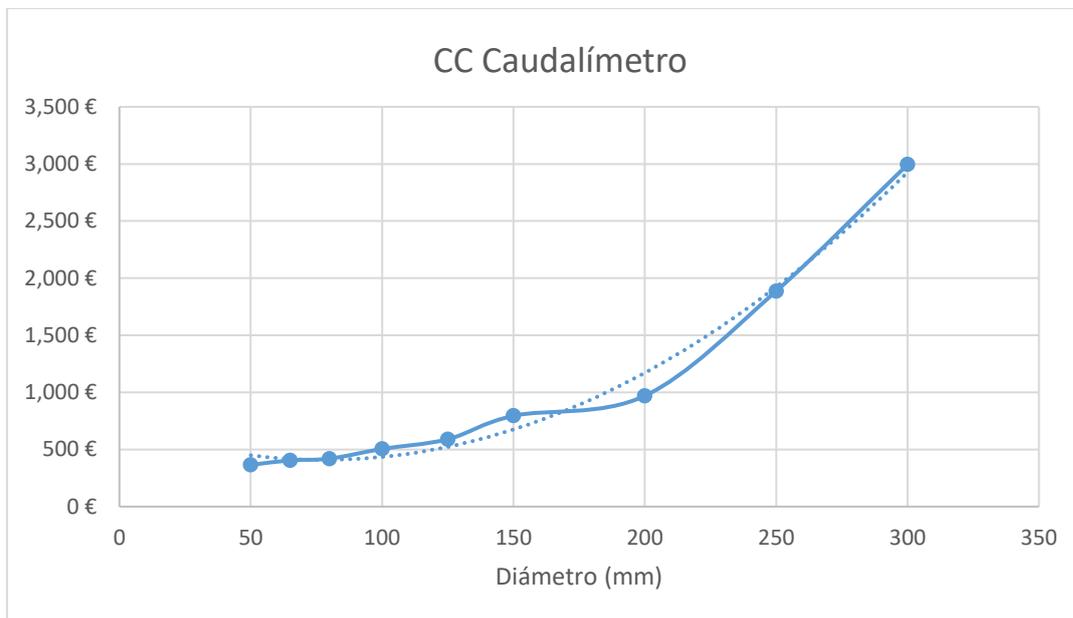


Figura 43. Grafico CC Caudalímetro

El precio del mercado de un presostato promedio, de características generales, es de 84.71 €. El de un transductor de presión aproximadamente de 570 € y el de un PLC 372,44 €.

Una vez halladas todas las curvas de costos, con ayuda del algoritmo desarrollado, es posible calcular simultáneamente el costo de operación e inversión, para cada una de las distintas posibilidades.

5.6. Cálculo y análisis de las soluciones óptimas

Así como se halló el costo de operación e inversión para el modelo de bomba número 33 en el punto de suministro PS1, se debe hallar los costos de cada uno de los modelos de bombas de la Tabla 8, Tabla 9,



Tabla 10 y Tabla 11.

Es importante poder desarrollar este trabajo de forma automática y menos mecánica. Por lo que el algoritmo desarrollado es capaz de calcular los modelos de bombas capaces de suministrar las condiciones hidráulicas del sistema, calcular el costo de operación según sea el caso y calcular el costo de inversión de cada una de las posibles soluciones. Para de esta forma poder analizar los datos y por medio del concepto de óptimos de Pareto, descartar unas soluciones sobre otras.

El procedimiento para seleccionar cuales son las soluciones dominadas y cuales las dominadoras, parte del fundamento de que una solución es dominadora siempre y cuando los valores de la solución dominada sean mayores en la coordenada X (costo de operación) y coordenada Y (costo de inversión).

5.6.1 Óptimos de Pareto – Punto de suministro PS1

En el primer punto de suministro, según la Tabla 8 hay siete modelos que cumplen con las condiciones hidráulicas, de los cuales tres quedan descartados por tener 10 o más unidades de bombeo. Por lo tanto, el total de modelos a evaluar son cuatro, donde en total se desprenden 65 posibles soluciones, teniendo en cuenta cada uno de los métodos de regulación.

Dentro de las 65 posibles soluciones, se descartan 35 soluciones dominadas sobre las dominadoras. Resultando 30 soluciones óptimas teniendo en cuenta todos los métodos de regulación.

Ahora se presenta las distintas fronteras de Pareto, resultantes de cada método de regulación.

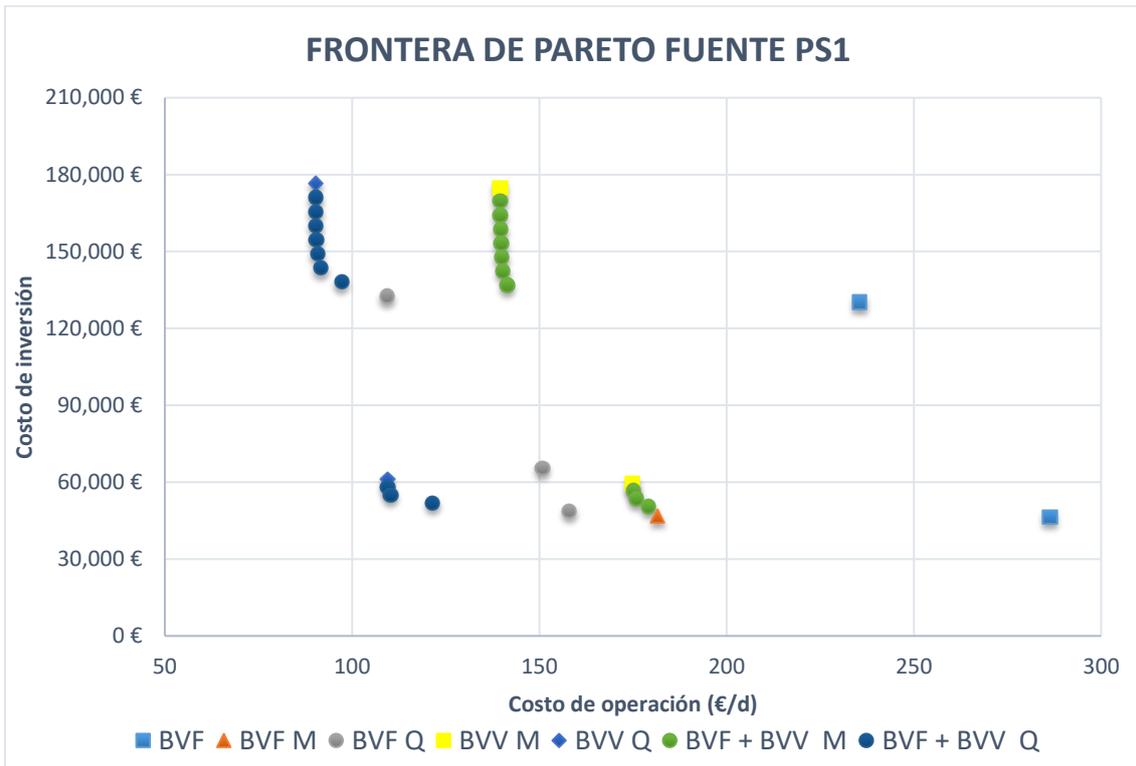


Figura 44. Frontera de Pareto fuente PS1

Al hacer un análisis más concreto, se plantea hacer una frontera de Pareto general, donde se descarten las soluciones dominadas. Resultando así en el siguiente Pareto global.

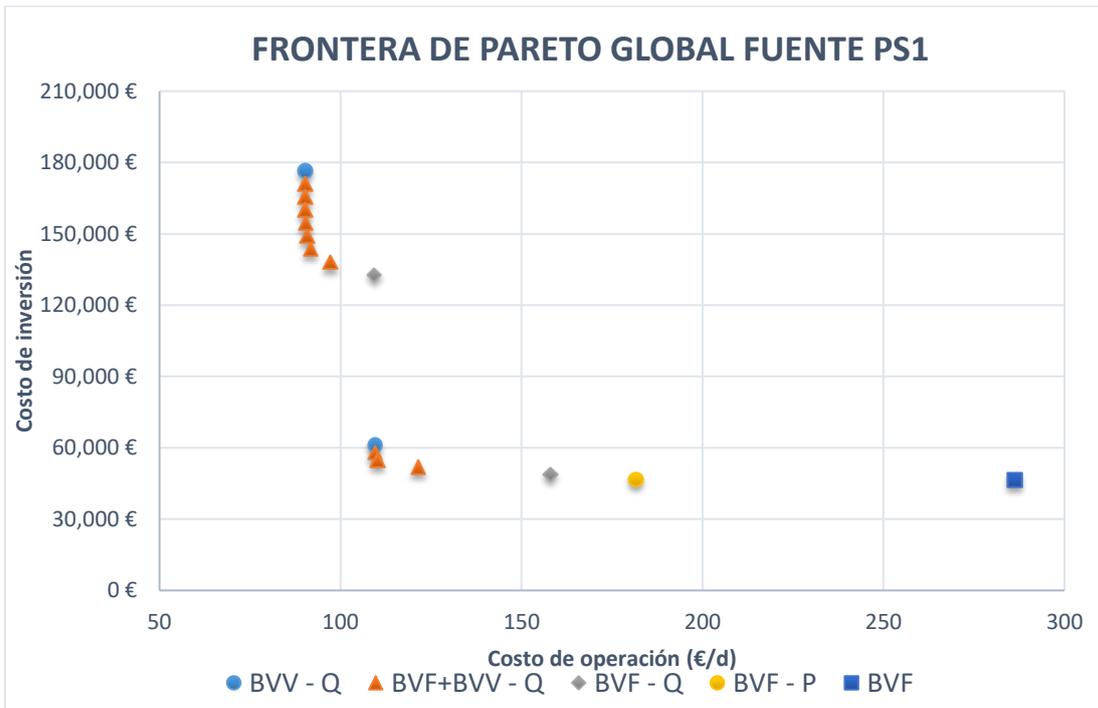


Figura 45. Frontera de Pareto global fuente PS1

De las 30 soluciones óptimas, aplicando el concepto de Pareto sobre esos datos, da como resultado la Figura 45. Donde se ve reducido a 15. En la Tabla 27 se muestran las características de las soluciones encontradas con el número del modelo de la bomba seleccionada, su modo de regulación, el número de bombas de velocidad fija y variable y los costos de operación e inversión.

Tabla 27. Tabla de soluciones global – PS1

TABLA DE SOLUCIONES GLOBAL – PS1						
Método Reg.	N bombas	BVF	BVV	Modelo	C OP (€/d)	C INV (€)
BVV - Q	8	0	8	56	90.30 €	176,418.46 €
BVF+BVV - Q	8	1	7	56	90.31 €	170,937.83 €
BVF+BVV - Q	8	2	6	56	90.32 €	165,457.20 €
BVF+BVV - Q	8	3	5	56	90.33 €	159,976.58 €
BVF+BVV - Q	8	4	4	56	90.45 €	154,495.95 €
BVF+BVV - Q	8	5	3	56	90.83 €	149,015.32 €
BVF+BVV - Q	8	6	2	56	91.73 €	143,534.69 €
BVF+BVV - Q	8	7	1	56	97.29 €	138,054.07 €
BVF - Q	8	8	0	56	109.37 €	132,573.44 €
BVV - Q	4	0	4	33	109.50 €	61,123.25 €
BVF+BVV - Q	4	1	3	33	109.54 €	58,015.63 €
BVF+BVV - Q	4	2	2	33	110.34 €	54,908.01 €

Tabla 28. Tabla de soluciones global – PS1 Continuación

TABLA DE SOLUCIONES GLOBAL – PS1						
Método Reg.	N bombas	BVF	BVV	Modelo	C OP (€/d)	C INV (€)
BVF+BVV - Q	4	3	1	33	121.52 €	51,800.39 €
BVF - Q	4	4	0	33	158.05 €	48,692.77 €
BVF - P	4	4	0	33	181.60 €	46,739.23 €
BVF	4	4	0	33	286.34 €	46,400.39 €

En los datos de la Tabla 27 y Tabla 28, se muestra como el valor del costo de operación va aumentando, mientras que el costo de inversión va disminuyendo. De esta forma se garantiza que todos los datos hallados resulten siendo soluciones dominadoras. Por lo tanto, óptimos de Pareto.

De los 4 modelos que cumplían con las características hidráulicas y de diseño, al final, después de realizar los cálculos necesarios y descartar las soluciones dominadas, quedan los modelos 33 y 56. De las 16 soluciones, cabe resaltar que el modo de regulación más frecuente es mediante el uso de bombas de velocidad variable. Así mismo, el modo de medición más adecuado para llevar a cabo la regulación, resulta siendo el caudalimétrico.

En un extremo de las soluciones, está el método de regulación más sofisticado, el cual, al contar con un número mayor de BVV, garantiza una mayor regulación. Así mismo

resulta ser el método con el costo de inversión más elevado. Por otro lado, en el otro extremo se encuentra la solución más sencilla de implementar, el cual está compuesto por BVF y ningún tipo de medición. Esta solución, como se había expuesto en el apartado 3, da como resultado el costo de operación más elevado, pero a su vez el costo de inversión más bajo.

5.6.2 Óptimos de Pareto – Punto de suministro PS2

Al tener unas condiciones hidráulicas menos restrictivas que el punto de suministro PS1, más son los modelos de bombas que cumplen con los requerimientos de la red. Para este caso, si se mira la Tabla 9, son 11 los modelos que cumplen. Sin embargo, uno de estos queda por fuera de todo análisis al contar con 16 bombas.

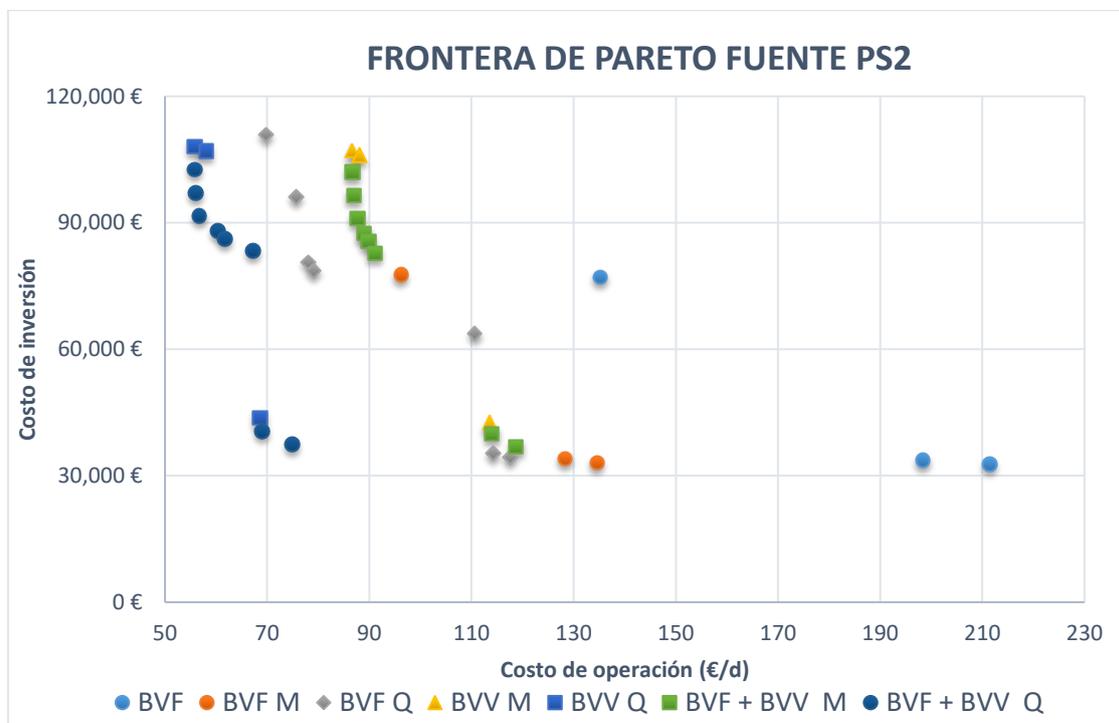


Figura 46. Frontera de Pareto fuente PS2

De los 10 modelos de bombas, se desprenden 153 posibles soluciones, teniendo en cuenta cada modo de regulación. Luego aplicando el concepto de óptimo de Pareto, se reducen a 35 soluciones óptimas, mostrando la frontera de Pareto resultante para cada modo de regulación en la Figura 46.

Luego, de calcular las opciones de cada modo de regulación, se halla una frontera de Pareto general. Dando como resultado final, 15 soluciones óptimas, las cuales se muestran en la Figura 47.

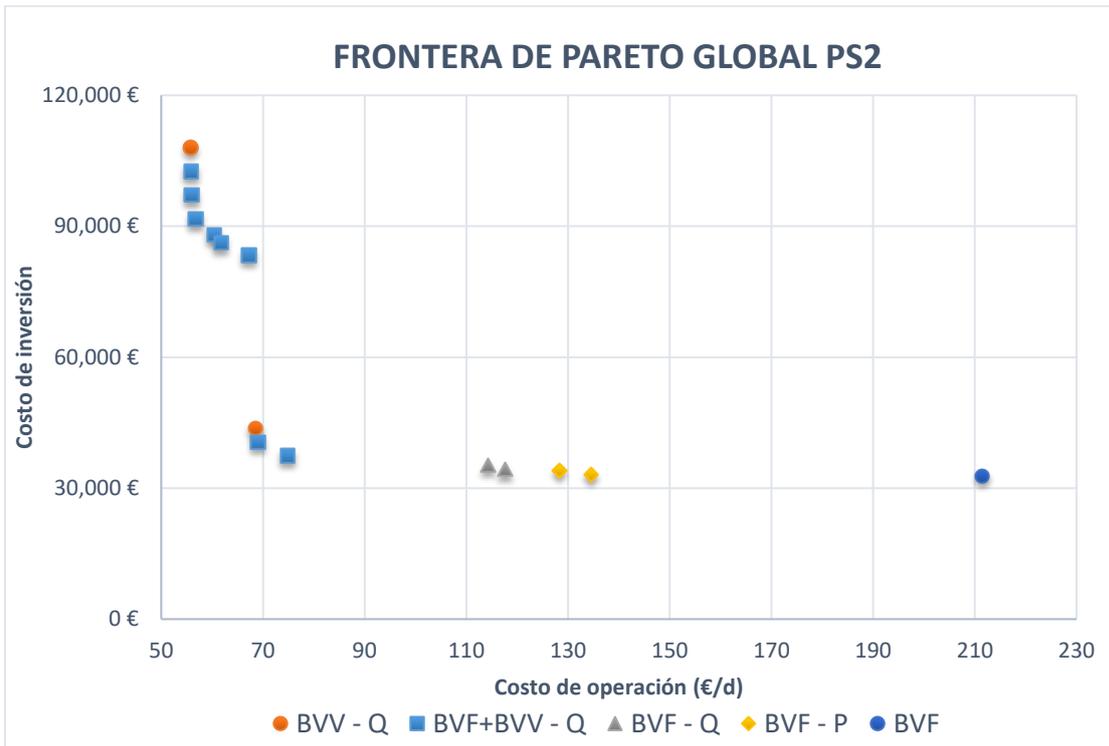


Figura 47. Frontera de Pareto global fuente PS2

Ahora en la siguiente tabla, se presentan una descripción más general de todas las soluciones encontradas.

Tabla 29. Tabla de soluciones global - PS2

TABLA DE SOLUCIONES GLOBAL – PS2						
Método Reg.	N bombas	BVF	BVV	Modelo	C OP (€/d)	C INV (€)
BVV - Q	5	0	5	56	55.85 €	108,049.18 €
BVF+BVV - Q	5	1	4	56	55.90 €	102,568.55 €
BVF+BVV - Q	5	2	3	56	55.98 €	97,087.92 €
BVF+BVV - Q	5	3	2	56	56.79 €	91,607.30 €
BVF+BVV - Q	6	4	2	45	60.39 €	88,051.57 €
BVF+BVV - Q	5	4	1	56	61.82 €	86,126.67 €
BVF+BVV - Q	6	5	1	45	67.23 €	83,323.96 €
BVV - Q	3	0	3	33	68.59 €	43,636.96 €
BVF+BVV - Q	3	1	2	33	69.03 €	40,529.34 €
BVF+BVV - Q	3	2	1	33	74.89 €	37,421.72 €
BVF - Q	4	4	0	21	114.35 €	35,238.58 €
BVF - Q	3	3	0	33	117.65 €	34,314.10 €
BVF - P	4	4	0	21	128.36 €	34,034.70 €
BVF - P	3	3	0	33	134.58 €	33,025.51 €
BVF	3	3	0	33	211.50 €	32,771.38 €

Los óptimos de Pareto calculados en la Tabla 29, muestran una variación en los costos de operación que van de 55.85 € hasta 211.50 €, es decir 3.8 veces. Mientras que el



costo de inversión varía entre 32.771,38 € hasta 108.049,18 €, equivalente a 3.3 veces el valor.

Dentro de los modos de regulación hallados, quedan 2 descartados, que son BVV – P y BVF + BVV – P. Los otros métodos cuentan desde una opción hasta ocho. Siendo el método de BVF + BVV – Q el que más.

Es importante ver como con este cálculo, se llevó de tener 153 posibles soluciones a encontrar las 15 soluciones más óptimas. Resultando ser una reducción de aproximadamente un 90% de las soluciones.

El cambio más notable en los resultados se ve cuando el costo de inversión pasa del modelo 33 al 45, resultando casi el doble de costo de inversión, por un ahorro de poco más de un euro. Es importante al momento de seleccionar la opción más viable, mirar las condiciones externas al diseño de la estación, como lo es el presupuesto disponible o el espacio donde se quiera implantar.

5.6.3 Óptimos de Pareto – Punto de suministro PS3

En el punto de suministro PS3, hay en total 5 modelos de bombas que cumplen las condiciones hidráulicas requeridas. Aunque este punto de suministro tiene una altura piezométrica (90.29m) más exigente que el punto PS1 (87.52m), al tener una demanda de caudal menor, hace que haya un mayor número de bombas que no queden restringidas al parámetro de diseño ($N_b < 10$).

Desarrollando la metodología sobre este punto, se encuentra un total de 65 soluciones posibles, entre los modelos de bombas y métodos de regulación. De los cuales 28 resultan conformando las fronteras de Pareto de cada uno de los métodos de regulación. Los métodos que más opciones tiene son los de regulación combinada entre bombas de velocidad fija y variable. Esto, debido que para un número N de bombas, hay mayor combinación entre BVF y BVV, que solo los métodos que cuentan con solo BVF o BVV.

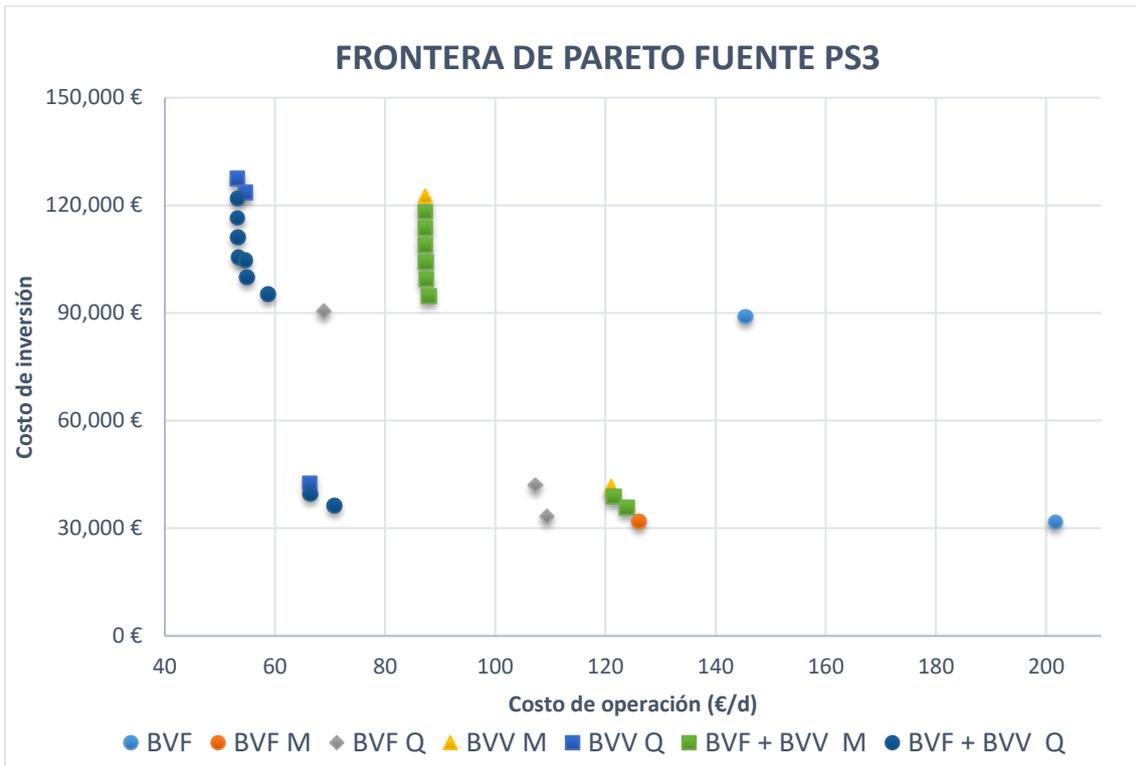


Figura 48. Frontera de Pareto fuente PS3

Dentro de los 28 puntos que conforman las fronteras de Pareto, se encuentran los siete métodos de regulación propuestos, unos con más posibles soluciones que otros. Ahora dentro de los datos de la Figura 48, se desprende una frontera de Pareto global, descartando así las soluciones dominadas.

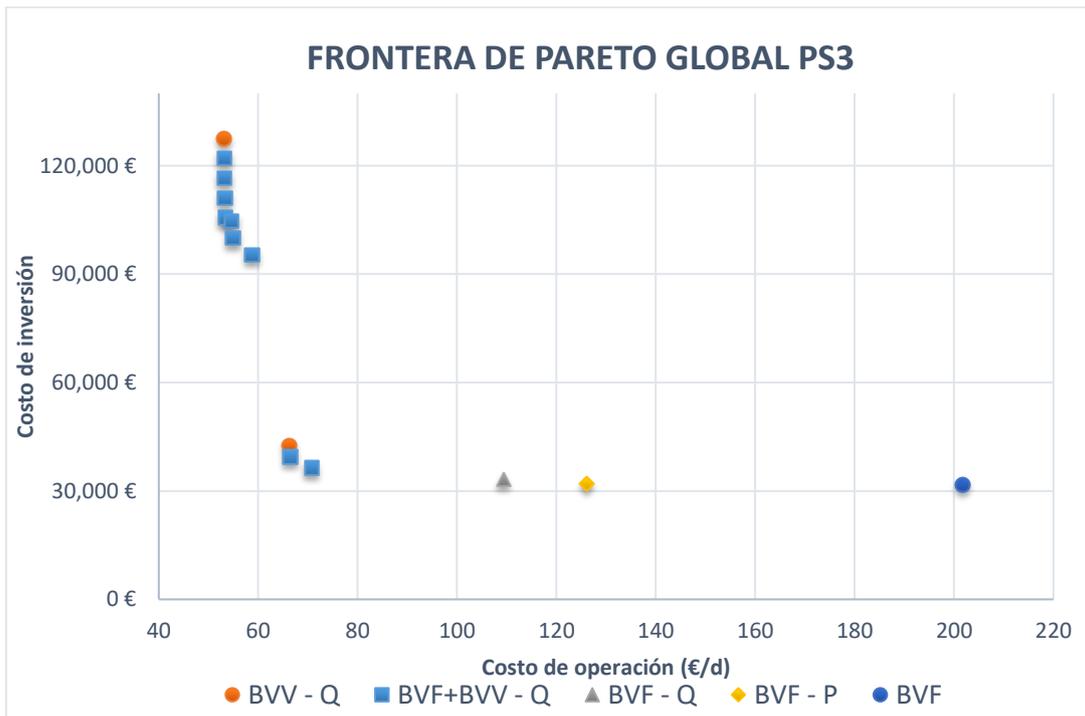


Figura 49. Frontera de Pareto global fuente PS3

En la Figura 49 se muestran las soluciones óptimas finales, que en total suman 14 posibles combinaciones entre métodos de regulación y modos de medición. En la Tabla 30 se muestra una descripción más específica de cada una de las soluciones en cuestión.

Tabla 30. Tabla de soluciones global - PS3

TABLA DE SOLUCIONES GLOBAL – PS3						
Método Reg.	N bombas	BVF	BVV	Modelo	C OP (€/d)	C INV (€)
BVV - Q	6	0	6	56	53.21 €	127,478.64 €
BVF+BVV - Q	6	1	5	56	53.22 €	121,998.02 €
BVF+BVV - Q	6	2	4	56	53.25 €	116,517.39 €
BVF+BVV - Q	6	3	3	56	53.29 €	111,036.76 €
BVF+BVV - Q	6	4	2	56	53.43 €	105,556.13 €
BVF+BVV - Q	7	4	3	45	54.65 €	104,662.04 €
BVF+BVV - Q	7	5	2	45	54.93 €	99,934.43 €
BVF+BVV - Q	7	6	1	45	58.78 €	95,206.82 €
BVV - Q	3	0	3	33	66.35 €	42,557.30 €
BVF+BVV - Q	3	1	2	33	66.45 €	39,449.68 €
BVF+BVV - Q	3	2	1	33	70.78 €	36,342.06 €
BVF - Q	3	3	0	33	109.40 €	33,234.44 €
BVF - P	3	3	0	33	126.10 €	31,945.85 €
BVF	3	3	0	33	201.70 €	31,691.72 €

Al final de los cálculos, dentro de las soluciones dominadoras, se encuentran 3 modelos de bombas distintos, quedando descartados los modelos 11 y 21. El costo más bajo de operación se logra con 6 BVV del modelo 56, logrando un costo por día de operación de 53.21 €, aunque esto implica realizar una inversión de 127.478,64 €. En el otro extremo, el costo de inversión más bajo lo logra el modelo 33 con 3 BVF, dando como resultado un costo de operación igual a 201.70 € y de inversión igual a 31.691,72 €. Como es de esperar ninguno de los extremos será la solución más viable, pues mientras que uno exige un costo de inversión considerablemente alto (BVV), el otro (BVF) al no regular, obtendrá un costo de operación elevado.

Es importante precisar que de 65 posibles soluciones al punto de suministro PS3, se llega a obtener 14. Resultando así una reducción del 78%. Así mismo se nota bastante la diferencia del costo de operación entre regular y no hacerlo, viendo que de tener el mismo modelo de bomba (33), con tan solo hacer uso de presostatos, se pasa de 201.70 € a 126.10 €, significando una reducción del 37%.

5.6.4 Óptimos de Pareto – Punto de suministro PS4

El punto de suministro PS4 al ser el menos restrictivo, es el que más cuenta con distintos modelos de bomba como posible solución a sus requerimientos hidráulicos, siendo en total 12. De los cuales, queda por fuera el modelo 20 al tener 10 bombas en total.

En total, el número de opciones posibles es de 115. Ahora, aplicando el concepto de óptimos de Pareto, se reduce a 34. En la Figura 50 se ven las fronteras de los distintos modos de regulación, distribuidas entre los 34 puntos óptimos.

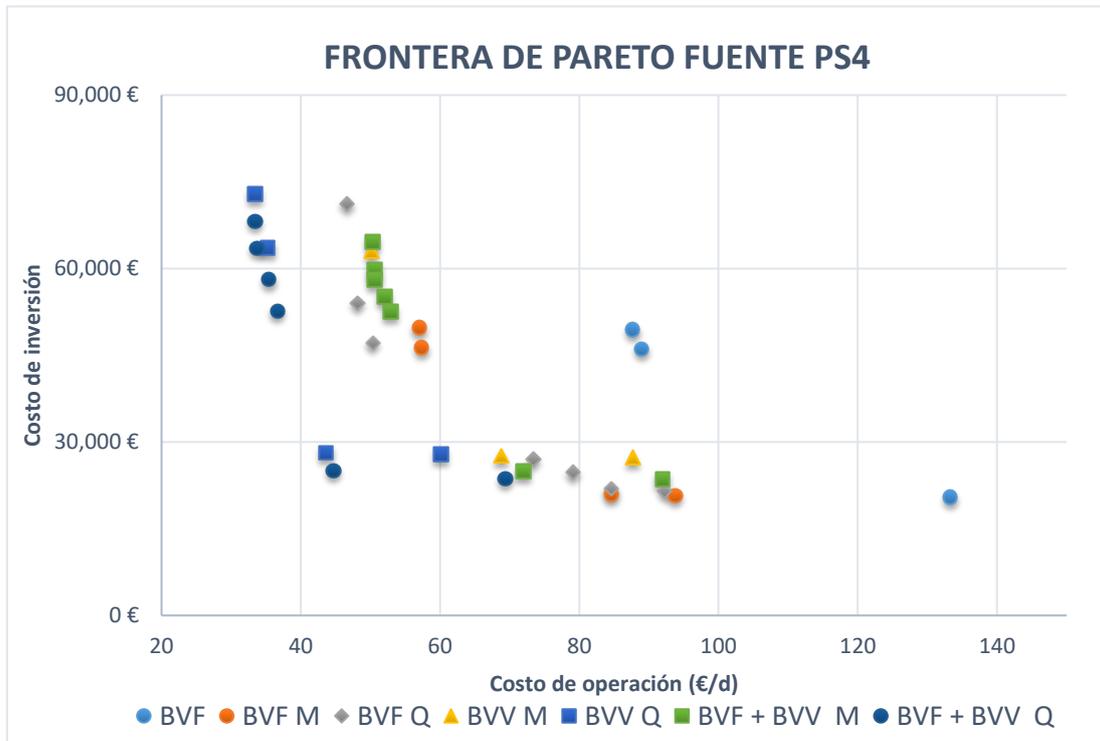


Figura 50. Frontera de Pareto fuente PS4

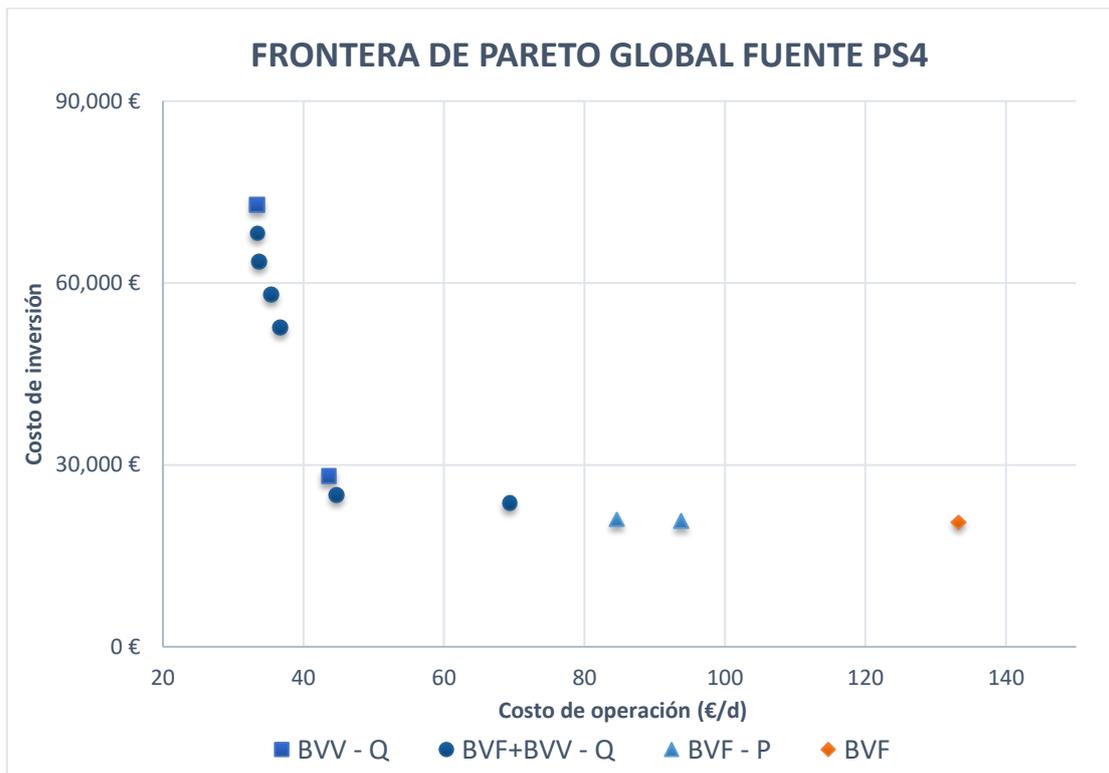


Figura 51. Frontera de Pareto global fuente PS4

Luego de hallar los óptimos de Pareto para cada modo de regulación, al igual que los otros puntos de suministro, se calcula una frontera de Pareto global (Figura 51). Reduciendo el total de soluciones óptimas de 34 a 11.

En la Tabla 31, se muestra las características generales de los 11 óptimos hallados previamente.

Tabla 31. Tabla de soluciones global - PS4

TABLA DE SOLUCIONES GLOBAL – PS4						
Método Reg.	N bombas	BVF	BVV	Modelo	C OP (€/d)	C INV (€)
BVV - Q	4	0	4	55	33.44 €	72,908.05 €
BVF+BVV - Q	4	1	3	55	33.45 €	68,180.45 €
BVF+BVV - Q	4	2	2	55	33.71 €	63,452.84 €
BVF+BVV - Q	3	1	2	56	35.42 €	58,101.27 €
BVF+BVV - Q	3	2	1	56	36.68 €	52,620.64 €
BVV - Q	2	0	2	33	43.63 €	28,117.03 €
BVF+BVV - Q	2	1	1	33	44.72 €	25,009.41 €
BVF+BVV - Q	3	2	1	11	69.37 €	23,631.31 €
BVF - P	2	2	0	33	84.65 €	21,023.65 €
BVF - P	3	3	0	11	93.85 €	20,728.69 €
BVF	3	3	0	11	133.31 €	20,474.56 €

De los 11 modelos de bombas iniciales, al final quedan 4 como posibles soluciones óptimas. Así mismo, de los 7 modos de regulación expuestos en la metodología para este punto de suministro, quedan 3 descartados.

El punto de suministro PS4 al tener mayores opciones de cálculo, fue el que tuvo una mayor depuración de soluciones, pasando de 115 a tan solo 11, significando una reducción de más de un 90% de las soluciones posibles.

Como resumen de las soluciones posibles, frente a las soluciones óptimas, se presenta la Tabla 32, donde se muestra el porcentaje de reducción en la depuración de soluciones:

Tabla 32. Resultados de las soluciones

	PUNTO DE SUMINISTRO			
	PS1	PS2	PS3	PS4
Soluciones posibles	65	153	65	115
Soluciones óptimas	16	15	14	11
% de reducción	75%	90%	78%	90%

Ahora en el siguiente apartado se sacarán unas conclusiones generales de los resultados obtenidos en cada uno de los puntos de suministro

5.6.5 Análisis de resultados

Hay varios puntos en común dentro de los resultados obtenidos en los cuatro puntos de suministro de la red TF. Dentro de los modos de regulación obtenidos como soluciones óptimas, no aparecen dos de ellos. Los cuales son $BVV - P$ y $BVF + BVV - P$. Esto se debe porque al ser la curva de modulación tan idéntica entre todos los puntos de suministro, esta tenía una forma tal que, para el caudal demandado en cada momento, la altura piezométrica suministrada era mayor que los demás métodos de regulación (ver Figura 29). Aunque estos métodos de regulación no aparezcan como una solución óptima, no significa que deban ser descartados del todo, pues el comportamiento de cada red es completamente diferente.

Los resultados obtenidos comprueban las premisas que se tenían al inicio del trabajo. Donde el método BVF cuya regulación es nula, tiene el costo de operación más elevado, aunque el costo de inversión más bajo. Por otra parte, el método $BVV - Q$, al tener una mayor capacidad de regulación, tiene el menor costo de operación, pero a su vez el costo de inversión más elevado. Es por esto que cada uno de estos métodos se encuentra en los extremos de las fronteras de Pareto de todos los puntos de suministro evaluados.

Dentro de todos los resultados obtenidos, prevalece el método de medición caudalimétrico por encima del piezométrico. Esto se observa en mayores rasgos cuando el costo de operación va disminuyendo. Esto debido que el planteamiento que se hizo de los métodos de regulación, la medición caudalimétrica hacía que la curva motriz estuviera más cerca de la curva se consigna, haciendo que el costo de operación sea más bajo. En sentido contrario, la medición piezométrica junto con BVF, al no invertir en variadores de velocidad, hace que se encuentre en la parte más baja de los costos de inversión.

En los puntos de suministro evaluados, se dan casos donde al invertir un variador de velocidad más, al mismo modelo y método de regulación, hace que el costo de operación se reduzca en céntimos de euro. Es allí donde es necesario realizar un estudio de valor detallado, y mirar en cuanto tiempo puede ser amortizado el costo de uno o más variadores, respecto al ahorro que se vaya a tener en la energía. Sabiendo que los variadores cuestan en algunos ejemplos miles de euros. Por otra parte, se da el caso en el que por invertir unos cientos de euros más en el modo de regulación, se puede ahorrar más de un 30% del costo de operación.

Es importante resaltar como de tener hasta más de 100 posibilidades de regulación para un sistema de distribución, esta metodología puede ayudar a depurar hasta un 90% de



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

estas, dejando así a criterio tanto del diseñador como de la entidad a cargo de la red, poder decidir cuál de ellas sea la mejor alternativa.

Para cualquier catálogo de bombas, entre más restrictiva sea la altura piezométrica de la curva de consigna, menos opciones a regular se tendrán. Por tanto, es necesario contar con una gama amplia de bombas para así poder tener mayores opciones a evaluar. Sin embargo, entre mayor sea el rango de caudales, habrá un mayor número de bombas, por lo tanto, el número de opciones de regulación será más amplio.

De las soluciones finales halladas, se encuentra una variación entre los extremos de los costos de operación e inversión de hasta cuatro veces. Esto hace que escoger uno de ellos no sea la opción más viable. Por esto que es recomendable escoger una solución más equilibrada, teniendo en cuenta factores como el espacio libre para la disposición de los equipos de bombeo o aún más importante, el presupuesto disponible tanto de inversión como de operación.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

Se ha planteado una metodología que permite buscar el diseño óptimo de una estación de bombeo, teniendo en cuenta no solo el modelo y características de las bombas, sino también de manera simultánea el modo de regulación. Esto se llevó a cabo, mediante la aplicación de un concepto llamado frontera de Pareto. Donde por medio de la caracterización de los costos de inversión, asociados a curvas de coste y el costo de operación, se han calculado los óptimos de Pareto. Para poder llegar hasta este punto es necesario plantear unas hipótesis de diseño y tener una información certera de las características de la red (2). Al final, desarrollando un análisis multicriterio, fue posible determinar que diseños de EB serían los más óptimos para cada uno de los puntos de suministro que componen la red en estudio, teniendo en cuenta el modelo, el número de bombas, el modo de medición y regulación.

La metodología desarrollada, aplicada al caso de estudio (red TF), permite extraer las siguientes conclusiones:

- La metodología de diseño de estaciones de bombeo considerando al mismo tiempo los costes de inversión y de explotación, asegura diseños más adecuados a las condiciones de operación de la red. Más aún, los diseños obtenidos consideran los diversos modos de operación de la EB.
- Las representaciones de los diferentes costes mediante curvas de costes se han mostrado sumamente eficaz. De hecho, la totalidad de curvas planteadas tienen coeficientes de determinación superiores a 0,95, mostrando así unos valores más cercanos a la realidad.
- El algoritmo desarrollado funciona de manera eficiente, pudiendo dar los resultados de los costos asociados, en cuestión de segundos.
- Sin duda los menores costes de inversión son los asociados a las soluciones que no emplean modo de regulación alguno. Sin embargo, el costo de operación asociado a este, resulta ser el más elevado. De la misma forma, los métodos de regulación caudalimétricos, tienen un menor coste de operación que los manométricos.
- Al construir la frontera de Pareto global, siempre existe solución de los diferentes modos de regulación sobre dicha frontera de Pareto. Es decir, dependiendo del peso que se de en la valoración final al coste de inversión o al coste de explotación, pueden obtenerse soluciones con prácticamente todos los modos de regulación. Esto es, en el caso de primer la inversión frente a la operación la frontera de Pareto recoge valores sin regulación o con regulaciones basadas en



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

BVF y mediciones de la presión. Por el contrario, cuando se prima más la explotación que la inversión la frontera se mueve hacia soluciones con BVV y medición de caudales.

- Las soluciones que se encuentran para cada punto de suministro son bastante diversas. No solo por el método de regulación, sino también por la magnitud de los valores encontrados. Como prueba de ello, se muestra que la diferencia entre los extremos de las fronteras de Pareto, es en algunos casos hasta cuatro veces.
- Por lo dicho anteriormente no se plantea como solución al diseño de la estación alguna opción que se encuentre en el extremo de la frontera, pues se puede incurrir en sobrecostos de inversión o por el otro lado de operación.
- De los métodos de regulación planteados, hay dos que no aparecen como solución óptima para ninguno de los casos. Estos son $BVV - P$ y $BVF + BVV - P$. Esto se puede dar, debido que la curva de modulación de todos los puntos de suministro, tienen el mismo comportamiento, por lo que las soluciones pueden ser similares en cuanto a los métodos de regulación hallados.
- Hay casos en los que la diferencia de costos de operación es de apenas un centavo de euro, sin embargo, el de inversión de miles de euros. Es allí donde se debe priorizar si se justifica realizar una inversión mucho mayor para ahorrar un dinero de operación a largo plazo.

En definitiva, la metodología desarrollada ha mostrado ser eficaz como herramienta en la decisión de las inversiones a efectuar en proyectos de diseño de estaciones de bombeo, para redes de distribución de agua. Sin duda, en cada caso las funciones de coste pueden variar, y las bases de datos de bombas pueden ser diferentes. Sin embargo, la metodología desarrollada permite obtener en todos los casos una serie de soluciones (frontera de Pareto) sobre las cuales habrá que seleccionar la solución final de diseño, dependiendo de las consideraciones del diseñador y la empresa a cargo de la operación de la EB. No está de demás decir que la solución de esta metodología no es solo un número de bombas y unas dimensiones de elementos y conducciones, sino también un modo de regulación con el que se lleva a cabo el funcionamiento de la EB.

BIBLIOGRAFÍA

- Bezerra, S. de T. M., Silva, S. A., Gomes, H. P., & Salvino, M. M. (2014). ECONOMIA DE ENERGIA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO: APLICAÇÃO DE UM SISTEMA FUZZY. *Ciência & Engenharia*, 24(1), 71–78.
- Cabrera, E., Espert, V., García, J., Martínez, J., Fuertes, V., Díaz, J., ... Iglesias, P. (1996). *Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de aguas*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Castells, X. E. (2012). *Energía, Agua, Medioambiente, territorialidad y Sostenibilidad*. Ediciones Díaz de Santos.
- Fitch, E. C., & Hong, I. T. (1998). *Hydraulic component design and selection*. BarDyne.
- Fuertes, V. S., García-Serra, J., Iglesias, P. L., López, G., Martínez, F. J., & Pérez, R. (2002). Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua. *Fluid Mechanics Group, Polytechnic University of Valencia, Spain*.
- HOMOGÉNEA, C. (2013). 9.2. SECTORIZACIÓN DE INSTALACIONES POR SECTORES DE. *Manual de Auditorías Energéticas En Comunidades de Regantes*, 111.
- Jones, G. M., Bosserman, B. E., Sanks, R. L., & Tchobanoglous, G. (2006). *Pumping station design*. Gulf Professional Publishing.
- Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., Heald, C. C., & others. (2001). *Pump handbook* (Vol. 3). McGraw-Hill New York.
- Leese, M., & Meisch, S. (2015). Securitising sustainability? Questioning the 'water, energy and food-security nexus'. *Water Alternatives*, 8(1).
- León-Celi, C., Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Mora-Melia, D. (2016). A Methodology for the Optimization of Flow Rate Injection to Looped Water Distribution Networks through Multiple Pumping Stations. *Water*, 8(12), 575.
- Marchionni, V., Cabral, M., Amado, C., & Covas, D. (2016). Estimating water supply infrastructure cost using regression techniques. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(4), 4016003.
- Moreno, M. A., Carrion, P. A., Planells, P., Ortega, J. F., & Tarjuelo, J. M. (2007). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosystems Engineering*, 98(4), 479–486.
- Planells Alandi, P., Carrión Pérez, P., Ortega Álvarez, J. F., Moreno Hidalgo, M. Á., & Tarjuelo Martín-Benito, J. M. (2005). Pumping selection and regulation for water-distribution networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(3), 273–281.
- Pulido-Calvo, I., & Gutiérrez-Estrada, J. C. (2011). Selection and operation of pumping stations of water distribution systems. *Environ. Res. J*, 5(3), 1–20.



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

Walski, T., & Creaco, E. (2016). Selection of pumping configuration for closed water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(6), 4016009.

Warring, R. H. (1984). *Pumps: selection, systems, and applications*.



ANEXO

Tabla 33. Anexo datos de bombas

	Modelo	P (kW)	Rmax	H0	A	Qmax	Qopt	Hopt	E	F
1	GNI 32-13/3	2.00	56.0%	26.17	-0.24	10.52	5.26	19.63	0.2128	0.0202
2	GNI 32-16/2	1.50	47.0%	22.83	-0.28	9.02	4.51	17.12	0.2084	0.0231
3	GNI 32-16/3	2.20	50.0%	27.75	-0.28	10.00	5.00	20.81	0.2000	0.0200
4	GNI 32-16/4	3.00	56.0%	37.00	-0.27	11.72	5.86	27.75	0.1912	0.0163
5	GNI 32-16/5.5	4.00	58.0%	42.53	-0.27	12.54	6.27	31.89	0.1851	0.0148
6	GNI 32-20/5.5	4.00	50.0%	48.30	-0.37	11.44	5.72	36.23	0.1748	0.0153
7	GNI 32-20/7.5	5.50	53.0%	55.85	-0.27	14.41	7.20	41.89	0.1472	0.0102
8	GNI 32-20/10	7.50	54.0%	68.65	-0.29	15.51	7.75	51.49	0.1393	0.0090
9	GNI 32-26/15	11.00	39.0%	69.79	-0.20	18.73	9.36	52.34	0.0833	0.0044
10	GNI 32-26/20	15.00	43.0%	92.35	-0.25	19.29	9.65	69.26	0.0891	0.0046
11	GNI 32-26/25	18.50	45.0%	102.75	-0.23	21.18	10.59	77.06	0.0850	0.0040
12	GNI 40-13/5.5	4.00	78.0%	26.92	-0.04	25.14	12.57	20.19	0.1241	0.0049
13	GNI 40-16/4	3.00	52.5%	27.99	-0.10	17.04	8.52	20.99	0.1232	0.0072
14	GNI 40-16/5.5	4.00	62.5%	33.86	-0.08	21.17	10.58	25.39	0.1181	0.0056
15	GNI 40-16/7.5	5.50	66.2%	42.59	-0.07	24.68	12.34	31.94	0.1073	0.0043
16	GNI 40-20/7.5	5.50	56.0%	41.33	-0.17	15.59	7.79	31.00	0.1437	0.0092
17	GNI 40-20/10	7.50	59.0%	56.51	-0.12	21.37	10.68	42.39	0.1104	0.0052
18	GNI 40-20/15	11.00	61.0%	67.73	-0.11	24.27	12.14	50.80	0.1005	0.0041
19	GNI 40-26/15	11.00	49.0%	59.30	-0.11	23.49	11.74	44.48	0.0834	0.0036
20	GNI 40-26/20	15.00	53.0%	75.21	-0.12	25.40	12.70	56.41	0.0835	0.0033
21	GNI 40-26/30	22.00	55.0%	100.47	-0.11	30.18	15.09	75.35	0.0729	0.0024
22	GNI 50-13/3	2.20	73.0%	15.77	-0.02	29.86	14.93	11.83	0.0978	0.0033
23	GNI 50-13/4	3.00	74.0%	19.13	-0.02	33.03	16.52	14.35	0.0896	0.0027
24	GNI 50-13/5.5	4.00	75.5%	23.49	-0.01	42.86	21.43	17.61	0.0705	0.0016
25	GNI 50-13/7.5	5.50	76.0%	27.26	-0.01	43.87	21.94	20.45	0.0693	0.0016
26	GNI 50-16/7.5	5.50	74.0%	29.42	-0.02	37.55	18.77	22.06	0.0788	0.0021
27	GNI 50-16/10	7.50	76.0%	38.08	-0.02	42.64	21.32	28.56	0.0713	0.0017
28	GNI 50-16/15	11.00	76.5%	43.63	-0.02	48.50	24.25	32.72	0.0631	0.0013
29	GNI 50-20/15	11.00	68.0%	55.49	-0.05	34.78	17.39	41.61	0.0782	0.0022
30	GNI 50-20/20	15.00	69.5%	63.54	-0.04	38.94	19.47	47.65	0.0714	0.0018
31	GNI 50-20/25	18.50	70.0%	67.24	-0.04	38.70	19.35	50.43	0.0723	0.0019
32	GNI 50-26/30	22.00	61.0%	81.41	-0.04	45.42	22.71	61.06	0.0537	0.0012
33	GNI 50-26/40	30.00	63.0%	104.98	-0.04	48.63	24.32	78.73	0.0518	0.0011
34	GNI 65-13/7.5	5.50	70.0%	20.50	-0.23	9.42	4.71	15.38	0.2973	0.0316
35	GNI 65-13/10	7.50	73.0%	22.83	-0.20	10.59	5.30	17.13	0.2756	0.0260
36	GNI 65-13/15	10.00	76.0%	26.81	-0.19	11.99	5.99	20.11	0.2536	0.0212
37	GNI 65-16/15	11.00	76.0%	33.36	-0.26	11.32	5.66	25.02	0.2687	0.0237
38	GNI 65-16/20	15.00	81.0%	44.44	-0.26	12.99	6.50	33.33	0.2494	0.0192
39	GNI 65-20/20	15.00	72.0%	41.29	-0.28	12.17	6.09	30.97	0.2366	0.0194
40	GNI 65-20/25	18.50	73.5%	49.14	-0.24	14.27	7.14	36.85	0.2060	0.0144



METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE ESTACIONES DE BOMBEO DIRECTO A LA RED CONSIDERANDO LA ESTRATEGIA DE REGULACIÓN

41	GNI 65-20/30	22.00	75.0%	55.03	-0.28	14.13	7.07	41.27	0.2123	0.0150
42	GNI 65-20/40	30.00	77.0%	68.92	-0.27	15.97	7.99	51.69	0.1928	0.0121
43	GNI 65-26/50	37.00	73.0%	82.74	-0.32	16.16	8.08	62.06	0.1807	0.0112
44	GNI 65-26/60	45.00	75.0%	93.45	-0.31	17.41	8.71	70.09	0.1723	0.0099
45	GNI 65-26/75	55.00	77.0%	104.25	-0.32	18.11	9.06	78.19	0.1701	0.0094
46	GNI 80-16/15	11.00	75.0%	26.58	-0.10	16.61	8.31	19.93	0.1806	0.0109
47	GNI 80-16/20	15.00	78.0%	33.16	-0.12	16.57	8.29	24.87	0.1883	0.0114
48	GNI 80-16/25	18.50	82.0%	34.83	-0.08	20.48	10.24	26.12	0.1601	0.0078
49	GNI 80-16/30	22.00	84.0%	39.62	-0.08	21.96	10.98	29.71	0.1530	0.0070
50	GNI 80-20/30	22.00	78.0%	49.06	-0.14	18.79	9.40	36.79	0.1660	0.0088
51	GNI 80-20/40	30.00	79.0%	54.18	-0.12	21.06	10.53	40.64	0.1501	0.0071
52	GNI 80-20/50	37.00	80.0%	59.61	-0.10	23.83	11.92	44.71	0.1343	0.0056
53	GNI 80-20/60	45.00	80.5%	65.69	-0.10	25.38	12.69	49.27	0.1269	0.0050
54	GNI 80-26/60	45.00	82.0%	73.46	-0.19	19.63	9.82	55.09	0.1670	0.0085
55	GNI 80-26/75	55.00	82.0%	86.11	-0.14	24.78	12.39	64.58	0.1324	0.0053
56	GNI 80-26/100	75.00	80.0%	100.97	-0.14	26.83	13.41	75.73	0.1193	0.0044
57	GNI 100-20/30	22.00	78.0%	41.57	-0.07	23.57	11.78	31.18	0.1324	0.0056
58	GNI 100-20/40	30.00	80.5%	48.18	-0.06	28.01	14.00	36.14	0.1150	0.0041
59	GNI 100-20/50	37.00	81.5%	53.70	-0.06	29.91	14.96	40.28	0.1090	0.0036
60	GNI 100-20/60	45.00	82.5%	59.98	-0.05	33.28	16.64	44.99	0.0992	0.0030
61	GNI 100-20/75	55.00	83.0%	65.09	-0.04	38.31	19.16	48.81	0.0867	0.0023
62	GNI 100-26/60	45.00	82.5%	62.74	-0.10	25.05	12.53	47.06	0.1317	0.0053
63	GNI 100-26/75	55.00	82.8%	71.69	-0.08	29.72	14.86	53.77	0.1114	0.0037
64	GNI 100-26/100	75.00	83.0%	82.03	-0.07	33.94	16.97	61.52	0.0978	0.0029
65	GNI 125-20/60	45.00	70.0%	44.54	-0.02	50.74	25.37	33.41	0.0552	0.0011
66	GNI 125-20/75	55.00	72.0%	49.37	-0.02	50.45	25.23	37.03	0.0571	0.0011
67	GNI 125-20/100	75.00	74.0%	54.58	-0.02	48.27	24.13	40.93	0.0613	0.0013