

TRABAJO FIN DE MÁSTER
***METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE
ESTACIONES DE BOMBEO BASADO EN EL
MÉTODO AHP***

INTENSIFICACIÓN: *HIDRÁULICA URBANA*

AUTOR:

DIANA SORAYA SÁNCHEZ FERRER

TUTOR:

DR. PEDRO IGLESIAS

COTUTOR/ES:

DR. JAVIER MARTÍNEZ SOLANO



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

MAYO, 2020

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente

mihma

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, los agradecimientos son para mi familia, mi esposo, mis padres y mi hermana que han sido un apoyo y un punto de soporte durante todo el proceso de la realización del máster. Agradezco la paciencia y el amor con el que han contribuido a este proceso y todo el mérito de lo que he llegado a obtener ha sido por y para ellos.

También quiero agradecer a todos los profesores del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente quienes han sido quienes me han formado en este proceso de aprendizaje. En especial quiero agradecer a mi tutor Pedro Iglesias, quien ha sido un excelente tutor, un maestro y una excelente persona y a Javier Martínez que ha sido un apoyo en el momento en que lo he necesitado.

Por último, quiero agradecer a mis compañeros del máster con quienes compartí experiencias maravillosas y que han sido de las mejores personas que he podido llegar a conocer y con quienes he pasado una de las mejores experiencias de mi vida.

| Datos del proyecto |
|---|
| Título del TFM en español: Metodología para el diseño de estaciones de bombeo basado en el método AHP |
| Título del TFM en inglés: Methodology for the design of pump stations based on the AHP method |
| Título del TFM en Valenciano: Metodologia per al disseny d'estacions de bombament basat en el mètode AHP |
| Alumno: Diana Soraya Sánchez Ferrer |
| Tutores: DR. Pedro Luis Iglesias Rey DR. Francisco Javier Martínez |
| Cotutor/es: |
| Director experimental: |
| Fecha de Lectura: Mayo, 2020 |

| Resumen |
|---|
| En español (máximo 5000 caracteres) |
| <p>Los diseños de sistemas hidráulicos son definidos de acuerdo con el contexto en donde se vayan a desarrollar. Por lo general, los diseños tienen componentes tanto técnicos como económicos con múltiples variables que juegan un papel importante a la hora de definir una alternativa de diseño entre muchas otras que pudiesen existir. Las estaciones de bombeo son sistemas hidráulicos, que para su diseño tienen la misma complejidad que cualquier otro sistema de su tipo.</p> <p>Por lo anterior, se ha planteado una metodología basada en el método AHP para la obtención de una alternativa óptima de diseño con base en una selección multicriterio, que, de acuerdo con su naturaleza, debe consultarse a expertos sobre la priorización de los criterios de diseño, permitiendo establecer la prioridad de las posibles alternativas.</p> <p>El diseño de una estación de bombeo tiene diversos criterios. Para este trabajo se han evaluado dos metodologías de diseño que contemplan diferentes criterios. La metodología MP1 que contempla criterios técnicos y económicos y la metodología MP2 que contempla factores técnicos, ambientales y económicos, los cuales agrupan subcriterios que han permitido la valoración de alternativas con base en el método AHP.</p> <p>Durante el desarrollo de este documento se encontró que existen algunos criterios que son clave a la hora de definir una estación de bombeo y que en el modo tradicional de diseño son parámetros que se establecen arbitrariamente, como el número de bombas. Además, se encontró que las estaciones de bombeo por lo general no son diseñadas con un enfoque ambiental y de eficiencia</p> |

energética. Actualmente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) es necesario que todas las infraestructuras se desarrollen con una mirada hacia lo ambiental y la eficiencia energética. Estas premisas han sido de suma importancia para el desarrollo de este documento.

En valenciano (máximo 5000 caracteres)

Els dissenys de sistemes hidràulics són definits d'acord amb el context on es vagen a desenvolupar. En general, els dissenys tenen components tant tècnics com econòmics amb múltiples variables que juguen un paper important a l'hora de definir una alternativa de disseny entre moltes altres que pogueren existir. Les estacions de bombament són sistemes hidràulics, que per al seu disseny tenen la mateixa complexitat que qualsevol altre sistema del seu tipus.

Per l'anterior, s'ha plantejat una metodologia basada en el mètode *AHP per a l'obtenció d'una alternativa òptima de disseny amb base en una selecció multicriteri, que, d'acord amb la seua naturalesa, ha de consultar-se a experts sobre la prioritització dels criteris de disseny, permetent establir la prioritat de les possibles alternatives.

El disseny d'una estació de bombament té diversos criteris. Per a aquest treball s'han avaluat dues metodologies de disseny que contemplen diferents criteris. La metodologia MP1 que contempla criteris tècnics i econòmics i la metodologia MP2 que contempla factors tècnics, ambientals i econòmics, els quals agrupen *subcriterios que han permés la valoració d'alternatives amb base en el mètode AHP.

Durant el desenvolupament d'aquest document es va trobar que existeixen alguns criteris que són clau a l'hora de definir una estació de bombament i que en la manera tradicional de disseny són paràmetres que s'estableixen arbitràriament, com el nombre de bombes. A més, es va trobar que les estacions de bombament en general no són dissenyades amb un enfocament ambiental i d'eficiència energètica. Actualment amb els Objectius de Desenvolupament Sostenible (*ODS) és necessari que totes les infraestructures es desenvolupen amb una mirada cap a l'ambiental i l'eficiència energètica. Aquestes premisses han sigut de summa importància per al desenvolupament d'aquest document.

En inglés (máximo 5000 caracteres)

The designs of hydraulic systems are defined according to the context in which they develop. In general, designs have both technical and economic components with multiple variables that play an important role in defining a design alternative among other things that might exist. The pump stations are hydraulic systems, which for their design have the same complexity as any other type of system.

Previously, a methodology based on the AHP method has been planted to obtain an optimal design alternative based on a multicriterial selection, which, according to its nature, should consult with experts on the prioritization of design criteria. , allowing to establish the priority of the possible alternatives.

The design of a pump station has several criteria. For this work the design methodologies that contemplate different criteria have been evaluated. The MP1 methodology that includes technical

and economic criteria and the MP2 methodology that includes technical, environmental and economic factors, as they all group sub-criteria that have allowed the valuation of alternatives based on the AHP method.

During the development of this document, it will be found that there are some criteria that define the time to define a pump station and that in the traditional way of design are parameters that are set arbitrarily, such as the number of pumps. Furthermore, it is found that the pump stations by the general are not designed with an environmental approach and energy efficiency. Currently with the Sustainable Development Goals (SDGs) it is necessary that all infrastructures are developed with a view to the environmental and energy efficiency. These premises have been of paramount importance for the development of this document.

Palabras clave español (máximo 5): AHP, SISTEMAS DE BOMBEO, DISEÑO HIDRÁULICO, MULTICRITERIO

Palabras clave valenciano (máximo 5): *AHP, SISTEMES DE BOMBAMENT, DISSENY HIDRÀULIC, MULTICRITERI

Palabras clave inglés (máximo 5): AHP, PUMP SYSTEMS, HYDRAULIC DISEÑO, MULTICRITERIO

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.2 Estructura del documento..... | 3 |
| CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE | 4 |
| 2.1 Las bombas..... | 4 |
| 2.2 Estaciones de bombeo para abastecimiento de agua..... | 6 |
| 2.2.1 Tipologías de Estaciones de Bombeo | 6 |
| 2.2.2 Requerimientos para el diseño de estaciones de bombeo | 8 |
| 2.2.3 Características de instalación en una Estación de Bombeo | 12 |
| 2.2.4 Afectación al funcionamiento de una Estación de Bombeo | 14 |
| 2.2.5 Regulación en estaciones de bombeo..... | 15 |
| 2.2.6 Control de la regulación | 18 |
| 2.3 Metodologías para el diseño de estaciones de bombeo | 22 |
| 2.3.1 Método tradicional para la selección de estación de bombeo | 22 |
| 2.3.2 Métodos económicos de selección de estaciones de bombeo..... | 24 |
| 2.4 Análisis de Decisión Multicriterio..... | 27 |
| 2.4.1 Introducción al análisis de decisión multicriterio MCDA | 27 |
| 2.4.2 Frontera de Pareto | 28 |
| 2.4.3 El método AHP..... | 29 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PROPUESTA | 34 |
| 3.1 Introducción | 34 |
| 3.2 Planteamiento del esquema de trabajo..... | 34 |
| 3.3 Modulo 1 – Hipótesis de partida | 39 |
| 3.4 Viabilidad de las alternativas..... | 41 |
| 3.5 Parámetros clave de la metodología..... | 41 |
| 3.5.1 Número de bombas..... | 42 |
| 3.5.2 Modo de regulación | 42 |

| | | |
|--|---|-----|
| 3.6 | Valoración de criterios | 49 |
| 3.6.1 | Criterios valorados para MP1 | 50 |
| 3.6.2 | Criterios valorados para MP2 | 59 |
| 3.6.3 | Definición de alternativas viables para aplicar AHP | 62 |
| 3.7 | Modulo 3 – Aplicación del método AHP | 63 |
| 3.7.1 | Construcción jerárquica de AHP | 63 |
| 3.7.2 | Comparación de criterios | 64 |
| 3.7.3 | Valoración de las alternativas | 70 |
| 3.7.4 | Análisis de sensibilidad | 73 |
| CAPÍTULO 4. APLICACIÓN A CASO DE ESTUDIO | | 74 |
| 4.1 | Modulo 1 – Hipótesis de partida | 74 |
| 4.2 | Modulo 2 – Selección de alternativas viables | 77 |
| 4.3 | Modulo 3 – Aplicación de método AHP | 82 |
| 4.3.1 | Aplicación de método AHP para MP1 | 82 |
| 4.3.2 | Aplicación de método AHP para MP2 | 87 |
| 4.4 | Comparativa entre resultados de MP1 y MP2 | 93 |
| 4.5 | Diseño de estación de bombeo con el método tradicional | 94 |
| 4.6 | Comparativa del diseño entre el método tradicional y el AHP | 99 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES | | 101 |
| 5.1 | Conclusiones..... | 101 |
| 5.2 | Desarrollos futuros | 102 |
| 5.3 | Indicios de calidad | 102 |
| CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA | | 103 |
| CAPÍTULO 7. ANEXOS | | 106 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Escala fundamental de números absolutos. Fuente: (T. Saaty, 2008) | 30 |
| Tabla 2. índice de consistencia aleatorio de acuerdo con el número de elementos comparados. Fuente: (Moreno Jimenez, 2002) | 32 |
| Tabla 3. Criterios de diseño de EB para MP1 | 35 |
| Tabla 4. Planteamiento de Criterios para MP2 | 36 |
| Tabla 5. Tarifa de cada hora establecida: Fuente: (ENDESA, 2020) | 40 |
| Tabla 6. Equipos requeridos para cada uno de los modos de regulación | 50 |
| Tabla 7. Expresiones para el cálculo de cantidades de elementos de la infraestructura de la EB..... | 51 |
| Tabla 8. Elementos de regulación para establecer los costes de inversión | 51 |
| Tabla 9. Frecuencias y costes de mantenimiento de EB | 58 |
| Tabla 10. Valores de MEI según el C de cada tipo de bomba | 61 |
| Tabla 11. Juicios de valoración de criterios para Frontera Pareto | 63 |
| Tabla 12. Escalas de valoración de Saaty acorde a las escalas de la encuesta para MP1 | 65 |
| Tabla 13. Escalas de valoración de Saaty acorde a las escalas de la encuesta para MP2 | 66 |
| Tabla 14. Escala de Saaty y porcentajes de importancia dados a cada elemento comparado..... | 67 |
| Tabla 15. Vector propio de la MP1..... | 68 |
| Tabla 16. Vector Propio de la MP2..... | 68 |
| Tabla 17. Vectores propios de expertos en diferentes campos de trabajo | 69 |
| Tabla 18. Matriz de comparación para la obtención del vector ideal o Rating del criterio Nivel de Complejidad | 71 |
| Tabla 19. Matriz de comparación para la obtención del vector ideal o Rating del criterio MEI – índice de eficiencia energética | 71 |
| Tabla 20. Datos de curva consigna de los puntos de suministro de la red | 74 |
| Tabla 21. Datos otorgados por fabricante para cada modelo de bomba | 76 |
| Tabla 22. Modelos viables para abastecer PS2 | 77 |
| Tabla 23. Alternativas viables para el abastecimiento del punto de suministro PS2 | 78 |
| Tabla 24. Resultados Frontera de Pareto para MP1 | 79 |
| Tabla 25. Resultados de los factores técnicos en la Frontera de Pareto para MP2..... | 80 |
| Tabla 26. Resultados de los factores ambientales en la Frontera de Pareto para MP2 | 80 |
| Tabla 27. Resultados de los factores económicos en la Frontera de Pareto para MP2..... | 81 |

| | |
|--|----|
| Tabla 28. Pesos de alternativas acorde a cada criterio de MP1..... | 83 |
| Tabla 29. Valores de criterios en Modelos de bomba con mayor jerarquía en MP1..... | 84 |
| Tabla 30. Alternativas de modos de regulación de B5..... | 85 |
| Tabla 31. Valores de prioridad ideal para cada alternativa por grupo de expertos | 86 |
| Tabla 32. Valoraciones de expertos a cada una de las soluciones del modelo 50-26/40..... | 86 |
| Tabla 33 Pesos de alternativas para cada criterio de los factores técnicos en MP2..... | 88 |
| Tabla 34. Pesos de alternativas para cada criterio de los factores ambientales en MP2 | 88 |
| Tabla 35. Pesos de alternativas para cada criterio de los factores ambientales en MP2 | 89 |
| Tabla 36. Valores de criterios en Modelos de bomba con mayor jerarquía en MP2..... | 91 |
| Tabla 37. Resultados de B6 para diferentes estrategias de regulación para factores técnicos..... | 92 |
| Tabla 38. Resultados de B6 para diferentes estrategias de regulación para factores ambientales | 92 |
| Tabla 39. Resultados de B6 para diferentes estrategias de regulación para factores económicos..... | 93 |
| Tabla 40. Alternativas Optimas MP1 con criterios de MP2..... | 94 |
| Tabla 41. Soluciones variando modo de regulación para el modelo B3 | 97 |
| Tabla 42. Soluciones para valoración económica | 97 |
| Tabla 43. Valoración económica respecto a solución con costes de inversión más bajos (solución 2) | 98 |
| Tabla 44. Valoración económica respecto a solución 3 | 98 |
| Tabla 45. Valoración económica respecto a solución 5 | 98 |
| Tabla 46. Alternativa definida por método tradicional con los valores de criterios del AHP Comparada con la seleccionada con MP1 y MP2. | 99 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Estación de bombeo desde depósito formada por cuatro bombas en paralelo. Fuente: (Fuertes et al., 2003) | 7 |
| Figura 2. Curva de consigna, resistente y motriz de la bomba | 10 |
| Figura 3. Curva de modulación..... | 11 |
| Figura 4. Curvas características de bombas asociadas en paralelo. Fuente: (López Jimenez et al., 2003) | 13 |
| Figura 5. Esquema de equipamiento de una Estación de Bombeo. Fuente: (Martinez Solano, 2019). | 14 |
| Figura 6. Regulación de altura con válvula reductora en serie. Fuente: (López Jimenez et al., 2003) . | 16 |
| Figura 7. Regulación con válvula sostenedora en derivación. Fuente: (López Jimenez et al., 2003).... | 17 |
| Figura 8. Recubrimiento en BVF acopladas en paralelo. Fuente: (López Jimenez et al., 2003)..... | 19 |
| Figura 9. Esquema de control manométrico mediante presostatos. Fuente: (López Jimenez et al., 2003) | 20 |
| Figura 10. Control de regulación caudalimétrico. Fuente: (López Jimenez et al., 2003) | 21 |
| Figura 11. Grafica para seleccionar bomba con campo de trabajo de diferentes modelos Fuente: (IDEAL, 2018)..... | 22 |
| Figura 12. Curva de bomba comercial. Fuente: (IDEAL, 2018)..... | 23 |
| Figura 13. Frontera de Pareto | 29 |
| Figura 14. Diagrama de flujo para MP1..... | 38 |
| Figura 15. Diagrama de flujo para MP2..... | 38 |
| Figura 16. Esquema básico de la EB | 39 |
| Figura 17. Variación horaria de la tarifa eléctrica “Óptima” Endesa. Fuente: (ENDESA, 2020)..... | 41 |
| Figura 18. Regulación manométrica con BVF. Fuente: (Arango Gil, 2018) | 43 |
| Figura 19. Regulación caudalimétrica con BVF. Fuente (Arango Gil, 2018) | 44 |
| Figura 20. Funcionamiento de bombas de velocidad variable. Fuente: (Arango Gil, 2018) | 45 |
| Figura 21. Regulación de BVV con caudal. Fuente: (Arango Gil, 2018)..... | 46 |
| Figura 22. Modo de regulación manométrica con BVF + BVV. Fuente: (Arango Gil, 2018) | 47 |
| Figura 23. Regulación caudalimétrica con BVF + BVV. Fuente: (Arango Gil, 2018) | 49 |
| Figura 24. función de coste para variador de frecuencia..... | 53 |
| Figura 25. Función de coste para caudalímetro electromagnético..... | 53 |
| Figura 26. Función de coste para contador Woltman..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 27. Función de coste para válvula de seccionamiento..... | 54 |
| Figura 28. Función de coste para válvula de retención..... | 55 |
| Figura 29. Función de coste para codo bridado en Fundición Dúctil..... | 55 |
| Figura 30. Función de coste para tees de fundición dúctil..... | 56 |
| Figura 31. Función de coste para tubería en fundición dúctil..... | 56 |
| Figura 32. Construcción jerárquica de AHP en la MP1..... | 64 |
| Figura 33. Construcción jerárquica de AHP para MP2..... | 64 |
| Figura 34. Esquema de los juicios a establecer entre dos criterios en la encuesta presentada a expertos para la MP1. | 65 |
| Figura 35. Ejemplo de esquema de los juicios a establecer entre dos criterios en la encuesta presentada a expertos para la MP2..... | 66 |
| Figura 36. Desviación con respecto al promedio total de cada colectivo de expertos..... | 69 |
| Figura 37. Comportamiento de diferentes escalas de valoración..... | 72 |
| Figura 38. Red de distribución caso real – selección caso de estudio..... | 75 |
| Figura 39. Curva de modulación del punto de suministro PS2..... | 76 |
| Figura 40. Variación Tarifaria ENDESA – Tarifa Optima..... | 77 |
| Figura 41. Estructuración jerárquica para MP1..... | 82 |
| Figura 42. Resultados de jerarquización de alternativas de modelos de bombas con la MP1..... | 84 |
| Figura 43. Estructuración jerárquica para MP2..... | 87 |
| Figura 44. Resultados de jerarquización de alternativas de modelos de bombas con la MP2..... | 90 |
| Figura 45. Conjuntos de modelos de bomba a valorar con las condiciones de altura y caudal del sistema de abastecimiento..... | 95 |
| Figura 46. Curva del Modelo de bomba 40-26..... | 96 |

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, sumado al crecimiento demográfico y el estado cambiante de las economías mundiales, genera un incremento en la demanda de recursos naturales finitos como el agua y la energía. En la actualidad, la demanda mundial de agua se estima cerca a los 4600 Km³/año y se vaticina un incremento entre 20% a 30% para el año 2050. Siendo la producción agrícola la actividad económica que mayor demanda de agua y energía requiere, para el año 2025 se estima un incremento en estas demandas del 60% y el 80% respectivamente (UNESCO, 2018). Ante este panorama, el mundo se prepara para una escasez hídrica sin precedentes y el incremento de la demanda energética provocará el aumento de los gases de efecto invernadero, pues se estima que cerca del 60% de las emisiones mundiales de estos gases se dan por cuenta del factor energético (Naciones Unidas, 2015).

Debido a estos desafíos a los que la humanidad se enfrentará en los próximos años, la ONU estableció en el 2015, la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, planteando 17 objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de los cuales el **ODS.6** está dedicado al *Agua y Saneamiento* y el **ODS.7** a la *Energía Asequible y no Contaminante* (Cámara de comercio de España, 2019). Dentro del ODS6, la meta 6.4 establece “*augmentar sustancialmente la utilización eficiente de los recursos hídricos*” y dentro del ODS7, la meta 7.3 establece “*de aquí al 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética*” (Naciones Unidas, 2015).

Es por lo anterior que las infraestructuras de los abastecimientos de agua requieren proyectarse en un marco de eficiencia energética, respondiendo a la demanda hídrica que permita el abastecimiento sin desconocer los requerimientos que la dinámica mundial está exigiendo. Estas proyecciones deberían establecerse no solo garantizando los criterios técnicos de funcionamiento y de cumplimiento ambiental, sino también a través de unos costes de inversión y operación tales que la ejecución del diseño, construcción y operación de estos sistemas sea factible.

En los abastecimientos, los sistemas de bombeo son las infraestructuras que consumen la mayor cantidad de energía y los costes de energía comprenden el mayor componente de los costes de operación (Guyer, 2012). Sin embargo, el proceso de diseño de estas infraestructuras, en ocasiones no tiene en cuenta la eficiencia energética del sistema y además desconoce otras variables importantes que pueden afectar la construcción y operación de la infraestructura.

Tradicionalmente, el diseño de Estaciones de Bombeo (EB) para abastecimientos se plantea fijando un modelo de bomba (por lo general bombas centrifugas), que cumpla con un punto de funcionamiento y, a partir de ahí se elige el número de bombas acopladas en paralelo, que es lo usual en estos sistemas. A partir de este punto, generalmente se selecciona el modo de regulación y se define el número de Bombas de Velocidad Fija (BVF) y Bombas de Velocidad Variable (BVV) que van a operar en el sistema. Una vez establecidas estas variables, se calculan los costes de inversión y operación.

En el método tradicional, el número de bombas se fija arbitrariamente, por lo general acorde a la experiencia del diseñador, por lo que no obedece a una selección objetiva. Sin embargo, el número de bombas es uno de los parámetros más importantes, con el que se define el modo de regulación y a partir del cual se establecen los costes de inversión, operación y mantenimiento y en este método no se le da la relevancia que realmente tiene. Adicionalmente, en este proceso de diseño tradicional, las variables ambientales se desconocen y la eficiencia energética podría tenerse en cuenta a la hora de seleccionar el modo de regulación, pero no existe la certeza de obtener una alternativa de EB óptima que la garantice y tenga costes aceptables.

Por lo anterior, en miras a un replanteamiento del proceso de diseño de EB con una perspectiva de optimización, Iglesias Rey, Martínez Solano, Arango Gil, & Lozano cortés (2018) plantearon una metodología para la selección de EB con base en la consideración de los modos de regulación dentro del proceso de selección del modelo de bomba y definiendo alternativas de modelos y modos de regulación basadas en los costes de inversión y operación, donde finalmente se han establecido un grupo de alternativas dominantes, es decir que presentan mejor combinación de estos criterios, mediante el planteamiento con frontera de Pareto, uno de los fundamentos del Análisis de Decisión Multicriterio o *Analysis Multicriteria Decision* (AMCD por sus siglas en inglés). Mediante los AMCD se pueden evaluar diferentes criterios y establecer una alternativa o un grupo de alternativas que cumplan con todos los criterios y que además dentro del grupo de opciones sean seleccionadas aquellas que tienen mejor valoración para los criterios planteados.

Incorporando el planteamiento de Iglesias Rey et al. (2018), en este trabajo se plantea la introducción del método AHP, uno de los principales AMCD utilizado en los últimos años, con la intención de incorporar un mayor número de criterios que involucren aspectos técnicos, económicos y ambientales y que permita la selección no de un grupo de alternativas, sino de una alternativa definitiva de diseño de EB que sea óptima y garantice todos los requerimientos planteados. El método AHP, desarrollado por T. Saaty (1980), permite la resolución de problemas complejos implicando múltiples criterios. Por esto, a través de este método se ha planteado que mediante la valoración subjetiva por parte de expertos sobre diferentes criterios respecto a una importancia relativa de cada uno de estos se especifique la preferencia de las alternativas de EB para cada uno de los criterios y finalmente una preferencia de alternativa óptima que sea priorizada mediante el método AHP a través de la jerarquización entre las alternativas.

1.1 Objetivos

En vista de lo anteriormente expuesto, este proyecto tiene como objetivo el desarrollo de una metodología de diseño de EB con base en el método AHP, mediante el cumplimiento de criterios técnicos, económicos y ambientales que permita la obtención de una alternativa de diseño óptima. Este objetivo general se concreta mediante el desarrollo de los objetivos específicos listados a continuación:

- **Objetivo 1.** Plantear los criterios de diseño para EB parametrizadas, que garanticen que la EB finalmente seleccionada cumpla con unos requerimientos técnicos, económicos y ambientales.

- **Objetivo 2.** Valorar cada uno de los criterios, generando una combinación de múltiples alternativas con diferentes valores para cada uno de los criterios establecidos.
- **Objetivo 3.** Seleccionar las alternativas dominantes entre el grupo de posibles opciones de alternativas que se generen mediante la combinación de los criterios.
- **Objetivo 4.** Estructurar el modelo jerárquico del AHP donde se establezcan las agrupaciones de los criterios, el objetivo final del diseño y las posibles alternativas.
- **Objetivo 5.** Establecer, mediante la consulta a expertos la importancia de cada uno de los criterios previamente establecidos en el Objetivo 1.
- **Objetivo 6:** Valorar las alternativas con respecto a cada uno de los criterios, definiendo el modo de valoración dependiendo del tipo de criterio.
- **Objetivo 7.** Jerarquizar las alternativas de acuerdo con la agregación del peso de las alternativas para cada criterio con el peso de los criterios establecidos, estableciendo la opción óptima.

1.2 Estructura del documento

El documento se encuentra estructurado en capítulos, en este apartado se busca brindar al lector una visión general de la organización del documento para su revisión y análisis. Los capítulos que hacen parte del documento son:

- **Capítulo 1. Introducción:** donde se expone la importancia del desarrollo de metodologías de diseño aplicadas al AMCD, de acuerdo con los requerimientos en las infraestructuras que la dinámica del mundo actual exige.
- **Capítulo 2. Estado del arte:** en el cual se realiza una revisión bibliográfica de los fundamentos teóricos en cada una de las etapas en el diseño de EB y se desarrolla la información concerniente al fundamento teórico del AHP.
- **Capítulo 3. Metodología propuesta:** en la cual se encuentra desarrollada la metodología propuesta para el diseño de EB mediante la valoración de diferentes criterios y selección de una alternativa óptima mediante el método AHP.
- **Capítulo 4. Aplicación a un caso de estudio:** donde se evalúa la metodología propuesta en una aplicación a un caso de estudio específico. En este apartado se realiza el cálculo de cada uno de los criterios y la selección de una alternativa de EB óptima para este caso en específico.
- **Capítulo 5. Conclusiones y desarrollos futuros:** se exponen las conclusiones que el desarrollo del trabajo traiga consigo
- **Capítulo 6. Bibliografía:** en este capítulo se exponen todos los referentes bibliográficos consultados para el desarrollo de este documento.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se recoge el estado del arte sobre las principales cuestiones relacionadas con la metodología de diseño de EB basada en la aplicación del método de decisión multicriterio AHP. Por ello, el capítulo se estructura en cuatro partes. En la primera se encuentra la información teórica relacionada con las bombas, su clasificación y su funcionamiento. En la segunda parte se relaciona la información concerniente a las EB, los conceptos relacionados para efectuar el diseño de esta infraestructura y la regulación. En la tercera parte se encuentra descrita la metodología para el dimensionamiento de EB que funciona tradicionalmente y los conceptos para la evaluación económica del diseño. Finalmente, en la cuarta parte de este capítulo se aborda el tema de decisión multicriterio y el método AHP como fundamento de este documento.

2.1 Las bombas

Una bomba es una máquina hidráulica, que intercambia energía, cambiando la energía mecánica por energía hidráulica en forma de presión y caudal y el fluido no cambia de densidad al hacer este intercambio energético. Las máquinas hidráulicas son bombas cuando se produce un el cambio de energía se hace desde energía mecánica a hidráulica y son turbinas cuando el cambio sucede de forma inversa (Fuertes et al., 2003).

Las máquinas hidráulicas se pueden clasificar en turbomáquinas y máquinas de desplazamiento positivo. Las turbomáquinas son las que mayor importancia cobran en cuanto aspectos de diseño en sistemas de abastecimiento, por lo cual serán sobre las que en adelante se centrará la información presentada. En las turbomáquinas el intercambio de energía se debe a la variación de la cantidad de momento cinético que el fluido experimenta cuando es transmitido a un elemento móvil giratorio, dotado de alabes o palas, por lo cual el fluido es continuo desde la aspiración a la impulsión, es decir el fluido no se comprime en ningún instante. De acuerdo con sus características, las turbomáquinas se clasifican en:

- Turbomáquinas radiales o centrifugas: trasiega caudales moderados y grandes alturas. Donde las partículas del fluido atraviesan el rodete y siguen trayectorias paralelas al eje a la entrada de la máquina y perpendiculares al mismo a la salida de la máquina.
- Turbomáquinas Helicocentrifugas: trasiega caudales y alturas intermedias. Aquí las partículas del fluido son coaxiales en la entrada de la máquina y con ángulos entre 0 y 90° a la salida de esta.
- Turbomáquinas axiales: trasiega grandes caudales y bajas alturas. Las partículas se mueven en cilindros coaxiales con el eje de la máquina.

Las turbomáquinas también pueden clasificarse de acuerdo con su morfología, esta clasificación es independiente de la trayectoria que sigue el fluido por en medio del rodete, pero no deja de ser importante para caracterizar el funcionamiento de la máquina. Estas clasificaciones se listan a continuación:

- De acuerdo con la configuración del motor pueden ser *monobloc* o de *eje libre*. Las bombas monobloc cuentan con un solo eje para el motor y la bomba y en las de *eje libre* el motor se encuentra separado de la bomba.
- De acuerdo con el número de etapas del rodete se clasifican en *monocelular* y *multicelular*. Para las bombas *monocelulares* se cuenta con un solo rodete (son las más convencionales) y en las *multicelulares* se da la agrupación de varios rodetes en serie, por lo general las bombas multicelulares se aplican para sistemas con presiones superiores a 100 m. No obstante, estas presiones no son comunes en los abastecimientos, por lo cual las bombas multicelulares no suelen usarse en estos sistemas, salvo en elevaciones de pozo, donde el diámetro del rodete no se define por el requerimiento de altura, sino por las limitaciones de la estructura para la extracción del agua.
- De acuerdo con la orientación del eje pueden ser horizontales o verticales. Las bombas de eje vertical ocupan menor espacio, pero su mantenimiento es mayor al tener los elementos menos accesibles.
- De acuerdo con el tipo de instalación pueden ser sumergibles o de pozo seco. Esta clasificación es usada generalmente para bombas de extracción de agua de pozos profundos, donde las bombas pueden colocarse sumergidas en el pozo o en un pozo seco paralelo al que se desea extraer el fluido.
- De acuerdo con la configuración de la máquina se clasifican en rodete abierto o cerrado. Las de rodete cerrado son las convencionales que cuentan con un disco anterior delante de los alabes del rodete y otro posterior detrás. Cuando los discos anteriores y posteriores no se presentan, las máquinas tienen rodetes abiertos o semiabiertos, que permiten el paso de sólidos. Por lo anterior las máquinas con rodetes cerrados se usan para aguas limpias sin presencia de sólidos y con rodetes abiertos cuando estas se usan para aguas con presencia de sólidos como las residuales.
- De acuerdo con la carcasa externa son de cuerpo único o cámara partida. La instalación convencional es la de cuerpo único, las de cámara partida presentan dos rodetes con el disco posterior compartido o un rodete doble estando el cuerpo de la bomba atravesado por el eje.

Las bombas son entonces turbomáquinas de acuerdo con su principio de funcionamiento y son generadoras de acuerdo con el sentido de transmisión energética pues su función es ceder energía (Zamora Parra & Viedma Robles, 2016). De acuerdo con lo anterior, las bombas para los abastecimientos de agua limpia son por lo general de tipo centrífuga, monocelulares de eje horizontal con rodete cerrado y cuerpo único, que serán las usadas en el desarrollo del presente trabajo.

2.2 Estaciones de bombeo para abastecimiento de agua

Las EB de agua son usualmente diseñadas para suministrar agua en un área en la cual es requerida o proyectada una demanda (Sanks et al., 1998). Cuando se dispone del caudal de agua suficiente pero no de la energía para el suministro, la necesidad de una estación de bombeo es indiscutible. En el presente apartado se encontrarán todos los aspectos relacionados con el diseño de las EB y la regulación acorde a la demanda requerida.

2.2.1 Tipologías de Estaciones de bombeo

Existen varias tipologías de EB, que están clasificadas de acuerdo con diferentes consideraciones, por lo cual para la clasificación de un sistema de bombeo es necesario preestablecer los factores que se listan a continuación (López Jimenez et al., 2003):

- Capacidad requerida del sistema: se trata de los caudales y las alturas que el sistema de abastecimiento requiere.
- Condiciones de operación: consta del tipo de regulación necesaria, relación con la conexión de la red, si la operación depende de un pozo o si se trata de situación de rebombeo.
- Tipo de motor: se trata de establecer si se opera con Bombas de Velocidad Fija (BVF) o Bombas de Velocidad Variable (BVV).
- Localización de la EB: trata del espacio físico, número, tipo de bombas, combinación de las bombas, necesidad de la instalación de un pozo seco, etc.

Una vez se establecen los factores previamente definidos, se hace la diferenciación entre las posibles EB que puedan ser objeto de clasificación en sistemas de abastecimiento (Fuertes et al., 2003). A continuación, se plantean las posibles EB:

- Captaciones de pozo: este tipo de instalaciones se caracteriza por contar con bombas multicelulares de eje vertical, por lo cual se trata de sistemas con grandes requerimientos de altura, aunque con condiciones de agua limpia. Para estas infraestructuras existen dos posibles configuraciones en la instalación, colocación de bomba sumergida en el pozo con motor en superficie y motobomba sumergible incluyendo el motor en el pozo. Estas instalaciones son usualmente utilizadas para el suministro de agua cruda a las estaciones potabilizadoras, por lo cual en ocasiones pueden presentar sólidos de suspensión que dañen los alabes de las bombas, y, por tanto, en ocasiones se requiere de configuraciones de bomba con rodete abierto.
- Grupos de hidropresores en viviendas: Estas instalaciones se usan en redes de pequeño tamaño, como en grupos de viviendas, por lo cual el uso de un depósito adicional no está recomendado y conviene instalar un grupo hidropresor en la aspiración que permita contar con una presión de consigna a la entrada de la EB, que a su vez serviría como elemento de regulación, proporcionando presiones de consigna para arranque y paro de las bombas.
- Impulsiones desde depósito: este tipo de instalaciones toman agua de un depósito para llevarla a otro depósito con mayor cota o que se suministre directamente a la red que requiera un aporte de energía. En este tipo de instalaciones es habitual que el sistema este conformado por varias bombas acopladas en paralelo (Figura 1) por lo cual en estas EB se puede ejercer regulación ajustando las necesidades de consumo.

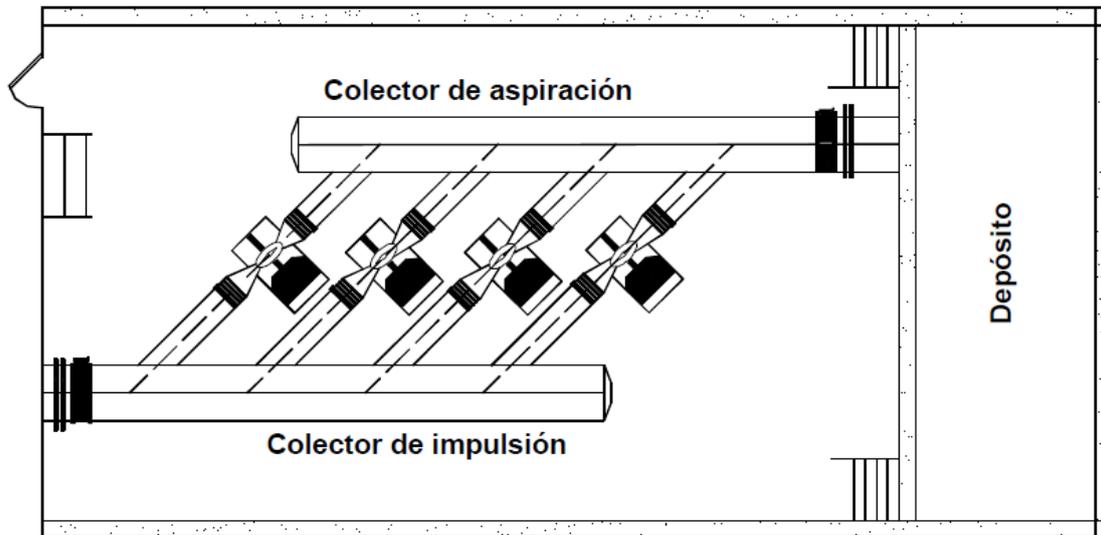


Figura 1. Estación de bombeo desde depósito formada por cuatro bombas en paralelo. Fuente: (Fuertes et al., 2003)

En la Figura 1 se presenta una EB con impulsión desde depósito que incluye cuatro bombas acopladas en paralelo, un colector de aspiración y un colector de impulsión, así como un depósito de aspiración. De las EB con impulsión desde depósito, se pueden plantear dos tipos de acuerdo con su sistema de regulación: regulación mediante depósitos o regulación con inyección directa a red.

- Regulación mediante depósitos: en muchas poblaciones los abastecimientos son alimentados mediante gravedad por depósitos en cabecera, estos depósitos son alimentados por sistemas de bombeo. Al construir un depósito la cota de suministro es invariable, por lo cual si en una población aumenta la demanda y por ende los requerimientos de presión en la red, el sistema de suministro mediante depósito puede quedar obsoleto. Sin embargo, este sistema ofrece la posibilidad de almacenamiento y por tanto la fiabilidad en el suministro en caso de fallo o avería de la EB.
- Regulación mediante inyección directa a red: este tipo de EB se encuentran equipados con BVF y/o BVV y por lo general es usado en ciudades llanas donde se prohíbe la construcción de depósitos o el coste de construcción de estos elementos es excesivo. En este caso, la EB se equipa con varios grupos de bombeo escalonados que aspiran desde un depósito común. El inconveniente principal de este tipo de infraestructura es la falta de volumen de reserva almacenado, otro inconveniente suele ser que al trabajar con bajos caudales las bombas reducen su rendimiento, para lo cual la solución que se ha planteado es el uso de BVV.

En el desarrollo de este trabajo se plantea el uso de EB con aspiración desde depósito con inyección directa a red. A partir de esta premisa se han descrito los conceptos que en adelante serán utilizados para el desarrollo del documento.

2.2.2 Requerimientos para el diseño de estaciones de bombeo

Para el diseño adecuado de una estación de bombeo, se requiere contar con información de partida que permita el desarrollo de este, a continuación, se describen algunos de los elementos requeridos como información de partida:

- Curva Motriz
- Curva resistente
- Punto de funcionamiento
- Curva de rendimiento
- Curva de consigna
- Cámara de aspiración
- Acoplamiento de bombas
- Equipamiento hidráulico de las EB
- Curva de modulación
- Comportamiento de la Tarifa eléctrica

En los siguientes apartados describe con detalle cada uno de estos.

2.2.2.1 Curva motriz.

Las bombas siempre dependen de las características motrices que presentan. Los fabricantes son quienes proporcionan las gráficas motrices. Con esta curva, también llamada la curva de la bomba se define la altura piezométrica del fluido, en función del caudal definido en un punto de referencia (López Jimenez et al., 2003). Existen muchas maneras de representar el comportamiento de la curva motriz (Figura 2). Una de las más habituales es:

$$H = H_0 - AQ^2 \quad (1)$$

donde: H es Altura piezométrica del fluido, H_0 corresponde a la altura inicial de la curva, A es la constante característica de la bomba y Q el caudal demandado.

Como se ha indicado anteriormente, existen otras expresiones matemáticas para la representación del comportamiento de una bomba. Para el desarrollo de este trabajo se ha empleado la definida en la ecuación 1. No obstante, la metodología que se desarrolla en este documento es igualmente válida usando cualquier otra expresión matemática que represente el comportamiento de la bomba.

2.2.2.2 Curva Resistente

La curva resistente representa la altura necesaria para impulsar el caudal que la red demande en cada instante de tiempo. Por lo tanto, La curva resistente depende de las características de la red y mediante su intersección con la curva motriz se establece el punto de funcionamiento de una bomba (Figura 2). Es entonces, que la curva resistente se obtiene teniendo en cuenta tanto la altura geométrica como las pérdidas de carga en la red, estando estas últimas en función del caudal. De acuerdo con esto, la curva resistente se establece mediante condiciones reales, mientras que cuando estas condiciones de

resistencia se desconocen, se representa la respuesta de la red mediante la curva consigna (López Jimenez et al., 2003).

2.2.2.3 Punto de funcionamiento

El punto de funcionamiento se define conociendo la altura de bombeo y el caudal demandado por la red de abastecimiento (Figura 2). Una vez que se fija el punto de funcionamiento, se determina el modelo de bomba que cumpla con lo requerido. A su vez, el punto de funcionamiento depende de lo que suceda con el sistema de abastecimiento, y esto se representa con la curva resistente.

2.2.2.4 Curva de rendimiento

La curva de rendimiento de la bomba se define en función del caudal bombeado (Figura 2). El rendimiento da idea de la potencia que se pierde en el interior de la bomba. En consecuencia, esta curva es imprescindible para la selección del grupo de bombeo (López Jimenez et al., 2003). Es importante aclarar, que, para las bombas centrífugas, la curva de rendimiento tiene un comportamiento parabólico. A continuación, se muestra la expresión matemática de la curva de rendimiento:

$$\eta = EQ_b - FQ_b^2 \quad (2)$$

donde: η es el rendimiento de la bomba; E y F son coeficientes característicos y Q_b es el caudal de bombeo

La zona útil es una zona de la curva de rendimiento donde se hallan los valores de rendimiento superiores de una bomba, interesa entonces que el punto de funcionamiento se encuentre ubicado en esta zona. Si, además, el punto de funcionamiento se encuentra ubicado en el punto de mayor rendimiento, se denomina punto de funcionamiento óptimo.

2.2.2.5 Curva de consigna

La curva consigna es una herramienta la cual permite que, dado un caudal, se defina la altura mínima de bombeo que permita cumplir con la demanda (Figura 2). Es una opción a la curva resistente cuando se desconoce el comportamiento de los usuarios de la red. Así se define la altura objetivo que es necesaria para garantizar las presiones mínimas en el sistema de abastecimiento en los diferentes puntos de consumo. Es común que sea usada en la operación y gestión de abastecimientos, su principal ventaja es la representación en un plano del caudal inyectado (de un valor máximo a un mínimo) y la variación de la presión en cabecera consecuencia de la variación de los consumos. La curva de consigna se usa por lo general en la regulación y optimización energética de sistemas de bombeo en abastecimientos.

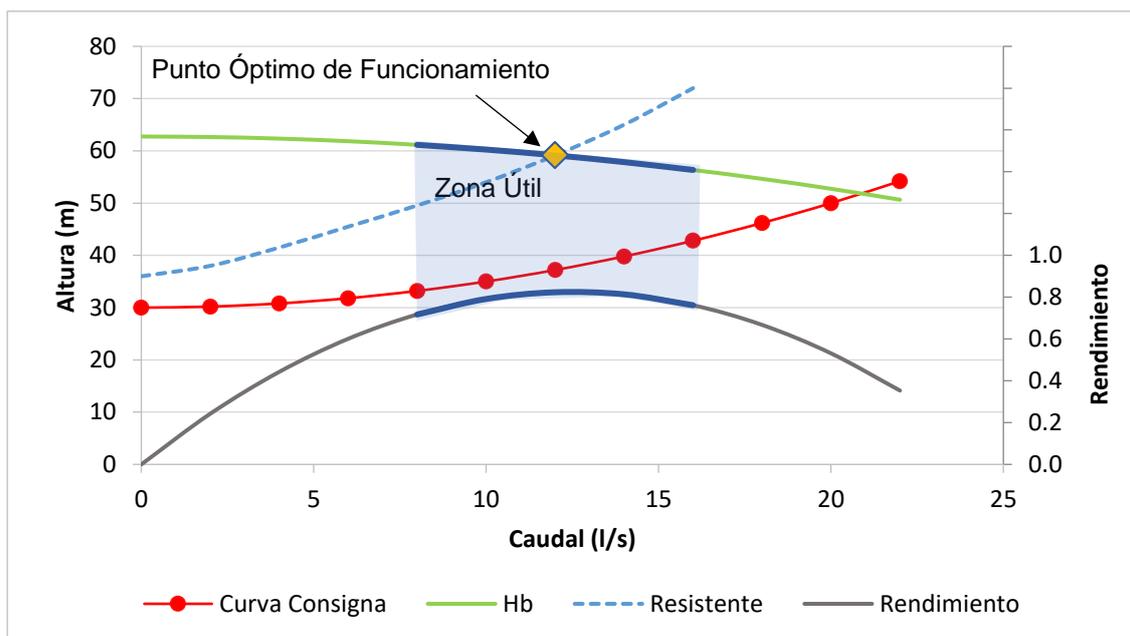


Figura 2. Curva de consigna, resistente y motriz de la bomba

La curva consigna en la Figura 2 muestra un punto de altura mínima en cabecera para cada caudal que demanda la red, con esta altura mínima se podrá garantizar la presión mínima en todos los puntos de la red incluyendo los más desfavorables. En un diseño de EB, la curva consigna se requiere cuando el sistema es de suministro directo a red. La representación matemática de la curva consigna viene dada por:

$$H = DH + RQ^2 \quad (3)$$

donde: DH corresponde a la altura inicial de la curva consigna, R el coeficiente característico de caudal, Q el caudal demandado y H la altura de cabecera.

2.2.2.6 Curva de modulación

La demanda de agua de un abastecimiento tiene un comportamiento que varía de acuerdo con la hora del día, el momento de la semana (días laborables y fines de semana), las estaciones climáticas y la cultura y naturaleza del usuario (Fuertes et al., 2003). Es por tanto que la variación temporal de un abastecimiento se caracteriza mediante una curva de modulación, con un seguimiento diario de 24 horas. La curva de modulación se define mediante la variación de la relación del caudal en cada hora y el caudal promedio.

El patrón de consumo es tan diverso como los mismos usuarios, sin embargo, en los sistemas de abastecimiento suele usarse una curva de modulación que caracteriza a toda la red. A continuación, en la Figura 3 se presenta una curva típica de modulación

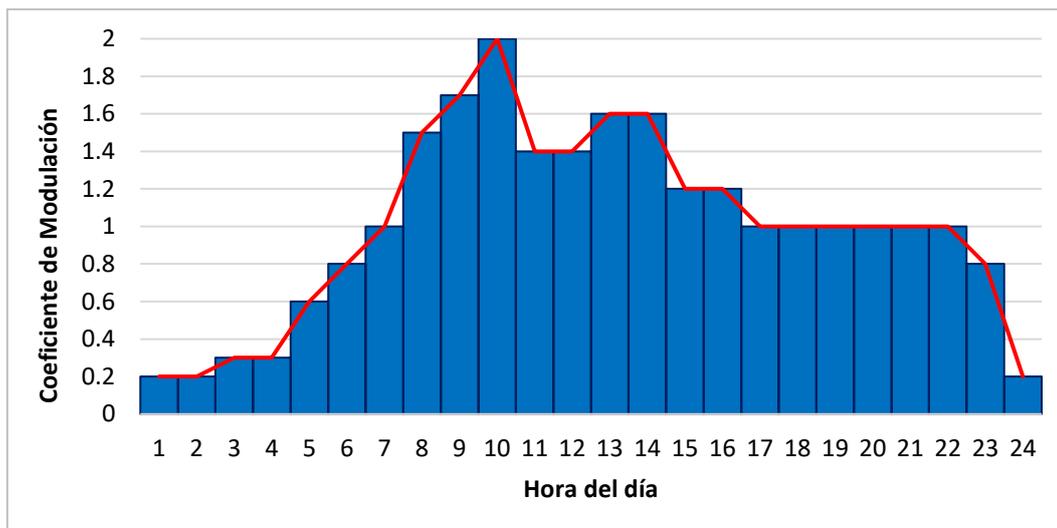


Figura 3. Curva de modulación

2.2.2.7 Comportamiento de la tarifa eléctrica

En su mayoría, los sistemas de bombeo consumen energía eléctrica proveniente de una red de suministro urbano (Sanks et al., 1998). La red eléctrica urbana está manejada por empresas prestadoras del servicio, en cada país la regulación tarifaria de la energía eléctrica difiere.

En España, la tarifa eléctrica tiene como punto de partida la Ley 54/1997, que buscaba la liberación económica del sector eléctrico. Esta ley se modificó adaptando el marco español a la Directiva 2003/54/CE, que establece la estructura tarifaria definida para usuarios que no compren directamente al sistema de producción eléctrico, cuya contratación sea inferior a 10KW y que dependan de empresas distribuidoras aceptadas por el estado español (Cordoba Zatarain, 2012).

La Ley 54/1997 se vio insuficiente, después de años de uso para garantizar el equilibrio financiero del sector eléctrico, por lo cual se estableció la Ley 24/2013 que tiene como finalidad básica establecer la regulación del sector eléctrico. En la Ley 24/2013 se establece una diferencia entre los cargos y los peajes del sistema eléctrico. Los peajes son los pagos por contribución a la cobertura de los costes de las redes de transporte y distribución, acorde a lo dispuesto en la Directiva 2009/72/CE, sobre mercado interior de electricidad y los cargos son pagos relacionados con otros aspectos del sistema.

Los cargos son una novedad en la Ley 24/2013, los cuales cubren el régimen retributivo específico de la actividad de generación a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración de alta eficiencia y residuos, retribución del coste adicional de la producción en los sistemas eléctricos en los territorios no peninsulares, y anualidades correspondientes al déficit del sistema eléctrico.

Los cargos se fijan de acuerdo con la metodología que el gobierno establezca (actualmente mediante en el Real Decreto – ley 1/2019. En el Real Decreto – ley 1/2019 de 11 de enero, se dan competencias a la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia para aprobar la metodología, los parámetros y la base regulatoria de activos para los peajes, mientras que la definición de los cargos está a cargo del Ministerio para la Transición Ecológica previo acuerdo de la Comisión Delegada del Gobierno para Asuntos Económicos.

En este Real Decreto se establece que los peajes de acceso al suministro y transporte de la energía tendrán en cuenta los costes incurridos por el uso de las instalaciones y se diferencian por niveles de presión, características del consumo y duración de los contratos. También se establece que tanto los peajes como los cargos serán únicos en todo el territorio español, se instauran para un periodo de un año. Las empresas comercializadoras están obligadas a desglosar las facturas a los consumidores finales diferenciando los peajes de los cargos.

La potencia por contratar dependerá de la potencia máxima absorbida en una instalación a lo largo de un periodo de facturación. Los sistemas de abastecimientos son sistemas que se conectan a la red de baja tensión, el reglamento que lo regula es el Real Decreto 897/2017 donde se establece la figura del consumidor para contratación de electricidad en baja tensión, estableciendo la figura del consumidor vulnerable, el bono social entre otras medidas.

2.2.3 Características de instalación en una Estación de Bombeo

Las instalaciones de bombeo están equipadas de diversos elementos concernientes tanto a la infraestructura como a la regulación. Estos elementos que hacen parte de las EB permiten que se efectúe la operación del sistema en sí. En los apartados siguientes se detallarán algunos elementos que en las EB se pueden encontrar.

2.2.3.1 Acoplamiento de bombas

De forma general las bombas pueden acoplarse en conjuntos en serie o paralelo. En el acoplamiento en serie, la impulsión de una bomba será la aspiración de la siguiente, por lo cual, el caudal bombeado es el mismo para todas las bombas y las alturas se suman. Mientras que, en el acoplamiento en paralelo, la aspiración se da desde un punto común y el caudal se inyecta a la impulsión a la red, en este caso, el caudal se suma y se mantienen las alturas.

En el acoplamiento en paralelo pueden darse dos casos. Un caso es la incorporación de bombas de diferentes capacidades, que hagan frente a caudales grandes y pequeños en el sistema de abastecimiento. El otro caso constituye en varias bombas de la misma capacidad que suministran los caudales demandados y con este acoplamiento puede variar el número de bombas que operan dependiendo de la demanda de caudal (Figura 4).

En la Figura 4 se muestra una curva resistente y las curvas de tres bombas acopladas en paralelo que van suministrando la demanda de la curva del sistema de abastecimiento. Para el caso del presente trabajo se hará uso del acoplamiento en paralelo con todas las bombas de la misma capacidad de bombeo.

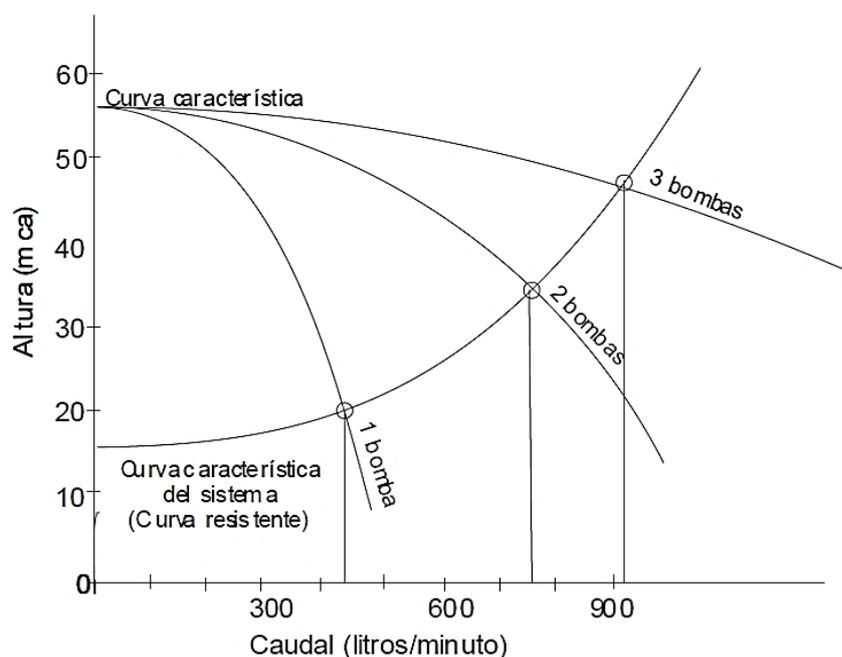


Figura 4. Curvas características de bombas asociadas en paralelo. Fuente: (López Jimenez et al., 2003)

2.2.3.2 Equipamiento hidráulico de estaciones de bombeo

El equipamiento de una estación de bombeo se divide en dos: equipamiento en la aspiración y equipamiento en la impulsión (Figura 5). En la aspiración son necesarios los siguientes elementos:

- a) Pozo de aspiración: desde donde se capta el agua
- b) Boca de aspiración: es un cono convergente – divergente que se instala en el colector de aspiración y permite la alimentación uniforme del flujo a la bomba.
- c) Válvula compuerta: permite el acceso a la bomba y su desmontaje sin la necesidad de efectuar un vaciado del depósito.
- d) Colector de aspiración: Cuando hay una instalación de bombas en paralelo, se requiere un colector de aspiración que repartirá el caudal a cada una de las bombas, y se instala con el fin de evitar la acumulación de bolsas de aire en el interior.

Ahora bien, el equipamiento necesario en la impulsión es:

- e) Difusor: es un accesorio que se instala entre la salida de la bomba y la tubería de impulsión
- f) Válvula de retención: evita el vaciado de la tubería de impulsión, cuando la bomba está detenida.
- g) Válvula de compuerta: permite aislar la bomba de la tubería de impulsión, además usarse para variar el punto de funcionamiento (es decir funciona como reguladora)
- h) Sistema de protección contra golpe de ariete, esto se hace con el fin de proteger la instalación de sobrepresiones y depresiones.
- i) Válvulas ventosas y purgadores: son elementos que se instalan para la eliminación de aire durante los procesos de arranque y paro de las bombas.

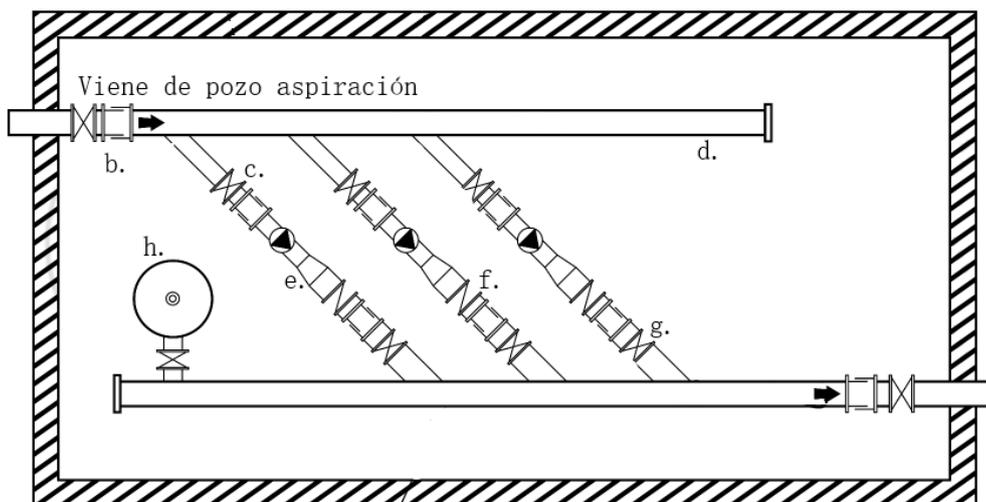


Figura 5. Esquema de equipamiento de una Estación de Bombeo. Fuente: (Martinez Solano, 2019)

2.2.4 Afectación al funcionamiento de una Estación de Bombeo

El correcto funcionamiento de una EB en un sistema de abastecimiento dependerá de una correcta selección de equipos y de un buen diseño de los elementos hidráulicos. Los elementos por diseñar en la aspiración de la bomba son de un cuidado importante, a fin de que se evite el fenómeno de cavitación.

La cavitación es un fenómeno que se produce cuando el líquido circulante en la bomba tiene un descenso de presión tal que alcanza la tensión de vapor a la temperatura en que se encuentre, colapsando las bolsas de vapor y generando una implosión donde las partículas del líquido chocan entre sí y se genera golpe de ariete, de gran intensidad y corta duración (López Jimenez et al., 2003). Se espera que ningún punto de la instalación caiga por debajo de la tensión de vapor. La tensión de vapor es una propiedad termodinámica, por lo cual, a mayor temperatura, mayor probabilidad de cavitación.

Para conocer si existe riesgo de funcionamiento de la bomba en condiciones de cavitación, es necesario el cálculo de la *Altura Neta Positiva Disponible* ($NPSH_d$). Que consiste en el margen existente entre la presión de aspiración y la presión de vapor de agua a la temperatura de trabajo en metros columna de agua. El margen disponible permitirá compensar el aumento de velocidad que sufre el fluido en el interior de la bomba y las pérdidas al chocar con los álabes. Este margen depende exclusivamente de la instalación.

Por otro lado, en el interior de la bomba se dan dos efectos a tener en cuenta en el fenómeno de cavitación. La amplitud del conducto por donde circula el agua es menor que la propia tubería de aspiración, por lo cual el fluido se acelera y la presión cae. El otro fenómeno consiste en las pérdidas por rozamiento en la entrada de la bomba que disminuyen aún más la presión. Por lo anterior, es necesaria la definición de una altura que represente todas las pérdidas de presión al interior de la bomba. A partir de ello, surge el concepto de la *Altura Neta de succión Requerida* ($NPSH_r$) y el

fabricante es quien tiene la responsabilidad de otorgar este dato. Para que la instalación esté libre de cavitación se debe cumplir.

$$NPSH_d \geq NPSH_r \quad (4)$$

Para el caso del presente trabajo se considera como premisa que las bombas se encuentran a una altura de aspiración tal que se evitan los problemas de cavitación en la EB a diseñar.

2.2.5 Regulación en estaciones de bombeo

Los equipos de bombeo buscan suministrar la energía necesaria para la circulación de un determinado caudal por un sistema hidráulico, venciendo las pérdidas de carga y los desniveles geométricos (López Jimenez et al., 2003). La regulación de un sistema de bombeo consistirá en adecuar el punto de funcionamiento del sistema hidráulico a las necesidades de demanda. Para ello se requieren diferentes modos de regulación que se emplean en sistemas de bombeo de inyección directa principalmente.

Algunos modos de regulación consisten en variar la curva resistente de la red, que corresponde a la regulación con válvulas y otros con la variación de la curva motriz con el arranque y paro de bombas instaladas solas o acopladas en paralelo, o variando la velocidad nominal de giro. En los siguientes apartados se hará una descripción de modos de regulación para EB de impulsión.

2.2.5.1 Necesidad de regular

La necesidad de regular en un sistema de abastecimiento nace de su misma naturaleza, al tener una población con consumos dinámicos que varían a lo largo del día y de un día a otro. En consecuencia, no hay forma de obtener el consumo en tiempo real y, por ende, se realizan modelos probabilísticos para establecer los valores probables de la demanda poblacional. Así pues, aunque la demanda se caracterice con probabilidades, el sistema debe estar en capacidad de responder ante cualquier demanda requerida, garantizando una presión adecuada en todos los puntos de la red de suministro (López Jimenez et al., 2003).

En sistemas de abastecimiento la regulación para sistemas de inyección directa se da por lo general en sistemas de bombeo con acoplamiento de bombas en paralelo y que van respondiendo a las variaciones de la curva resistente y a los requerimientos de la curva consigna. Para abastecimientos que bombean a depósito, la regulación viene dada por las maniobras que el sistema de bombeo puede ejecutar dada la variabilidad del nivel de agua en el depósito. En consecuencia, los objetivos de la regulación de un sistema de abastecimiento son:

- Optimizar el rendimiento de una estación de bombeo
- En sistemas de inyección directa, funcionar siempre en la cercanía de la curva consigna
- Mantener la seguridad de suministro frente a daños y averías
- Limitar las variaciones de caudal por los excesivos arranques y paradas

Existen diferentes modos de regulación con diferentes modos de control de estos. Los modos de regulación más comunes encontrados en sistemas de abastecimientos se listan a continuación y en los próximos apartados serán explicados con mayor detalle:

- Regulación mediante válvula motorizada
- Regulación mediante válvula en derivación
- Regulación mediante acoplamiento de Bombas de Velocidad Fija (BVF)
- Regulación mediante acoplamiento de Bombas de Velocidad Variable (BVV)
- Regulación mediante agrupación de BVF y BVV

2.2.5.2 Regulación con Válvula motorizada:

Se instala una válvula a la salida de bombeo en serie, a la cual se le define una presión de referencia (Figura 6). Desde un punto de la red se envía una señal de presión a un elemento de control del sistema, con lo cual se compara con la presión de referencia y cuando hay una desviación de esta, se da la orden de apertura o cierre de la válvula (López Jimenez et al., 2003). Este modelo de regulación permite tener una proximidad cercana a la curva de consigna. Sin embargo, el gasto energético es muy alto, pues la energía invertida para el bombeo se pierde cuando la válvula regula la presión de tarado.

En la Figura 6 el punto de funcionamiento sería el marcado como A y B si la válvula no existiese, con la cual la altura piezométrica sería superior a la consigna. La pérdida de carga que introduce la válvula desplaza las curvas resistentes proporcionando los puntos de funcionamiento A' y B'. Con la pérdida de carga que aporta la válvula se reduce la altura piezométrica al valor de la consigna.

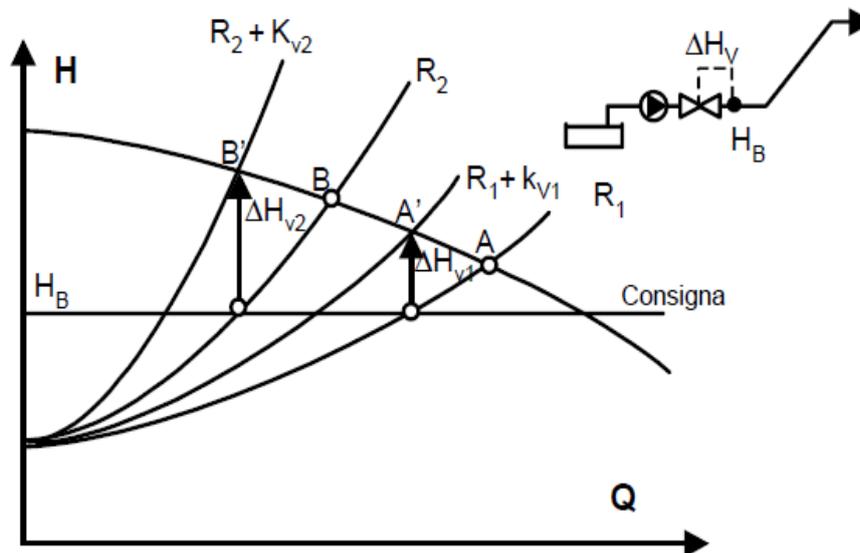


Figura 6. Regulación de altura con válvula reductora en serie. Fuente: (López Jimenez et al., 2003)

2.2.5.3 Regulación con válvula en derivación

Se instala a la salida de la estación de bombeo (López Jimenez et al., 2003). El principio de funcionamiento es colocar la bomba a trabajar en su punto óptimo y enviar un caudal constante a la

red. No obstante, como la red varía su consumo horario, el caudal se excederá y mediante un control se desviará a través de la derivación el caudal excedente hacia el pozo de aspiración (Figura 7).

La regulación mediante válvula en derivación se efectúa con una válvula que puede ser sostenedora tarada a la presión deseada. El punto P_0 en la Figura 7 corresponde a la presión de funcionamiento que permanece constante. Dependiendo de la pendiente que adopte la curva resistente de la instalación (R_{ins}), desplazándose hacia R_1 , la válvula se abrirá más o menos, manteniendo la altura de bombeo constante en P_0 y el caudal bombeado Q_0 .

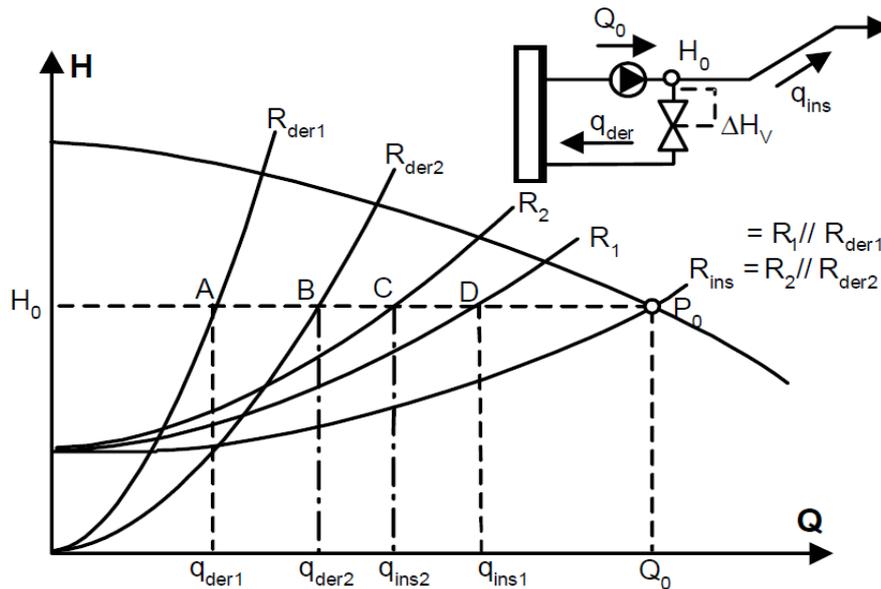


Figura 7. Regulación con válvula sostenedora en derivación. Fuente: (López Jimenez et al., 2003)

2.2.5.4 Regulación con acoplamiento de Bombas de Velocidad Fija (BVF)

Para la regulación con BVF se deben establecer niveles de arranque y parada de las bombas, que será acorde a la demanda (Fuertes et al., 2003). Existen diferentes mecanismos del control de arranque y paro de las bombas que en adelante serán descritos con detalle y lo que estos mecanismos buscan es que las bombas trabajen siempre en su punto óptimo, encendiendo o apagando las bombas, acorde a la demanda.

Este modo de regulación es uno de los usados para la valoración de las alternativas de EB de la metodología planteada en este documento, por el cual se pueden generar varias alternativas de diseño de acoplamiento de BVF con diferentes mecanismos de control.

2.2.5.5 Acoplamiento con Bombas de Velocidad Variable (BVV):

En la regulación con BVV es posible seguir la curva de consigna (López Jimenez et al., 2003). Sin embargo, el número de bombas a instalar será crucial en la medida en que, si la velocidad de giro de las BVV instaladas se alejan de la velocidad nominal, el rendimiento decaerá. Cuando se trata de una BVV, la curva motriz de la bomba se modifica tal como se plantea en la siguiente ecuación:

$$H = H_0 \cdot \alpha^2 - A \left(\frac{Q}{n} \right)^2 \quad (5)$$

La modificación de la curva motriz se da principalmente por la aparición del parámetro α . Donde α corresponde a la relación de velocidades con respecto a la nominal. Tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{N}{N_0} \quad (6)$$

Este parámetro indica que cuando la velocidad de la bomba (N) es menor que la nominal (N_0), la curva de la bomba se encuentra por debajo de la curva nominal. Actualmente la tendencia es el uso de variadores de frecuencia de la corriente alterna del motor de las bombas como elemento para variar la velocidad de giro.

En la metodología planteada en este documento la regulación con BVV es una de las usadas con las que se busca incrementar el rendimiento del sistema de bombeo al seguir la curva de consigna.

2.2.5.6 Regulación con acoplamiento en paralelo de combinación de BVF y BVV

Para este tipo de regulación la premisa es que se hará uso de una BVV y tantas BVF como sean necesarias para la instalación (Fuertes et al., 2003). Donde la misión de las BVF es cubrir los escalones de caudal, mientras que la BVV ejecuta el ajuste fino del caudal entre dos escalones consecutivos. Por lo que generalmente las BVF regulan los grandes caudales y las BVV regulan los caudales bajos, también es posible mediante este método de regulación seguir la curva consigna. No obstante, en la metodología definida en el presente documento se plantearon varios escenarios variando el número de BVF y BVV, en el capítulo de la Metodología se planteará en detalle el funcionamiento de estas combinaciones.

2.2.6 Control de la regulación

Cuando hay varias bombas en funcionamiento y la demanda de caudal varía, puede suceder que el punto de funcionamiento de las bombas se salga de la zona útil (López Jimenez et al., 2003). Para evitar esto, se debe poner en marcha otra bomba o parar la que está en funcionamiento, según sea el requerimiento de la demanda. La puesta en marcha o el paro se efectuará a través de señales dadas por una serie de controles que permiten detectar la presión, el caudal o ambos valores.

Entre el arranque y paro de una bomba a otra, debe haber recubrimiento (Figura 8). El recubrimiento ocurre cuando al acoplar dos bombas o más en paralelo, la zona útil del conjunto de bombas recubre una parte de la zona útil de cada una de las bombas. En el momento en que no se da recubrimiento, se da un excesivo número de arranques y paros cuando se bombea un caudal de esta zona.

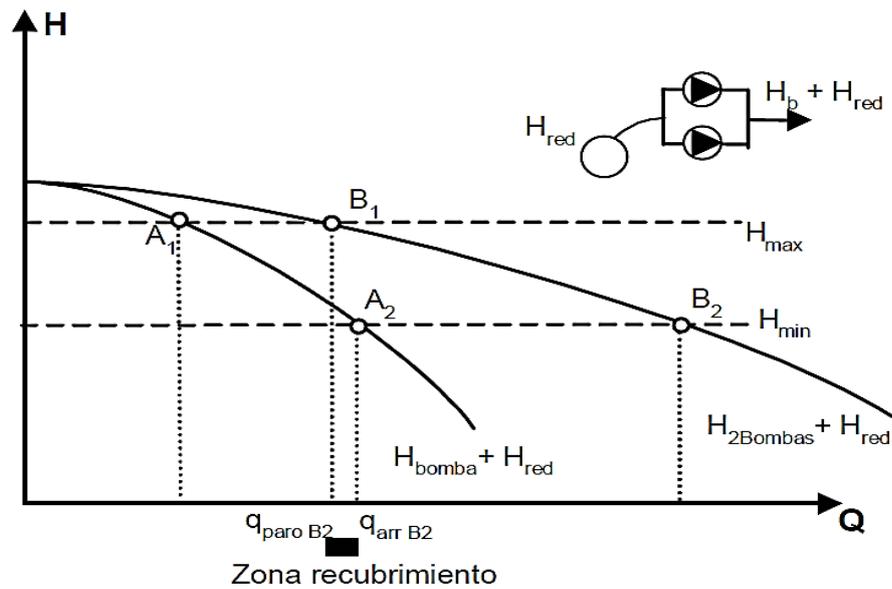


Figura 8. Recubrimiento en BVF acopladas en paralelo. Fuente: (López Jimenez et al., 2003)

La zona de recubrimiento se encuentra entre el $q_{\text{paro B2}}$ y $q_{\text{arr B2}}$, entre los cuales arranca la H_{bomba} y para la $H_{2\text{bombas}}$, si se mantiene esta zona de recubrimiento, la $H_{2\text{bombas}}$ se detendrá en un punto en el que H_{bomba} podrá seguir funcionando, si $q_{\text{paro B2}}$ se encontrara después del $q_{\text{arr B2}}$, cuando el caudal estuviese en ese rango la $H_{2\text{bombas}}$ se detendría y la H_{bomba} no tendrá la capacidad de dar el Q demandado por lo cual se volverá a prender la segunda bomba y en esta zona, se encontrará el sistema en un constante arranque y paro de las bombas, lo que podría dañar el equipo.

Los mecanismos disponibles para el control de arranques y paradas de los grupos de bombeo, así como el ajuste de las velocidades de giro de las BVV son los que se detallan a continuación y se describen con detalle en los apartados posteriores:

- Control manométrico
- Control Caudalimétrico

2.2.6.1 Control manométrico

La puesta en marcha y el paro se relacionan con la medida de presión a la salida de la EB. Por lo general la medición se realiza a través de presostatos o transductores de presión, dependiendo de la tipología de las bombas instaladas. Con BVF lo usual es el uso de presostatos, mientras que con BVV lo usual es el uso de transductores de presión.

En los sistemas sencillos, se dispone de tantos presostatos de arranque o paro como bombas tenga la EB. Cada uno de los presostatos están tarados a una presión máxima y mínima. Cada uno controla el arranque y paro de cada una de las bombas. En la Figura 9 se presenta el esquema de bombas con un control manométrico a través de presostatos.

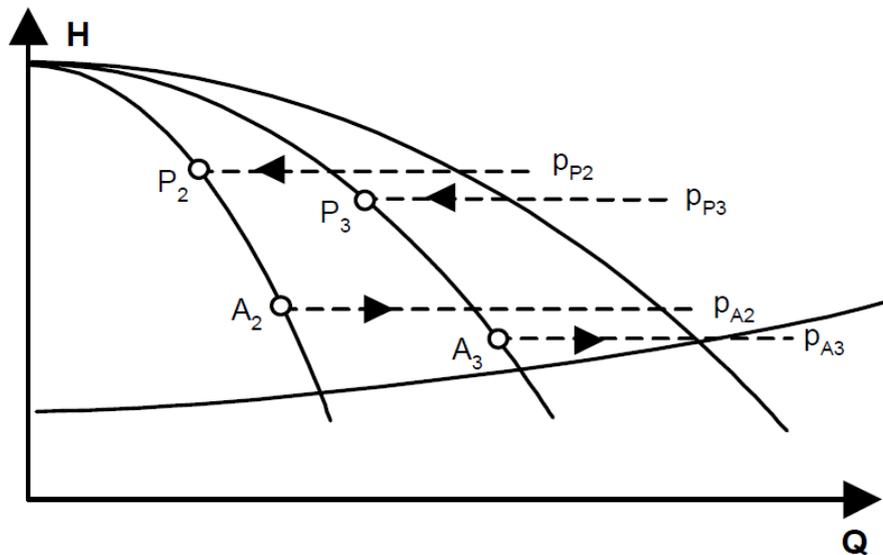


Figura 9. Esquema de control manométrico mediante presostatos. Fuente: (López Jimenez et al., 2003)

En la Figura 9 las presiones de tarado de cada presostato se desfasan ligeramente evitando el solapamiento de señal, con lo que se pretende que solo encienda o pare la bomba que realmente corresponda. Con esto se impide que existan muchas bombas asociadas en paralelo con este tipo de control, pues el margen de las señales de arranque y paro es amplio.

Es entonces que cuando se alcanza P_{A2} el presostato da la orden de arrancar la segunda bomba, si la presión continúa disminuyendo hasta P_{A3} se da la orden de arranque de la tercera bomba, así se garantiza el encendido de las bombas para ir garantizando las presiones requeridas. Cuando se alcanza una presión P_{P3} el presostato de la tercera bomba da la orden de paro, y de igual forma cuando se llega a P_{P2} .

En este tipo de regulación es necesaria la presencia de un calderín que soporte los aumentos y disminuciones de presión provocados por el transitorio de arranque y paro de las bombas. O plantear un modelo de regulación manométrico con un margen entre las presiones de tarado tal que garantice el recubrimiento de las bombas a fin de evitar el uso del calderín. Garantizando un margen de tarado de 0.5 bar se puede evitar el uso del calderín, es así como está planteado el modo de regulación manométrico con BVF para la metodología propuesta, más adelante se verá con mayor detalle.

En sistemas de bombeo más complejos, los presostatos se sustituyen por un transductor de presión, que envía continuamente la medida de presión a un *Programmable Logic Controller* (PLC). El PLC tiene programadas las consignas de arranque y paro de las bombas, de tal forma que dependiendo de la medida de la red y tomando la decisión de arrancar o parar cada bomba. Los sistemas de control manométrico no compensan la caída en la altura piezométrica con el caudal.

2.2.6.2 Control caudalimétrico

La magnitud de medida en este control es el caudal. Con base a la lectura del caudal el sistema de control decide la bomba a poner en marcha o la bomba a parar. Debido a las variaciones de la demanda es necesario que los sistemas de medida de caudal tengan una sensibilidad tal que permita la medición de caudales de bajo rango y de alto rango. En caso tal que no se pueda contar con un caudalímetro con un espectro amplio de medida podrían instalarse dos de ellos, uno que tenga un espectro de medida para caudales bajos y otro que garantice la medición de caudales altos.

Es usual que la regulación caudalimétrica se use para mantener las presiones en el sistema. Es una regulación indirecta pues es necesario conocer la curva resistente o la curva consigna para relacionar los caudales con alturas.

En la Figura 10 se puede observar que cuando el caudal supera el valor q_{arr2} , las presiones son bajas para asegurar la demanda, por lo cual el sistema de control envía la señal para el arranque de una bomba más y de igual forma sucede al superar q_{arr3} . Cuando el caudal se reduce por debajo de q_{par3} las presiones son excesivas sobre la curva de las 3 bombas en paralelo, por lo cual el sistema de control para una de las bombas y de igual forma sucede con el caudal q_{par2} .

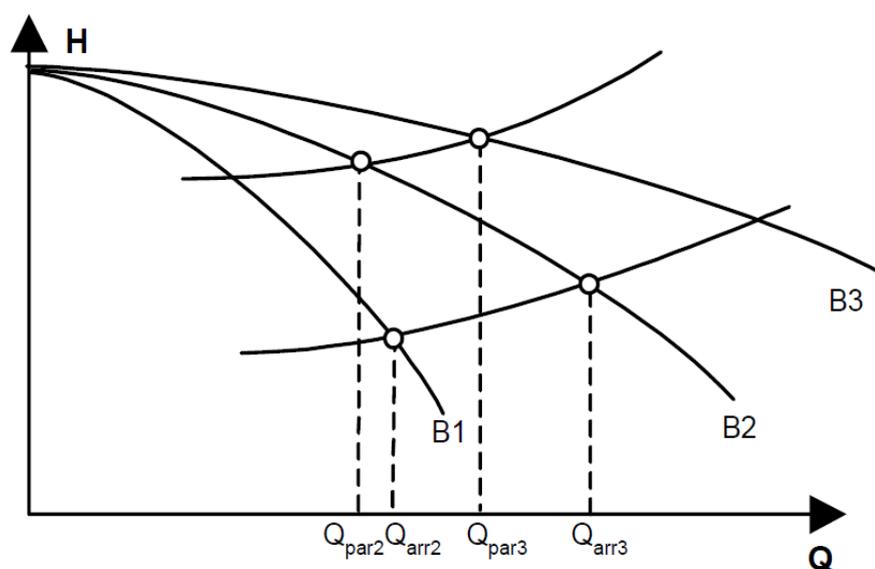


Figura 10. Control de regulación caudalimétrico. Fuente: (López Jimenez et al., 2003)

Las ordenes de arranque y paro pueden llegar a ser contradictorias. Por tanto, las curvas motrices no deben ser verticales. Deben ser lo más planas posibles de tal forma que permitan garantizar el recubrimiento.

2.3 Metodologías para el diseño de estaciones de bombeo

2.3.1 Método tradicional para la selección de estación de bombeo

Para el diseño de EB se requerirá como primera medida la definición del número de bombas (n) con el cual trabajará la instalación. Por lo general este criterio se define de acuerdo con la experiencia del diseñador o de acuerdo con el espacio con el que se cuenta en la EB. El número de bombas dependerá de las condiciones de presión y caudal que el abastecimiento imponga y se definirá con el número de bombas que garanticen el caudal máximo.

Una vez definido el número de bombas, se consulta en un manual técnico de un fabricante. El manual por consultar dependerá del tipo de bomba a seleccionar, por lo tanto, del sistema de abastecimiento y las condiciones de funcionamiento que este imponga, así como el tipo de instalación (pozo, edificio, abastecimiento, etc.).

El modelo de bomba se define a partir de la valoración de la altura correspondiente a $H(Q_{max})$ y caudal correspondiente a Q_{max}/n en los catálogos de diferentes fabricantes o de un solo fabricante (Figura 11) y la comprobación de los modelos que se ajusten a las condiciones establecidas.

A mayor número de bombas se pueden presentar mayores costes de inversión y operación, pero al mismo tiempo se da una mayor facilidad de adaptación a las necesidades de caudal con un adecuado sistema de regulación.

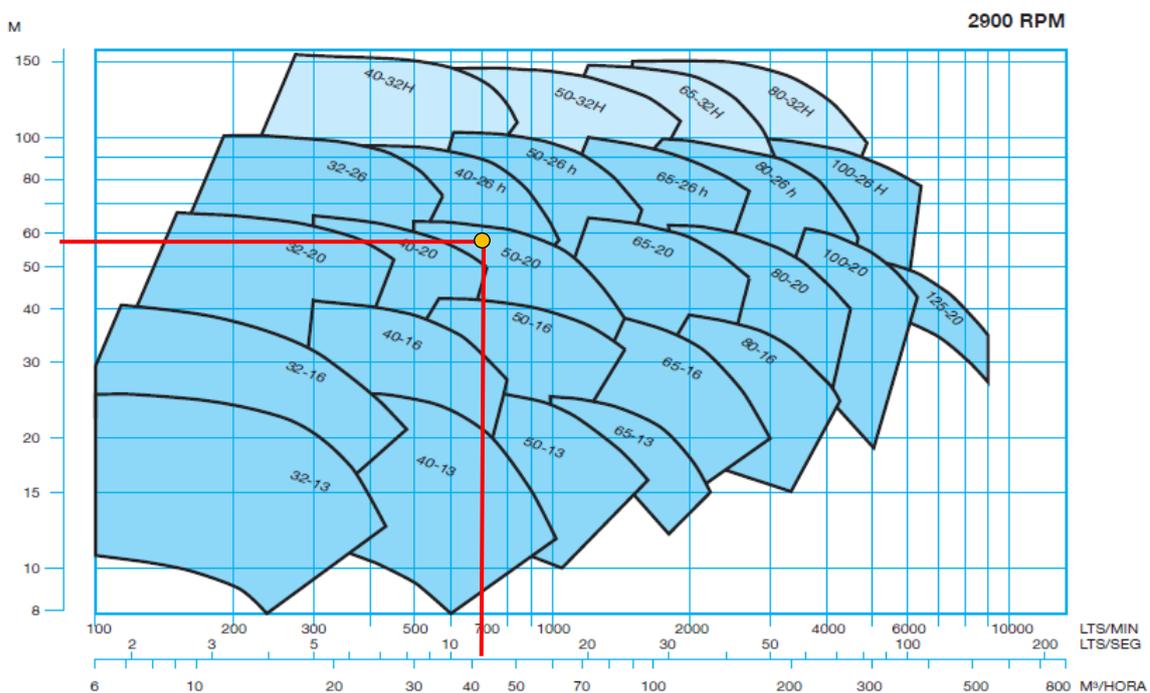


Figura 11. Grafica para seleccionar bomba con campo de trabajo de diferentes modelos Fuente: (IDEAL, 2018)

En la Figura 11 se encuentran varias soluciones bombas de un mismo fabricante. Todas las bombas presentadas son centrífugas y homologadas y tienen condiciones de diseño mecánico similares. En

esta figura se selecciona un grupo de soluciones de bombas que se ajusten a unas condiciones de presión y caudal establecidas para un número de bombas definido.

Una vez se tiene el grupo de bombas a valorar se evalúan las curvas de las bombas comprobando que la bomba trabaje con un rendimiento aceptable, localizando el punto de funcionamiento en el que la bomba opere (Figura 12). Como se observa en la Figura 12 para una misma zona de funcionamiento, el fabricante ofrece distintos modelos de bomba, pero solo uno se ajustará al punto de funcionamiento requerido.

Si al definir el modelo de bomba, el rendimiento no es aceptable, se podrá acudir a otro modelo de bomba del mismo fabricante, otro fabricante o modificar el número de bombas, buscando que estas trabajen con un caudal menor y con ello un mayor rendimiento. De acuerdo con esto, la elección del modelo de bomba es uno de los puntos más críticos en el diseño de la EB y por ende la elección del número de bombas requerido es también uno de los puntos clave en este proceso.

Cuando finalmente es definido el modelo de bomba a usar, se procede a establecer el modo de regulación que mejor se ajuste a las condiciones del sistema de abastecimiento, es decir a la curva consigna. No obstante, la solución de diseño ya se encuentra definida, una vez se define el modelo y número de bombas. Para finalizar, se calculan los costes asociados a la infraestructura.

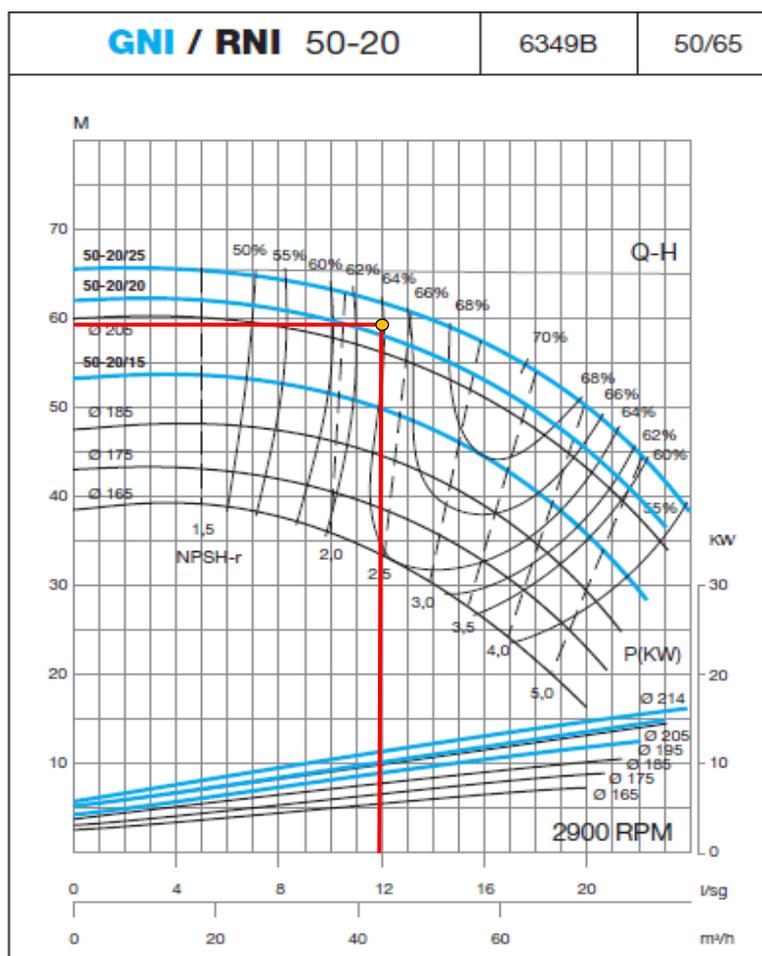


Figura 12. Curva de bomba comercial. Fuente: (IDEAL, 2018)

2.3.2 Métodos económicos de selección de estaciones de bombeo

En los métodos económicos para la selección del diseño de EB se contemplan varios aspectos relacionados con los costes de ejecución. Los costes de inversión, operación y mantenimiento. Los costes de inversión están asociados a la adquisición de toda la infraestructura requerida para poner en marcha la EB. Los costes de operación se relacionan al consumo energético durante el periodo de vida del proyecto y a otros costes que puedan incurrirse en la operación del sistema. Finalmente, los costes de mantenimiento se asocian a las actividades de mantenimiento de la infraestructura que permita garantizar la disponibilidad de los equipos durante el periodo de vida del proyecto.

Estos métodos económicos para la selección de una EB deben ser precedidos por estudios técnicos, ambientales y sociales. Una vez esto se encuentra definido, se plantea el estudio de viabilidad económica, con el fin de minimizar los costes de inversión y operación del sistema a implementar, sin comprometer los otros aspectos.

Por ello, el planteamiento de un método que involucre la viabilidad económica por lo general incluye la selección de la bomba con el método clásico y se estudian dos o más alternativas seleccionadas. De acuerdo con lo anterior, a continuación, se establecerán los métodos que se involucran para la selección de una estación de bombeo mediante un estudio de viabilidad económica (Pimentel Gomes, 2009). Para aplicar métodos de evaluación económica de proyectos, es necesario aclarar dos conceptos:

- Interés
- Tasa de interés
- Valor Presente Neto (VPN)
- Valor Anual Neto (VAN)
- Relación Beneficio/Coste (B/C)
- Tasa Interna de Retorno (TIR)
- Tiempo de Retorno a Capital (TRC)

2.3.2.1 Interés

Los intereses son una recompensa que una persona (natural o jurídica) recibe por disponer un determinado capital a otra persona, para recibirlo después de cierto tiempo (Pimentel Gomes, 2014). El interés será:

$$J = F - P \quad (7)$$

donde, F es valor futuro de inversión, P el valor presente de inversión y J el interés

2.3.2.2 Tasa de interés

La tasa de interés mide el valor total de los intereses en relación con el valor inicial de inversión (Pimentel Gomes, 2014).

$$i = \frac{F - P}{P} \quad (8)$$

La tasa de interés tiene dos divisiones: tasa de interés simple y compuesto. La tasa de interés simple sucede cuando los intereses son retirados periódicamente y la tasa de interés se aplica solamente al valor presente en un periodo determinado de tiempo. Se describe mediante la siguiente expresión:

$$J = P \times i \cdot n \quad (9)$$

La tasa de interés compuesto sucede cuando quien invierte no retira los intereses ganados periódicamente y la tasa de interés se aplica tanto al valor presente de la inversión como a los rendimientos. El valor de la inversión a futuro será entonces la presentada en la siguiente expresión:

$$F = P (1 + i)^n \quad (10)$$

En sistemas de abastecimiento las series de gastos e ingresos pueden ser constantes o crecientes. Las constantes son de valores fijos que se dan en intervalos iguales de tiempo en un periodo finito "n". Las crecientes están basadas en función del aumento de ingresos o gastos en un periodo de tiempo, es decir que uno de estos dos tenga un comportamiento creciente a lo largo del periodo del proyecto.

Los análisis económicos de proyectos relacionados con el abastecimiento, donde se contabilizan los costes de operación y mantenimiento están basados en series de gastos e ingresos constantes. Por lo anterior los métodos de evaluación económica que en los siguientes apartados se presentan se establecen con base en series constantes.

2.3.2.3 Valor Presente Neto (VPN)

Este método es utilizado cuando se comparan alternativas completamente excluyentes. Consiste en transformar todos los costes y beneficios de un proyecto en valor presente (instante cero) (Pimentel Gomes, 2014). Dentro del criterio de maximización de beneficios, la alternativa con mayor VPN será más atractiva. Si las alternativas tienen los mismos beneficios, la que tenga menor VPN será más atractiva. La expresión para determinar el VPN es:

$$VPN = Beneficios (Valor presente) - Inversión - Costes (Valor presente) \quad (11)$$

Para un flujo de caja, con un flujo de serie constante (cuotas constantes) el VPN será:

$$VPN = B \cdot FVP (i, n) - I - C \cdot FVP(i, n) \quad (12)$$

donde, B corresponde al beneficio uniforme (anual o mensual), C es el coste uniforme (anual o mensual), FVP es el Fator de Valor Presente (FVP) presentado en la ecuación 13, I corresponde a la inversión inicial, i a la tasa de interés anual y n al número de periodos que por lo general tiende a ser mensual.

$$FVP = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (13)$$

El FVP es la inversa del Factor de amortización o FRC, que se explica en el siguiente apartado. Para la valoración del VPN exclusivamente financiera se tiene que:

- VPN > 0 la alternativa es atractiva
- VPN < 0 la alternativa no es atractiva
- VPN = 0 es indiferente

2.3.2.4 Valor anual neto (VAN)

Este método permite comparar alternativas mutuamente excluyentes. EL VAN es una alternativa al método del VPN, donde todos los costes y beneficios de un proyecto, a lo largo de su alcance, son distribuidos en valores uniformes anuales. No obstante, el VAN es menos aplicado que el VPN.

$$VAN = VPN \cdot FRC(i, n) \quad (14)$$

donde, el VAN es el Valor Anual Neto, el VPN es el Valor Presente Neto y el FRC corresponde al Factor de retorno de Capital o factor de amortización, presentado en la ecuación 15.

$$FRC = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (15)$$

2.3.2.5 Relación Beneficio coste (B/C)

Consiste en la relación entre los beneficios de un proyecto y sus costes, contabilizados en un mismo periodo de tiempo (Pimentel Gomes, 2014).

Una forma sencilla para establecer la relación Beneficio/Coste es dividir el valor presente de los Beneficios sobre valor presente de los Costes, esta valoración da los siguientes resultados:

- B/C > 1 → Atractivo, mayor número de beneficios que de costes
- B/C = 1 → Es indiferente, costes y beneficios son iguales
- B/C < 1 → No es atractivo, los costes son superiores a los beneficios

Esto también puede ser desarrollado mediante la relación entre Costes/Beneficios, contabilizados en un mismo periodo.

2.3.2.6 Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR es la tasa de interés que lleva a cero el VPN de un proyecto. Es la tasa de descuento que iguala el valor presente de los ingresos (beneficios) a los valores presentes de los costes de inversión y operación. Este es un método usado ampliamente para analizar la viabilidad de un proyecto aislado, sin comparación de alternativas mutuamente excluyentes.

Una forma de determinar la TIR es establecer los valores VPN para tasas de interés crecientes (mediante una hoja de cálculo) y verificar cual valor de esta tasa lleva a cero el VPN del proyecto. Si la TIR es superior a la tasa de interés del mercado o de una alternativa de referencia, el proyecto es viable.

Una manera de avalar la viabilidad de la TIR es la comparación con la Tasa Anual Equivalente (TAE), que corresponde a la expectativa mínima de lucro que se espera de una inversión. Es decir, es la tasa de interés con la que se proyectan los beneficios. En la práctica la TAE puede considerarse como la tasa de interés equivalente a la mayor rentabilidad que ofrecen las aplicaciones de bajo riesgo.

2.3.2.7 Tiempo de retorno a capital (*Payback*) -TRC

Este indicador está dividido en dos: TRC sin descuento, y TRC descontado. El TRC sin descuento es el periodo de tiempo necesario para el retorno de la inversión inicial sin tener en cuenta las tasas de interés y el aumento de cantidades monetarias en el análisis de un proyecto. Este valor indica el tiempo necesario para que los beneficios se igualen a los costes de inversión y viene dado por la siguiente ecuación:

$$TRC = \frac{I}{B} \quad (16)$$

donde I corresponde a la inversión inicial y B son los beneficios netos periódicos esperados.

El TRC descontado corresponde al número de periodos que lleva a cero el VPN del proyecto, tomando en cuenta la tasa de interés y el aumento de cuotas en el flujo de caja. Una forma de calcular el TRC de un proyecto consiste en calcular valores de VPN para valores crecientes de número de periodos “n” y verificar cual valor “n” lleva a cero el VPN.

El análisis de TRC está directamente relacionado con la vida útil del proyecto. Si el TRC es superior al periodo de vida útil del proyecto, la inversión correspondiente no será atractiva.

2.4 Análisis de Decisión Multicriterio

2.4.1 Introducción al análisis de decisión multicriterio MCDA

La decisión multicriterio o *Multiple Criteria Decision Analysis* (MCDA) es una práctica tan antigua como la misma humanidad (Greco et al., 2016). La función de este método es la ayuda en la toma de decisiones cuando se tiene un abanico de opciones, mediante la agregación matemática de criterios que pueden presentar conflicto de intereses entre ellos. De las primeras aproximaciones a estudios formales en análisis multicriterio que se conocen están los *estudios de Programación matemática de objetivos Múltiples*, que buscaban generar una solución preferida o una aproximación en una frontera.

La MCDA es una herramienta que permite solucionar problemas con la selección de alternativas cuando se tienen las siguientes circunstancias (Acosta Ríos, Díaz Pacheco, & Anaya Salazar, 2009):

- Necesidad de seleccionar la mejor alternativa

- Reducir el número de alternativas que incluyan la mejor opción
- Requerimiento de clasificación de alternativas
- Necesidad de agrupación de alternativas en conjuntos homogéneos

Algunos conceptos importantes para analizar y estructurar la decisión en un MCDA son:

- Alternativa. Se define como alternativa a una opción que no puede ponerse en funcionamiento de manera conjunta con otra. Entonces el proceso de MCDA va dirigido a definir una sola alternativa o un grupo reducido de ellas.
- Criterio o familia de criterios. Es una herramienta construida para evaluar y comparar acciones de acuerdo con un punto de vista definido. La valoración debe considerar, para cada alternativa, todos los efectos pertinentes o atributos asociados al punto de vista considerado. En un MCDA es necesario establecer la escala en la cual el criterio se va a valorar, es decir, si el criterio se va a valorar numéricamente a que parámetro se asociará la valoración y si se va a valorar cualitativamente cual será el enfoque de la valoración. De esta forma se puede garantizar una fiabilidad en la toma de decisiones con respecto al criterio definido.
- Problemática. Se refiere a la forma en que se pronostica el análisis de decisión.

Dependiendo de la problemática de resolución para el uso del MCDA, se aplica un modelo u otro. Desde el inicio de las investigaciones en el ámbito de la decisión multicriterio, se han desarrollado múltiples métodos y se han incorporado metodologías complementarias a ellos que han permitido su uso en diferentes ámbitos de trabajo.

Este trabajo ha sido desarrollado con la idea de generar múltiples soluciones de diseño de EB, a las que será necesario clasificar y ordenar de acuerdo con unos criterios prestablecidos. En ese orden de ideas, se ha planteado la utilización del concepto óptimo de Pareto o frontera de Pareto que permitirá hacer una primera clasificación de las alternativas factibles y finalmente la aplicación del método conocido como AHP (del inglés *Analytic Hierarchy Process*), con el cual se pretende la obtención de una alternativa óptima de EB que cumpla con todos los requerimientos establecidos.

2.4.2 Frontera de Pareto

Vilfredo Pareto, fue uno de los primeros investigadores cuyo trabajo podría clasificarse formalmente como un MCDA (Greco et al., 2016). Estudió matemáticamente la agregación de criterios en conflicto en un solo índice compuesto, cuando indicó que el 20% de la población italiana poseía el 80% de la propiedad, esto se conoció como la regla 80 – 20 o principio de Pareto. También fue el primero en introducir el concepto de eficiencia (conocido como la optimización de Pareto), uno de los conceptos claves de la teoría moderna de MCDA.

La frontera de Pareto es uno de los fundamentos que hace parte de las MCDA, y está basada en los modelos con reglas de decisión “if ... then”, con un principio de dominación. El principio de dominación implica que no existe una solución óptima única, sino un conjunto de soluciones alternativas, donde estas soluciones son óptimas más ampliamente que otras, en un espacio de búsqueda cuando se consideran los objetivos simultáneamente (Abbass, Sarker, & Newton, 2001). Así las cosas, las soluciones que el modelo matemático genera son las Pareto – Óptimas (Figura 13) y se considera que esta optimización brinda flexibilidad para el tomador de decisiones.

En la Figura 13 se muestran las opciones dominantes y las dominadas en un conjunto de alternativas. Las opciones dominantes se encuentran sobre la línea roja y sería las alternativas que tienen mejores resultados ponderando los criterios con las que han sido valoradas. En el caso de la opción C no se encuentra en la frontera de Pareto porque se encuentra dominada por las opciones A y B.

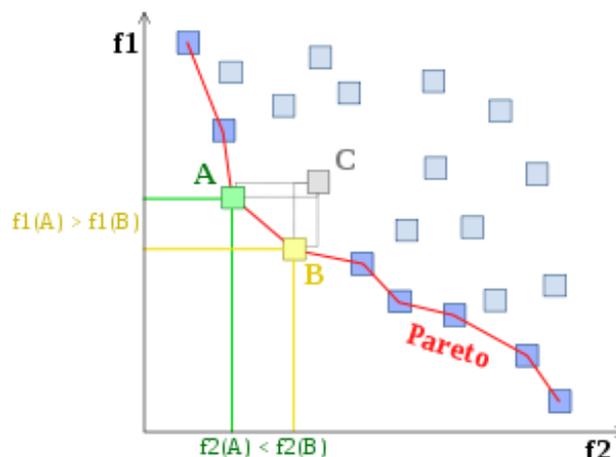


Figura 13. Frontera de Pareto

2.4.3 El método AHP

El método AHP fue desarrollado por T. Saaty (1980) con el objetivo de toma de decisiones en problemas complejos con altas incertidumbres. Este método consiste en una teoría de medición que da importancia relativa a factores que influyen en la toma de una decisión. El método AHP puede tratar con criterios intangibles y no cuantificables y permite la incorporación de juicios subjetivos de expertos que incorporan una base numérica para la solución, mediante una comparación pareada.

El AHP tiene dos etapas: la primera se trata de “descomponer la complejidad” identificando “pequeños” factores que componen el problema principal y la segunda es “sintetizar las relaciones” determinando los pesos relativos de los factores (definidos por los juicios de expertos) y la agregación del efecto acumulativo frente a un único criterio de decisión (Shapira & Goldenberg, 2005).

Para “descomponer la complejidad”, los factores se estructuran en una jerarquía. El nivel más alto está definido por el objetivo principal, en el siguiente nivel están los criterios de decisión, en un siguiente los subcriterios o criterios de segundo nivel y en el nivel más bajo se encuentran las alternativas viables (Moreno Jimenez, 2002). Para la resolución del problema es necesario que se establezcan los juicios de prioridad local, global y total. La prioridad local se establece para los elementos que hacen parte de un núcleo común (criterios de segundo nivel), mientras que la prioridad global se establece para los elementos que están directamente asociados al objetivo de la jerarquización (criterios de primer nivel) y finalmente la prioridad total se establece para la obtención de la jerarquización de los elementos que son objeto de selección para garantizar el objetivo de la jerarquía (alternativas).

Una vez la jerarquía se encuentra definida, se requieren los juicios de expertos para establecer los pesos relativos de los criterios en una comparación por pares de criterios para cada conjunto de la jerarquía (T. Saaty, 2008). En la comparación que los expertos deben hacer, se usa una escala de juicios absolutos que representa la dominancia de un elemento sobre otro, respecto a un atributo dado.

Para hacer las comparaciones, se requiere escalar los números que indica cuantas veces es más importante un elemento sobre otro con respecto al criterio al cual se están comparando. En la Tabla 1 se presenta la escala de comparación propuesta para el AHP.

Tabla 1. Escala fundamental de números absolutos. Fuente: (T. Saaty, 2008)

| Intensidad de la importancia | Definición | Explicación |
|------------------------------|--|---|
| 1 | Igual importancia | Dos actividades contribuyen de la misma forma al objetivo |
| 2 | Importancia débil o leve | |
| 3 | Importancia moderada | El juicio y la experiencia favorecen una actividad sobre otra |
| 4 | Un poco más moderada | |
| 5 | Importancia fuerte | La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra |
| 6 | Un poco más fuerte | |
| 7 | Importancia muy fuerte o demostrada | Una actividad es favorecida muy fuertemente sobre otra |
| 8 | Muy muy fuerte | |
| 9 | Importancia extrema | Se favorece una actividad sobre otra, es el orden de afirmación más alto |
| Recíprocos | La actividad i tiene asignado uno de los números anteriores cuando se compara con j, entonces j tiene el valor recíproco cuando se compara con i | Una asunción razonable |

Cada una de estas escalas de valor permite establecer la dominación relativa de un criterio sobre otro, para su construcción Saaty estableció la escala para la valoración de elementos intangibles. Cuando se valoran elementos tangibles, la psicología establece que el ser humano suele tomar la unidad y establecer el número de veces que el elemento la contiene, pero sino se dispone de una escala para valorar (en elementos intangibles) los humanos recurren a procedimientos relativos, comparando elementos entre sí de forma pareada.

No obstante, las medidas en diferentes escalas (tangibles e intangibles) no pueden agregarse, por lo cual, para su tratamiento en conjunto, Saaty considera todos los elementos como intangibles, recurriendo a las comparaciones por pares que derivan en prioridades relativas. El origen de la escala es entonces psicológico, obedeciendo a la activación de neuronas para evaluar la calidad e intensidad entre las alternativas a valorar, y esto sucede tanto para aspectos tangibles como intangibles.

Para garantizar que el proceso sea realmente exitoso, los elementos a comparar deben ser homogéneos o próximos, pues cuando están separados los individuos son incapaces de realizar comparaciones. Por lo tanto, cuando los elementos se encuentran dispersos, deben aglomerarse para efectuar la comparación.

La matriz de decisión es la herramienta matemática con la cual los expertos evalúan los criterios en pares. Con la matriz de decisión se llega a un vector propio, que viene siendo la prioridad de los criterios, siendo los pesos relativos con respecto a los criterios de un nivel superior en la jerarquía. La agregación de los juicios individuales de expertos requiere de la reciprocidad en la combinación de los juicios, obteniendo así un juicio único para el panel de expertos. Esta reciprocidad se garantiza con la

media geométrica. Por lo cual obtención del vector propio viene dada por esta fundamentación matemática.

Una vez definidos los pesos relativos locales de todos los criterios (prioridad local), estos se agregan con los pesos relativos de los criterios del nivel superior en la jerarquía, obteniéndose un vector global (prioridad global). Por otro lado, se comparan las alternativas en una matriz de comparación pareada con respecto a cada uno de los criterios y se obtiene un vector propio de comparación de alternativas. Finalmente, se deben priorizar las alternativas para lo cual existen varios métodos:

- El primer método fue desarrollado por T. Saaty (1980), donde propuso que para la valoración de las alternativas debe construirse una matriz pareada entre las alternativas para cada uno de los criterios, donde los expertos determinen que alternativa tiene mejores condiciones en cada uno de los criterios. La construcción de la matriz pareada debería realizarse con la escala de Saaty.
- El segundo método es la normalización de los valores de los criterios con respecto a la suma total del valor de cada criterio para cada una de las alternativas. Según Moreno Jimenez (2002) en este caso se suelen agrupar las alternativas en sentido creciente en cuanto al atributo, normalizando todas las prioridades en una única escala.
- El tercer método que está siendo extendido para la valoración de las alternativas es la definición de *Ratings* (T. L. Saaty, 2006). Con el cual se busca valorar cada alternativa independientemente del resto de ellas. El proceso de decisión se efectúa evaluando cada alternativa con respecto a un "ideal" fijado arbitrariamente como punto de referencia, con lo cual se establecen unos escalones de variaciones de calidad o categorías y las alternativas se evalúan con respecto a cada una de estas categorías.

Finalmente, para la obtención del vector de prioridad de las alternativas, se pondera la valoración de las alternativas por cada criterio con el vector global de los criterios de decisión, obteniéndose un vector total que permite jerarquizar las alternativas. Por otro lado, un elemento adicional del AHP es la "Relación de consistencia" (CR del inglés Consistency Ratio), que corresponde a una herramienta que permite controlar la consistencia de las comparaciones pareadas. Al ser juicios de valor subjetivos, la consistencia no es absoluta en el procedimiento de comparación

La consistencia en la toma de decisiones se podría interpretar como la coherencia entre las decisiones relacionadas entre sí. Para el AHP la consistencia demuestra que tan cercano se encuentra un experto de tomar decisiones lógicas. La propuesta de Saaty (2001) es la valoración de la consistencia a partir de la razón de consistencia.

En AHP se dice que el decisor es consistente si la matriz de comparaciones también lo es. Es decir, que sea posible verificar que:

$$a_{ij} a_{jk} = a_{ik} \text{ para } i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

Esta propiedad requiere que todas las columnas y filas de la matriz A sean linealmente dependientes. Las matrices de 2x2 son siempre dependientes y por tanto estas siempre serán consistentes.

Entonces para evaluar la consistencia del decisor, es necesaria la evaluación de la razón de consistencia, que viene dada por la expresión:

$$CR = \frac{IC}{IA(n)} \quad (18)$$

donde, IC es el índice de consistencia y IA(n) es el índice de consistencia aleatorio. El índice de consistencia viene dado por la siguiente expresión:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (19)$$

De esta expresión, el valor de λ_{\max} debe cumplir con la siguiente expresión:

$$\lambda_{\max} \bar{W} = A\bar{W} \quad (20)$$

Donde \bar{W} es el estimado de los autovalores del vector propio. Al cumplirse esta condición $\lambda_{\max} \geq n$. Entre más cercana sea λ_{\max} a n , más consistente será la matriz de comparación A. El valor de λ_{\max} se determina al calcular primero el vector columna A y sumando sus elementos.

El índice de consistencia aleatorio IA, ha sido obtenido al simular aleatoriamente los juicios para matrices recíprocas de orden n, este índice viene dado por la Tabla 2.

Tabla 2. Índice de consistencia aleatorio de acuerdo con el número de elementos comparados.
Fuente: (Moreno Jimenez, 2002)

| n | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| IA | 0.525 | 0.882 | 1.115 | 1.252 | 1.341 | 1.404 | 1.452 | 1.484 |

Hay algunos autores que establecen que el IA se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$IA = \frac{1.98 \cdot (n - 2)}{n} \quad (21)$$

Los valores de CR se encuentran entre 0 y 1 donde CR=0 corresponde a una matriz consistente y CR=1 corresponde a una matriz inconsistente. Para que se considere que una matriz es consistente, el CR debe ser menor a 0.1.

Existen algunas limitaciones del AHP que Shapira & Goldenberg (2005) han resumido de la siguiente forma:

- Probabilidad de “cambio de rango”, donde una alternativa definida como la mejor no se elige cuando se elimina una alternativa del conjunto de alternativas. Que según publicaciones posteriores esto se elimina garantizando el entendimiento a las preguntas planteadas durante las comparaciones.
- Problemas con la consistencia impuesta por la restricción de las comparaciones, esto sigue siendo un problema para el planteamiento del AHP (T. Saaty, 2008).
- Variación de las expresiones verbales entre una persona y otra y la dependencia del tipo de elementos involucrados en la comparación.

El método AHP es uno de los modelos de MCDA más utilizados en los últimos años, y ha tenido éxito en la valoración de diferentes proyectos con concepción multicriterio. En el trabajo que se ha desarrollado, la metodología planteada tiene como base el método AHP para la obtención de una alternativa viable de diseño de EB, que viene siendo una de las tantas aplicaciones en ingeniería al que este método ha aportado.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1 Introducción

Tal como se ha descrito anteriormente, el diseño de EB actualmente se desarrolla desde una perspectiva técnica y económica. No obstante, el diseño de una EB implica diversos factores que en muchos sentidos se desconocen con las metodologías actualmente utilizadas para tal fin. La metodología que a continuación se presenta para el diseño de EB, se ha desarrollado contemplando la filosofía del concepto multicriterio, donde se evalúan diversos factores que influyen en el sistema y establece la alternativa más favorable.

El análisis multicriterio de este documento se ha fundamentado en el método AHP, donde un grupo de expertos ha definido la prioridad de unos criterios establecidos y a partir de ahí se han valorado las alternativas para el diseño. Aunque el AHP involucra la participación de expertos para valorar tanto los criterios como las alternativas, la propuesta de este trabajo consiste en consultar a expertos la valoración de los criterios y plantear una metodología para la evaluación de las alternativas, sin recurrir de nuevo a la consulta.

3.2 Planteamiento del esquema de trabajo

El desarrollo de esta metodología antecede desde el 2018, cuando Arango Gil (2018), planteó una metodología de diseño de EB, que contempla la selección de alternativas con base en la estrategia de regulación que finalmente busca la reducción de costes de inversión y operación de los sistemas de bombeo. Para el desarrollo de esta metodología, Arango planteó una frontera de Pareto que establecía entre un grupo de alternativas de diseño de EB, unas dominantes que tenían menores costes de inversión y operación. Los costes de inversión se obtuvieron mediante funciones de coste del suministro de cada uno de los elementos de la EB. Los costes de operación se obtuvieron de acuerdo con la variación del modo de regulación y los costes de energía eléctrica asociados a la potencia consumida.

Siguiendo esta línea de investigación, Antón Piera (2019) planteó una metodología para el diseño de EB con base en la optimización de costes y la aplicación del AHP. Tomó como base el trabajo desarrollado por Arango, incrementando el número de criterios a valorar. Además de los costes de inversión y operación, incluyó los costes de mantenimiento, el número de bombas y la complejidad del sistema de regulación (Tabla 3). En este trabajo fueron consultados 15 expertos para la determinación de los juicios de los criterios en el AHP.

No obstante, Anton Piera en contraposición al desarrollo de Arango, realizó la valoración numérica de los costes de inversión de las alternativas con base en la estimación real de costes. Para el cálculo de los costes mantenimiento, su base consistió en el conteo del número de elementos de la EB como criterio para establecer cuáles de las alternativas tenían un mayor número de elementos que pudiesen requerir mantenimiento, con lo cual no calculó específicamente los costes de esta actividad. Para la selección de alternativas con el método AHP, resolvió de forma global matrices de grandes dimensiones a través de ratings automáticos de valoración basados en la relación numérica entre las soluciones cuantitativas.

En el desarrollo de este trabajo se ha utilizado la metodología planteada por Anton Piera (2019), que en adelante será denominada como MP1, manteniendo los criterios establecidos. No obstante, se extendió el número de expertos consultados a 49, debido a que los 15 expertos consultados por Anton Piera tenían una razón de consistencia inadecuada. Los expertos consultados en este trabajo trabajan en diferentes ámbitos, como académico, comercial, construcción, consultoría, gestión, operación y dirección. Adicionalmente, en el transcurso de este trabajo, a la MP1 se le efectuaron algunas modificaciones. A continuación, se listan las modificaciones más relevantes y más adelante cada uno de estos puntos se abordarán con más detalle:

- La estimación de costes de inversión ha tomado como base la misma filosofía de Arango (2018), aunque además de los costes de suministro se incluyeron los costes de instalación de cada uno de los elementos. Estos costes de instalación fueron obtenidos mediante análisis de precios unitarios.
- La estimación de costes de mantenimiento fue desarrollada con base en un programa de mantenimiento preventivo con una frecuencia de mantenimiento de cada uno de los equipos en la EB.
- La jerarquización de las alternativas fue llevada a cabo a través de la normalización de los vectores para los criterios considerados cuantitativos y se estableció una valoración a través de *rating* para los criterios cualitativos.

Tabla 3. Criterios de diseño de EB para MP1

| Código | Criterio |
|--------|--|
| C1 | Numero de bombas instaladas. |
| C2 | Coste de inversión |
| C3 | Coste de operación. |
| C4 | Coste de mantenimiento. |
| C5 | Complejidad del sistema de regulación. |

Este grupo de criterios son básicos para establecer el diseño de una EB, con la definición del número de bombas se permite conocer la complejidad del sistema de regulación que dará estructura al diseño de la EB. Los costes que, a partir de definir los anteriores criterios, serán imprescindibles para optar por una solución de diseño que se adapte a las condiciones económicas de quien realice la inversión.

En el transcurso del desarrollo de este trabajo con los criterios establecidos en MP1 se observó la necesidad de incorporar un mayor número de criterios para el diseño de EB, ya que existían aspectos que no habían sido tenidos en cuenta, como el tamaño de la EB, aspectos medioambientales y la eficiencia energética. Con lo cual surgió el planteamiento de una nueva metodología considerando nueve criterios (Tabla 4). Esta nueva metodología en adelante será denominada como MP2.

En la MP2 los criterios fueron agrupados en tres conjuntos de factores, consideración que no se había tenido en cuenta en MP1. Debido a que, conforme con el componente psicológico del AHP, es relevante que los elementos comparados pertenezcan a grupos homogéneos o relativamente próximos, pues de acuerdo con la investigación realizada por Moreno Jimenez (2002) los individuos solo pueden comparar con precisión elementos próximos y con un número de elementos reducidos. Así, las agrupaciones de los factores se establecieron con base en tres enfoques: técnicos, ambientales y económicos, que según (Pimentel Gomes, 2009) son los pilares para valoración general de un proyecto de infraestructura principalmente en proyectos de sistemas de abastecimiento.

Los criterios que se comparten entre la MP1 y la MP2 fueron calculados de la misma forma, y más adelante se detallará la forma en que fueron calculados los otros criterios valorados. En esta nueva metodología se hicieron un sinnúmero de cambios y apreciaciones que se irán describiendo con más detalle en el transcurso del documento.

Tabla 4. Planteamiento de Criterios para MP2

| Criterios de primer nivel | Criterios de segundo nivel |
|---------------------------|---|
| F1-Factores Técnicos | C1 Tamaño de la Estación de Bombeo |
| | C2 Complejidad del sistema de regulación |
| | C3 Flexibilidad del sistema |
| F2-Factores Ambientales | C4 MEI - Eficiencia energética de la bomba |
| | C5 CO ₂ Emitido |
| | C6 Rendimiento de regulación |
| F3-Factores Económicos | C7 Coste de inversión |
| | C8 Coste de operación |
| | C9 Coste de Mantenimiento |

Como puede observarse en la Tabla 4, una de las principales aportaciones en la MP2 es el componente ambiental en las emisiones de CO₂, la eficiencia energética de la bomba y el rendimiento de regulación que fueron criterios proyectados con miras al cumplimiento de los ODS en el diseño de infraestructuras, acorde con la *Agenda 2030*.

Un aspecto importante para considerar es que en la MP1 el número de bombas se considera un criterio que pretendía garantizar la simplicidad de la EB, debido a que, con un menor número de bombas, esta sería menos COSTEsa. No obstante, en la MP2 se evalúa el número de bombas en función de la flexibilidad, es decir, que se busca que la EB tenga la capacidad de adaptarse si llegasen a haber fallos con alguno de los equipos en funcionamiento y a un mayor número de bombas, habrá más posibilidades de respuesta ante estas contingencias. Esto se efectuó de esta forma debido a que la simplicidad se puede establecer indirectamente con los costes de inversión y operación.

En contraste, en la MP2 se ha valorado el tamaño de la EB, que al ponderarse con el número de bombas permitirá garantizar la flexibilidad de esta, pero con un tamaño que sea razonable y a unos costes que también lo sean. La valoración económica de las alternativas se razonó de forma similar en la MP1 y la MP2.

Del análisis de la encuesta para MP1, se observó que entre los expertos de diferentes colectivos existe un consenso en la valoración los criterios, además como se explicará con detalle más adelante, el grupo de académicos que valoraron la encuesta en MP1 fueron quienes tuvieron resultados más cercanos al promedio total. Por lo cual en la encuesta para MP2 no se vio la necesidad de extender el número de expertos consultados y en su lugar fue consultado un grupo de 8 académicos especialistas en el campo de las EB.

El proceso llevado a cabo en ambas metodologías se desarrolló a través de tres componentes y que en los siguientes apartados serán descritos con mayor detalle. En las Figuras 14 y 15 se representan los flujogramas de cada una de las metodologías:

- Modulo 1: Hipótesis de partida.
- Modulo 2: Selección de alternativas viables.
- Modulo 3: Aplicación del método AHP.

En el Módulo 1 tanto de la MP1 como de la MP2 se encuentran consignadas todas hipótesis de partida, que en si se refieren a los datos básicos con los que se debe contar para iniciar cualquier proceso de diseño de EB. Cada uno de los datos de la hipótesis de partida deben ser suministrados por el sistema de abastecimiento, estos serán descritos con mayor detalle en los apartados siguientes.

En el Módulo 2 es donde se encuentran establecidas las grandes diferencias entre MP1 y MP2. En MP1 los criterios se encuentran agrupados en un solo conjunto e interrelacionados entre sí, con el cálculo de estos criterios se dará paso a un conjunto de alternativas que serán depuradas en la frontera de Pareto. En MP2 los criterios se encuentran agrupados en tres submódulos, que corresponden a los tres criterios de primer nivel jerárquico establecidos para la valoración de las alternativas. Estos criterios serán valorados y a partir de ellos se generarán las alternativas que en la frontera de Pareto serán igualmente afinadas.

Finalmente, el Módulo 3 corresponde a la valoración de las alternativas depuradas en la frontera de Pareto por el método AHP. El procesamiento del AHP se llevó a cabo de la misma forma en MP1 y MP2. La diferencia radica en la obtención de los pesos globales, que en MP2 debe considerarse la ponderación de los criterios de primer nivel, con los criterios de segundo nivel, mientras que en MP1 solo es la ponderación de todos los criterios.

A pesar de la intención de separar los criterios en factores de la MP2, una completa independencia de estos, es difícil de lograr, pues siempre habrá unos criterios que dependan de otros. En este caso, casi todos los criterios dependen de los definidos en los factores técnicos. Los factores técnicos son por tanto el punto crítico en el diseño de las EB.

Todo el procesamiento tanto de MP1 como MP2 fue desarrollado mediante una aplicación de cálculo que contaba con herramientas de cálculo como macros. Mediante esta herramienta se obtuvieron cada uno de los criterios, su valoración y finalmente la alternativa optima aplicando el método AHP.

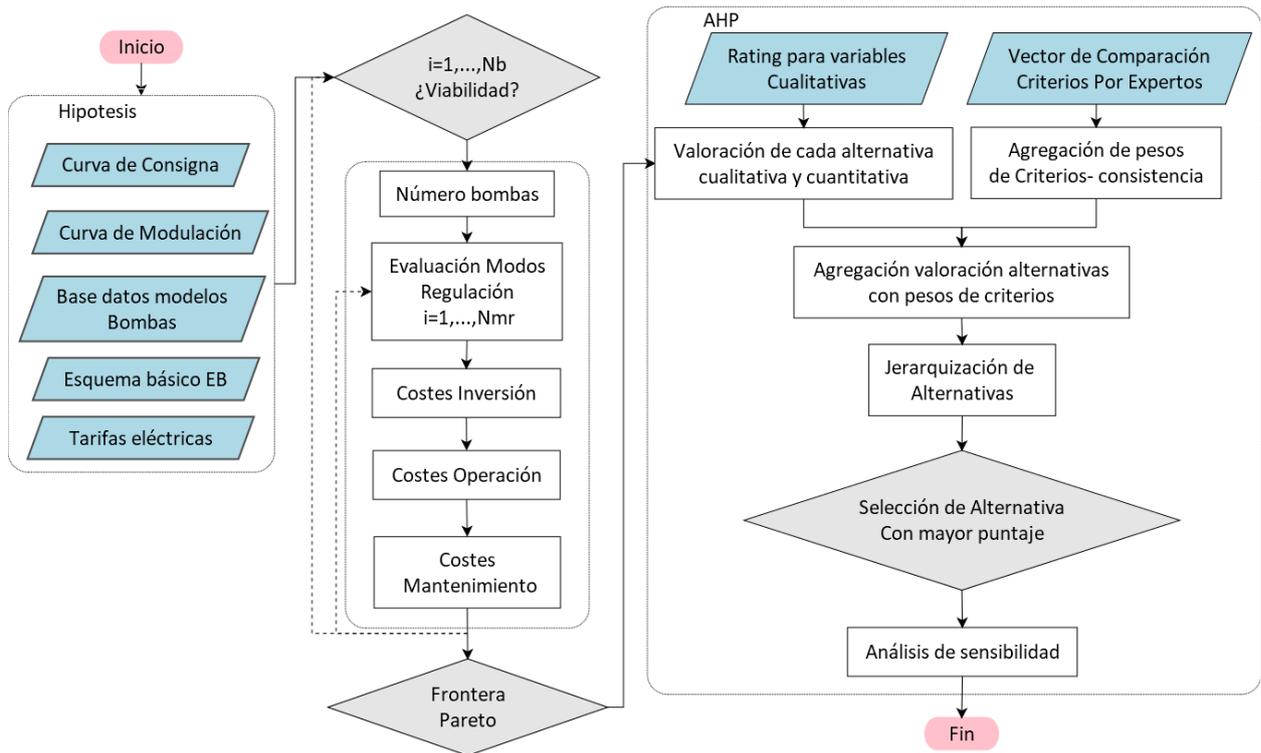


Figura 14. Diagrama de flujo para MP1

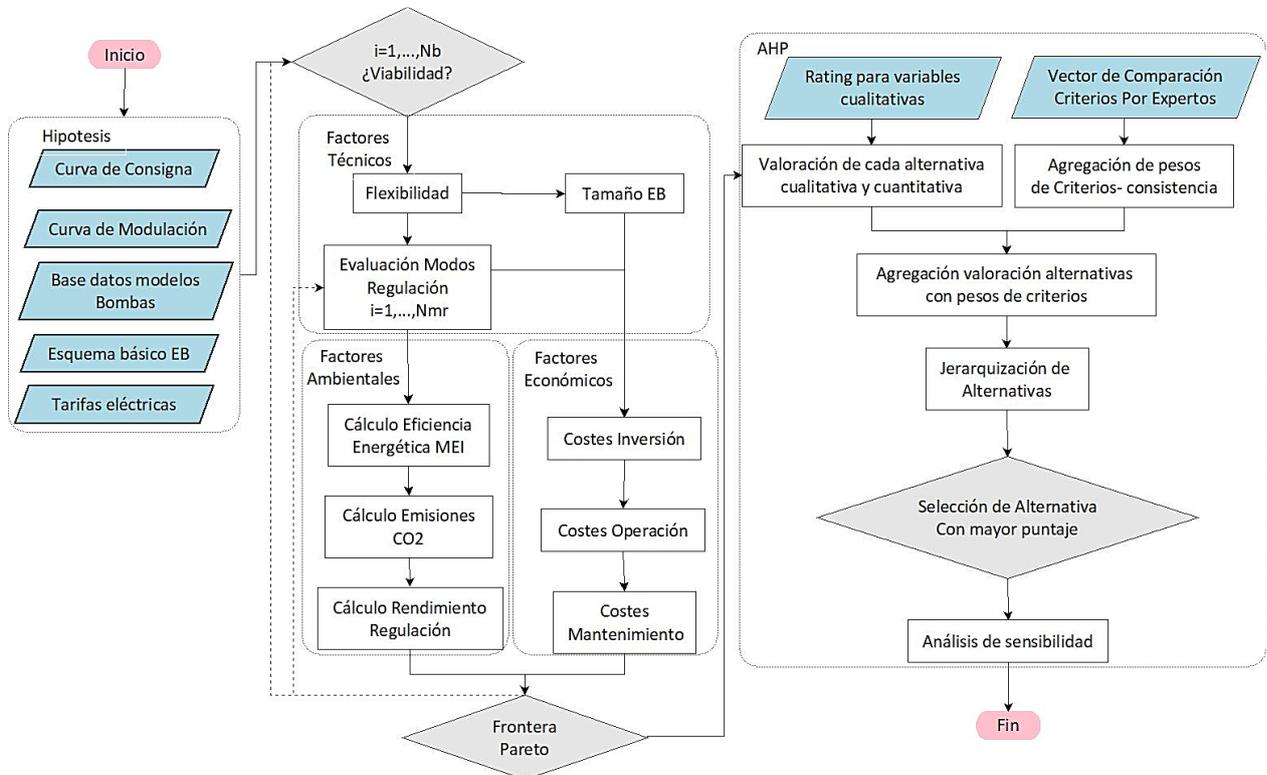


Figura 15. Diagrama de flujo para MP2

3.3 Modulo 1 – Hipótesis de partida

Como ya se ha ido explicando, las hipótesis de partida vienen siendo los datos previos necesarios para la definición del diseño de la EB. Los datos de partida deben ser suministrados por el abastecimiento. Cualquier modificación que pueda darse en estos datos supone que debe aplicarse de nuevo la metodología, por lo cual se establecen como hipótesis iniciales a considerar. Las hipótesis de partida son las mismas para MP1 y MP2.

3.3.1.1 Esquema básico de la estación de bombeo

Las EB para las cuales se ha desarrollado la metodología basada en el método AHP son para el abastecimiento de agua de inyección directa, con bombas de suministro centrifugas acopladas en paralelo. Además, se considera como premisa que la EB no tiene problemas de funcionamiento con la altura de aspiración, es decir que las bombas se encuentran a una altura suficiente tal que se cumple la igualdad planteada en la ecuación 4.

De acuerdo con el equipamiento planteado en el *Capítulo 2* y con base en los elementos requeridos mencionados en el libro de Sanks et al., (1998), Iglesias Rey et al. (2018) plantearon un esquema básico de una EB parametrizada. Para este proyecto, se ha generalizado ese esquema básico incluyendo una bomba de reserva que garantice la fiabilidad de la EB. El esquema de este diseño paramétrico se recoge en la Figura 16. Los parámetros N_1 , N_2 y N_3 son las longitudes características de la EB, que se consideran proporcionales al diámetro nominal (DN) de la tubería:

$$N_i = n_i \cdot DN_i \quad (22)$$

donde N_i es la longitud del tramo, DN_i el diámetro nominal del tramo y n_i un parámetro característico que es necesario fijar en cada caso de acuerdo con las características de la EB. Los diámetros nominales de cada tramo se calculan a partir del caudal máximo (Q_{max}) y la velocidad máxima de diseño (V_{max}). Con estos diámetros y los parámetros N_1 , N_2 y N_3 quedan definidas todas las dimensiones de la EB.

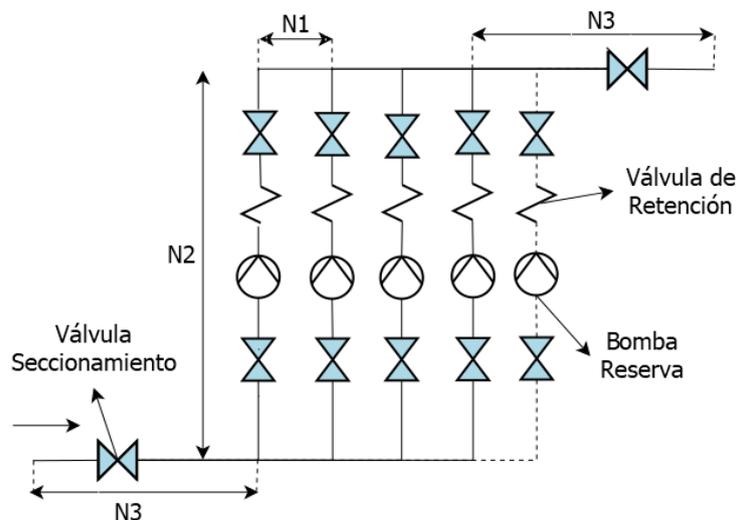


Figura 16. Esquema básico de la EB

3.3.1.2 Curva consigna

La curva de consigna representa la altura mínima necesaria a la salida de la EB que garantice el suministro de la demanda con condiciones de presión y caudal requeridas (León Celi et al., 2017). Es un dato que debe ser suministrado por el sistema de abastecimiento. En el apartado 2.2.2.5 este requerimiento fue explicado con mayor detalle.

3.3.1.3 Curva de modulación

Es la representación del patrón de demanda, y corresponde a la relación entre el caudal en cada instante y el caudal medio. Es un dato que debe también ser suministrado por el sistema de abastecimiento. En el apartado 2.2.2.6 fue explicada esta curva con mayor detalle.

La curva de modulación y la curva consigna son los parámetros que finalmente permiten obtener los requerimientos de altura y caudal que el sistema de abastecimiento demanda para el diseño de la EB.

3.3.1.4 Base datos modelos de bomba

A partir de la consulta de catálogos técnicos de fabricantes de bombas homologadas y centrífugas que puedan acoplarse en paralelo, de acuerdo con el esquema básico planteado en el apartado 3.3.1.1, se efectúa la selección de una o varias bombas para una EB, de acuerdo con la base de datos entregada por estos. En la metodología planteada se requiere de una base de datos lo suficientemente extensa para que se puedan valorar diferentes alternativas y que contenga curvas características, potencia y rendimientos óptimos de cada modelo de bomba.

Las alternativas posibles que se obtengan a partir de la base de datos pueden contener pocas o muchas bombas, soluciones con mayores o menores rendimientos, curvas motrices de mayor o menor pendiente, etc. En cualquier caso, la base de datos debe incluir bombas que funcionalmente sean compatibles con los requerimientos de la EB que se esté diseñando.

3.3.1.5 Tarifas eléctricas

Las tarifas eléctricas deben ser un dato suministrado por una empresa prestadora de servicios de energía con la cual se contrate el suministro. A efectos de la presente metodología se plantea una estructura tarifaria que varíe de acuerdo con la hora del día y la estacionalidad en el año. Sin embargo, es un dato que puede modificarse por quien realiza el proceso de diseño. Un ejemplo de la distribución tarifaria es la Tarifa Optima de la empresa ENDESA para potencia contratada inferior a 10KW (Cada empresa tiene diferentes modelos tarifarios), en la Tabla 5 se muestran los precios de la energía de acuerdo con la franja horaria presentada en la Figura 17.

Tabla 5. Tarifa de cada hora establecida: Fuente: (ENDESA, 2020)

| Optima hasta 450 KW | Punta | Llano | Valle |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| Termino de energía | 0.097399 €/KW | 0.090843 €/KW | 0.071349 €/KW |



Figura 17. Variación horaria de la tarifa eléctrica “Óptima” Endesa. Fuente: (ENDESA, 2020)

3.4 Viabilidad de las alternativas

Según el método AHP que Saaty (2008) plantea, las alternativas de selección que sean evaluadas ya deben ser viables, es decir, ya deben ser posibles alternativas aplicables. Por lo cual el segundo módulo de la metodología planteada para el diseño de EB inicia con la determinación de las alternativas que puedan ser viables para la aplicación de AHP. En los apartados que vendrán a continuación se explicarán por aparte cada uno de los elementos del Módulo 2, en el cual se establece la selección de alternativas viables que serán valoradas con el AHP.

Una alternativa corresponde a una estación de bombeo completa diseñada con un modelo de bomba de una base de datos de un fabricante homologado, trabajando con un modo de regulación especificado y que tiene diferentes valores para cada uno de los criterios planteados en las Tablas 3 y 4.

Para establecer los diferentes conjuntos de alternativas lo primero que se debe garantizar es que el modelo sea factible para garantizar las condiciones de operación que requiere el sistema de abastecimiento. Por lo cual como primera medida se garantiza que la altura de bombeo que corresponde al caudal máximo demandado $H(Q_{max})$ sea superior a la altura a caudal nulo H_0 de la curva motriz. Si esta condición no se cumple, el modelo no es viable. En los apartados siguientes se establecerán los criterios a valorar para llegar a establecer las alternativas viables.

3.5 Parámetros clave de la metodología

Tanto en la MP1 como la MP2 existen dos parámetros que tienen una gran importancia en el desarrollo de todo el proceso de selección de alternativas. A partir de estos parámetros se determinan diferentes alternativas de EB.

Una vez es definida la viabilidad del modelo de bomba, dicho modelo debe valorarse de acuerdo con los criterios clave descritos en este apartado. A partir de la valoración de los modelos con estos criterios se genera un grupo de alternativas para cada modelo de bomba viable.

3.5.1 Número de bombas

Una vez se establece que el modelo de bomba es viable, se calcula el número de bombas con el cual se puede abastecer el caudal máximo de bombeo requerido por la red. El número de bombas varía dependiendo del modelo seleccionado, es decir, que puede haber modelos que garanticen el suministro de la red de abastecimiento mediante un número específico de bombas y otros modelos que garanticen el suministro, pero con un mayor número de bombas.

Para un modelo de bomba, se toma el caudal máximo requerido por la red de abastecimiento y se divide en un número de bombas tal que garantice dicho caudal con la altura especificada. Tanto en la MP1 como en la MP2 este cálculo es llevado a cabo de la misma forma.

3.5.2 Modo de regulación

La regulación de las EB es necesaria para garantizar la demanda de suministro con consumos dinámicos que varían a lo largo del día y de un día para otro. El sistema de bombeo debe estar preparado para responder ante cualquier demanda que se presente garantizando las presiones en los puntos de la red.

Los modos de regulación valorados son los que utilizan bombas con acoplamiento en paralelo. Los modos de regulación que incluyen la instalación de válvulas de control en serie o en derivación no han sido tenidos en cuenta para la generación de las posibles alternativas de EB con esta metodología, debido a que estos con válvulas de control descritos en el Capítulo 2 son ineficientes energéticamente.

En los apartados siguientes serán descritos los modos de regulación que han sido objeto de análisis para el desarrollo de esta metodología y la generación de alternativas viables. Los casos que se presentan para la descripción de cada uno de los modos de regulación estudiados consideran de forma genérica 3 bombas, aunque el funcionamiento de todos los modos de regulación puede ser con cualquier número de bombas igual o superior a 2. A excepción del primer modo de regulación que será el único apto para trabajar con una sola bomba en funcionamiento.

3.5.2.1 Sin regulación

Este modo de regulación corresponde al uso de un grupo de bombas de velocidad fija (BVF) que funcionan todas a la vez independiente del caudal que se esté demandando hora a hora. Por lo cual sin importar cual sea el caudal demandado, la EB siempre enviará el mismo caudal, que corresponderá al caudal máximo del abastecimiento.

3.5.2.2 Regulación con BVF

Este modo de regulación se establece usando solo BVF, es decir que no involucra variación en la frecuencia de las bombas, solo el encendido y apagado de las bombas dependiendo de la demanda. En este modo de regulación se han planteado dos modos de control, con lo cual se han generado dos modos de regulación partiendo de este:

- Regulación manométrica con BVF.
- Regulación caudalimétrica con BVF.

3.5.2.3 Regulación manométrica con BVF

Las ordenes de puesta en marcha o parada de las bombas están relacionadas con los valores de presión medidos a la salida del equipo de bombeo (Figura 18). La regulación manométrica se hace a través de un presostato, que envía la señal de la presión existente en la red a un sistema que da la orden de arrancar o parar cada una de las bombas de la instalación.

La filosofía del cálculo de las consignas de arranque y paro de las bombas para este modo de regulación han sido explicadas en el apartado 2.2.6.1 con base en la Figura 9. No obstante, a efectos de esta metodología se ha efectuado una variación en el cálculo de las consignas de arranque de las bombas.

Para el caso presentado en la Figura 18, el punto arranque de las bombas se produce en el punto H_{AN} (donde se encuentra la intersección de la curva motriz de dos bombas en paralelo con la curva de consigna), mientras que en el caso de la Figura 9 el arranque se produce en una altura PA_3 , que viene siendo la intersección de la curva motriz asociada a las tres bombas en paralelo con la curva consigna.

El cálculo de las consignas de arranque de cada una de las bombas empieza por la determinación del arranque de la n -ésima bomba. Para ello se localiza la intersección de la curva motriz asociada a $n-1$ bombas con la curva consigna (H_{AN}) que corresponde al punto de arranque de la última bomba. Luego, fijando un $\Delta H = 5$ se obtiene H_{A2} , haciendo $H_{AN} - \Delta H$. El punto de intersección entre H_{A2} y la curva motriz asociada a una bomba en funcionamiento indica el punto de arranque de la segunda bomba. Sabiendo que la primera bomba siempre estará en marcha.

Para las consignas de parada se fija el punto de paro de la n -ésima bomba (H_{PN}), el cual se define con el caudal con el que se cruza H_{AN} en la $n-1$ bomba y con la altura de las n bombas en funcionamiento. Para definir H_{P2} se hace $H_{PN} - \Delta H$ y con el caudal con el que cruza esta altura calculada se establece una nueva altura en el cruce de este caudal con la curva motriz de la $n-1$ bomba.

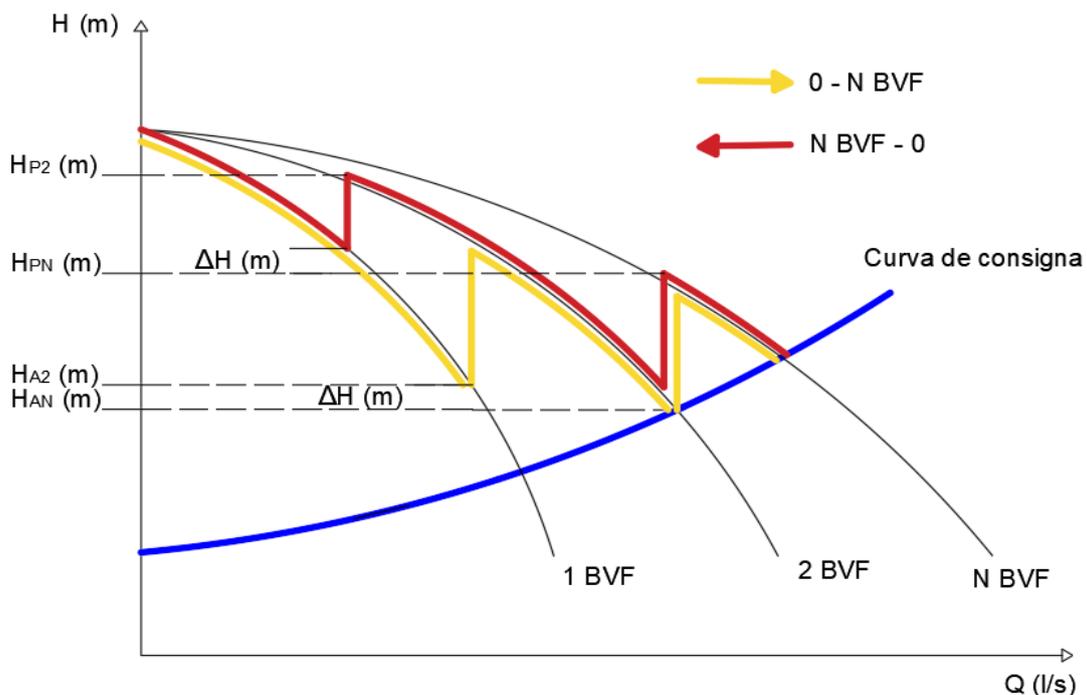


Figura 18. Regulación manométrica con BVF. Fuente: (Arango Gil, 2018)

Al separar las consignas de arranque y paro con ΔH genera la necesidad de un rango de variación importante de las presiones, por lo tanto, dependiendo del valor de la altura a caudal cero (H_0) de la bomba, algunos números de bombas pueden generar la imposibilidad de obtener las consignas de arranque y parada entre el valor mínimo (H_{AN}) y el Valor Máximo (H_0).

3.5.2.4 Regulación caudalimétrica con BVF

El control para la regulación caudalimétrica se establece con base en la medida de caudal. De acuerdo con el caudal demandado en la red, se envía la señal de arranque o paro de las bombas en funcionamiento a través de un PLC que tiene identificados los valores de consigna para la puesta en marcha o el paro de cada una de las bombas en la instalación. En la Figura 19 se muestra el esquema de regulación caudalimétrica con BVF para tres bombas funcionando en paralelo.

Según la Figura 19, cuando la red demanda un caudal menor o igual a Q_1 se encuentra una bomba en funcionamiento. Al sobrepasar el Q_1 , se inicia el arranque de la bomba dos, evitando que la presión decaiga por debajo de H_1 y se encuentran dos BVF trabajando en paralelo. A medida que se va incrementando la demanda, la presión va disminuyendo, por lo que al llegar a Q_2 se enciende la n -ésima bomba hasta que se llegue a Q_{Max} .

Cuando se alcanza la $H(Q_{Max})$, la demanda empieza a decaer por lo cual la n -ésima bomba se detendrá cuando el caudal se encuentre cerca de Q_2 . De igual forma se detendrá la bomba siguiente, cuando la demanda se reduzca al punto de alcanzar Q_1 se parará la $n-1$ bomba.

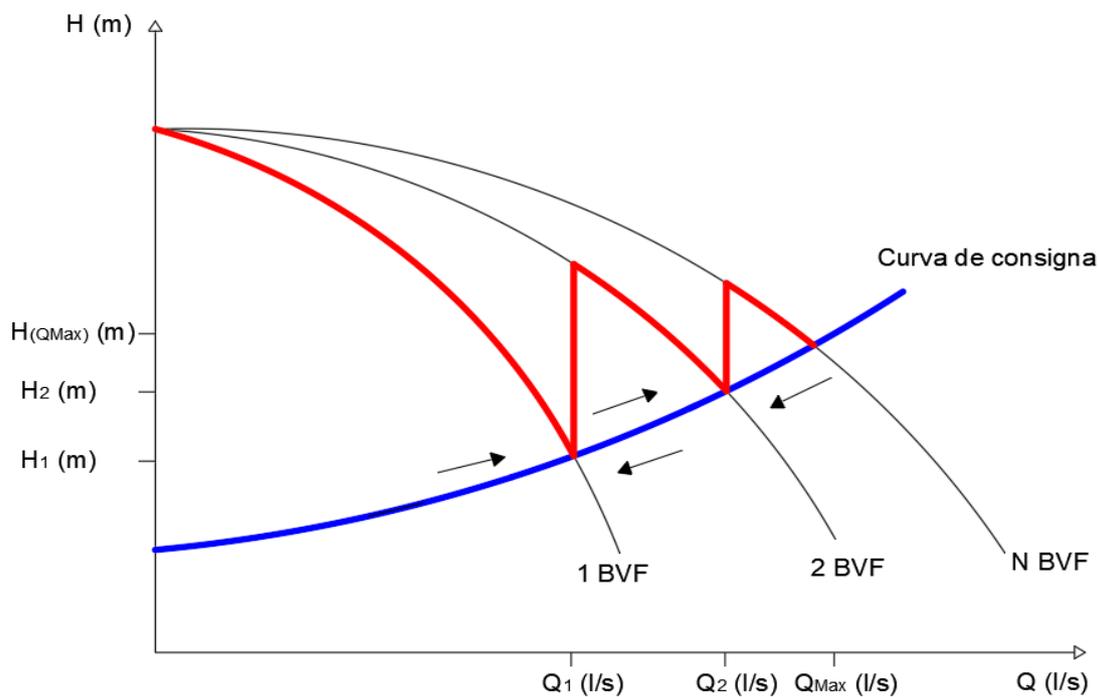


Figura 19. Regulación caudalimétrica con BVF. Fuente (Arango Gil, 2018)

3.5.2.5 Regulación con BVV

En este método de regulación es necesaria la incorporación de variadores de frecuencia que permitan modificar la velocidad de giro de la bomba, alterando la curva motriz y otorgando caudales menores a los nominales de la bomba con alturas menores también. Al igual que la regulación con BVF, la regulación con BVV puede ser llevada a cabo mediante dos modos de control, con lo cual se han generado dos modos de regulación a valorar. En los siguientes apartados se describe con detalle el modo de funcionamiento de cada uno de estos modos de regulación.

- Regulación manométrica con BVV
- Regulación caudalimétrica con BVV

3.5.2.6 Regulación manométrica con BVV

El control para este tipo de regulación se hace a través de transductores de presión, que a través de la medida de presión de la red envía la señal para el arranque, paro o variación de la frecuencia de las bombas en la EB según cual sea el caso. En la regulación manométrica con BVV se busca garantizar una presión de consigna fija que se establece para la red de abastecimiento (Figura 20) y en todo caso, la dinámica de la regulación deberá permitir conseguir la presión fijada. La intención con la regulación manométrica con BVV es que independientemente del caudal demandado en la red, se mantenga constante la presión de consigna.

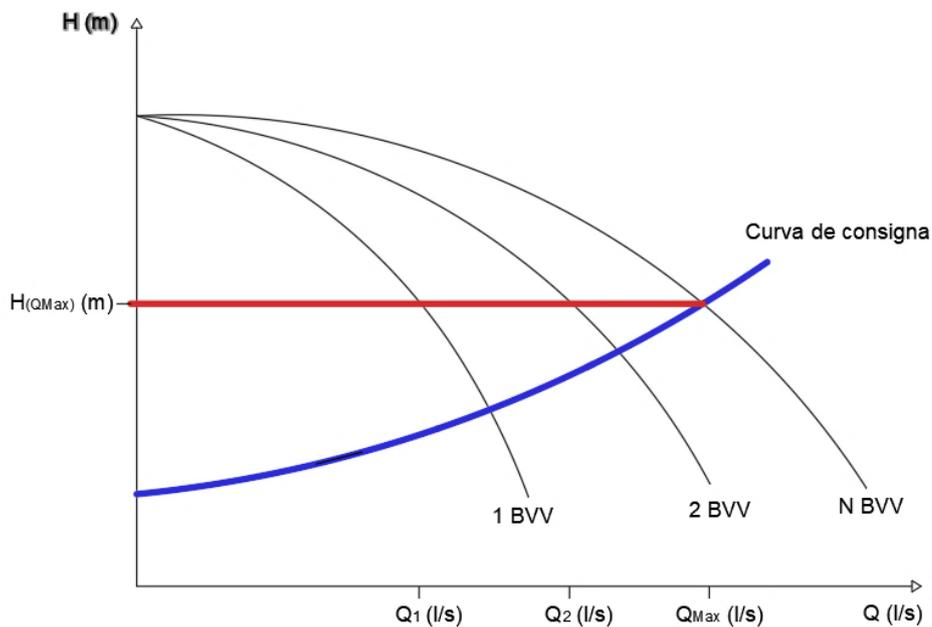


Figura 20. Funcionamiento de bombas de velocidad variable. Fuente: (Arango Gil, 2018)

El valor de la presión de referencia ($H_{Q_{\max}}$) viene dada por el Q_{\max} , corresponde al punto donde se cruzan la curva de consigna y la curva motriz equivalente de las bombas en la instalación. Esta presión de referencia se cruza con la curva equivalente correspondiente al funcionamiento de 1, 2, ... n bombas. Los puntos donde se cruza la $H_{Q_{\max}}$ con las curvas motrices establecen los caudales Q_1 y Q_2 .

Para caudales menores a Q_1 , la BVV en funcionamiento recibirá la orden de reducir la velocidad de giro para mantener la presión de consigna. Al sobrepasar Q_1 , la presión decae y por tanto se inicia el encendido de la siguiente bomba. En este punto, ambas bombas trabajan a la misma velocidad de giro, hasta que se alcance Q_2 y las BVV en funcionamiento lleguen a su velocidad nominal. Pasando el Q_2 la presión decae y por ende se inicia el arranque de la n-esima BVV, pero se llevan todas las bombas de la instalación a funcionar con la misma velocidad de giro, hasta que se llega a la demanda de Q_{Max} , donde todas las bombas de la instalación funcionan a velocidad nominal.

Cuando la demanda decrece y se encuentra entre Q_2 y Q_{Max} , la altura de bombeo se incrementa y por lo tanto para mantener la presión de consigna, las velocidades de giro de las bombas en la instalación se reducen por debajo de la nominal, hasta que se llega a Q_2 cuando la n-ésima bomba se apaga. De la misma forma sucede entre Q_1 y Q_2 .

3.5.2.7 Regulación caudalimétrica con BVV

Al igual que la regulación caudalimétrica con BVF, la medida se basa en el caudal demandado y requiere de un caudalímetro para que envíe la señal a un PLC. Además, se requiere de un transductor para garantizar la presión mínima en la red. En este caso, dependiendo del caudal que este requiriendo la red, el sistema podrá arrancar una bomba, pararla o variar la velocidad de giro. Este tipo de regulación permite seguir exactamente la curva consigna, tal como se observa en la Figura 21.

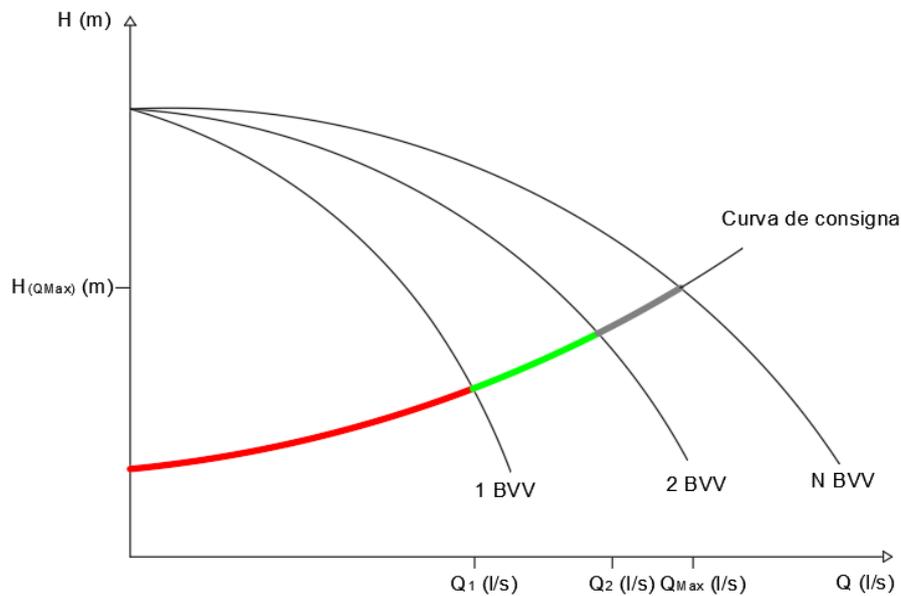


Figura 21. Regulación de BVV con caudal. Fuente: (Arango Gil, 2018)

Para este caso sobre la franja roja (caudales menores a Q_1) se encuentra trabajando una BVV con velocidad de giro menor a la velocidad nominal, con la cual se va garantizando la altura correspondiente a la requerida en la curva de consigna. Una vez la demanda supera Q_1 , se enciende la siguiente bomba y se reducen las velocidades de giro de tal forma que las dos bombas en funcionamiento trabajan a la misma velocidad de giro. A medida que la demanda se va incrementando, la velocidad de giro de las bombas se incrementa hasta que en Q_2 las dos bombas en funcionamiento

alcanzan su velocidad nominal. Al superar Q_2 se enciende la n -ésima bomba y se varían las velocidades de giro de todas las bombas en la instalación, tal que se supla el caudal demandado con todas las BVV con igual velocidad de giro, así hasta que se llegue a Q_{Max} donde todas las BVV alcanzan la velocidad nominal de giro.

El paro de las bombas ocurre en la medida en que va disminuyendo la demanda. Cuando la demanda se encuentra entre Q_2 y Q_{Max} las n bombas se encuentran en funcionamiento con velocidades de giro menores a la nominal. Al llegar a Q_2 la n -ésima bomba se apaga y quedan funcionando las dos bombas en la instalación con velocidad nominal. De la misma forma sucede cuando el caudal demandado por la red se encuentra entre Q_1 y Q_2 , y la demanda se va reduciendo hasta llegar a Q_1 , cuando se apaga la 2 bomba y queda solo una BVV funcionando y abasteciendo las demandas a bajos caudales.

3.5.2.8 Regulación con combinación de BVF + BVV

La combinación de bombas de velocidad fija y variable hace que para este tipo de regulación haya un parámetro adicional que es el número de BVF y el número de BVV. Con este parámetro adicional el número de alternativas será superior al número de alternativas generadas con los anteriores modos de regulación, teniendo en cuenta la variación de n BVV y m BVF.

3.5.2.9 Regulación manométrica con BVF + BVV

La regulación manométrica con este tipo de control es similar al modo de regulación manométrica con BVV. En este modo de regulación se establece una presión consigna y se mantiene la misma presión $H(Q_{max})$, independiente del caudal demandado en la red (Figura 22). La diferencia con la estrategia de regulación con solo BVV corresponde en que las BVF garantizan los grandes caudales, mientras que las BVV son usadas principalmente para abastecer caudales bajos. En este modo de regulación una de las BVV siempre permanecerá encendida.

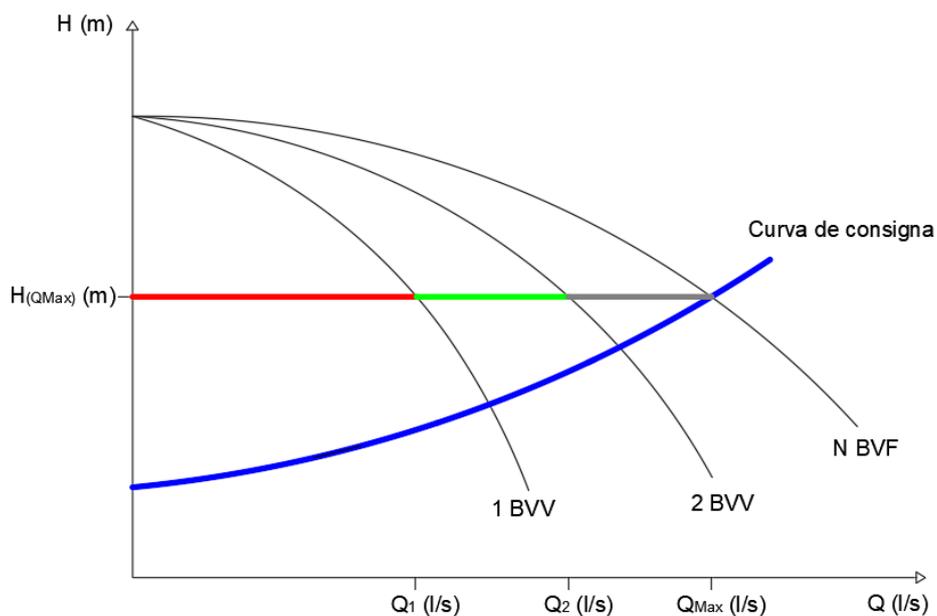


Figura 22. Modo de regulación manométrica con BVF + BVV. Fuente: (Arango Gil, 2018)

A efectos del presente ejemplo, el número de BVV es 2 y el número de BVF es 1. La altura de consigna ($H_{(Q_{Max})}$) se fija, al igual que en la regulación con solo BVV, en la intersección entre la curva motriz equivalente a n bombas y la curva consigna con la demanda de Q_{Max} .

Para mantener la presión de consigna, si el caudal se encuentra por debajo de Q_1 , es decir en la zona roja, se encontrará trabajando una BVV con una velocidad de giro menor a la nominal, hasta que se alcanza el valor de Q_1 . Una vez se sobrepasa el valor de Q_1 se enciende la segunda BVV y las dos BVV trabajan a la misma velocidad de giro, menor a la nominal garantizando la presión de consigna. Cuando se alcanza Q_2 , las dos BVV alcanzan la velocidad nominal, es en este punto que se enciende la BVF. La BVF otorgará el caudal correspondiente a Q_1 y las BVV variaran la velocidad de giro garantizando los caudales entre Q_2 y Q_{Max} , hasta que las tres bombas en la instalación otorguen Q_{Max} con velocidad de giro nominal.

La consigna de paro de las bombas ocurrirá cuando la demanda empiece a decrecer por debajo de Q_{Max} , con lo cual las BVV trabajaran a una velocidad menor a la nominal y la BVF seguirá dando el caudal correspondiente a Q_1 , hasta el punto donde se alcance Q_2 . Es en este punto cuando la BVF se apaga y quedan funcionando las dos BVV, que estarán otorgando los caudales demandados entre Q_1 y Q_2 trabajando a la misma velocidad de giro por debajo de la nominal. Cuando se llega a Q_1 se apaga la segunda BVV y queda solo una BVV en funcionamiento que garantizará los caudales menores a Q_1 .

Si en vez de dos BVV, en este caso hubiese dos BVF y una BVV la regulación sería diferente. Para ese caso, la BVV trabajará en la franja roja, variando la velocidad de giro hasta alcanzar Q_1 , momento en el cual alcanza la velocidad nominal. Una vez el caudal demandado se encuentre entre Q_1 y Q_2 se enciende la primera BVF que otorgaría el Q_1 y la BVV en la instalación trabajaría a una velocidad de giro menor a la nominal garantizando los caudales en esta zona. Cuando la demanda de caudal llega a Q_2 y la BVV se encuentra trabajando a velocidad nominal, se enciende la segunda BVF, con lo cual entre las dos BVF estarían otorgando Q_2 . Cuando Q_2 se supera, la BVV otorga los caudales necesarios entre Q_2 y Q_{Max} variando la velocidad de giro por debajo de la nominal hasta que en Q_{Max} se alcance la velocidad nominal de las tres bombas en la instalación. En sentido inverso van ocurriendo los paros de las bombas.

3.5.2.10 Regulación caudalimétrica con BVF + BVV

Al igual que en el modo de regulación manométrica con combinación de n BVV y m BVF, el número de soluciones se incrementa. En este caso la regulación se efectúa a través de la medición del caudal que demanda la red, similar al modo de regulación caudalimétrica con BVV (Figura 23). La diferencia radica principalmente en la conexión de BVF cuando se supera cierto caudal, además del cambio de velocidad de giro de las BVV que implica la entrada en funcionamiento de la BVF.

Al igual que en la regulación manométrica, en este caso se cuenta con 2 BVV y una BVF, el funcionamiento es similar, la diferencia radica en que se garantizan las presiones de la curva de consigna y no sobre una presión de referencia fijada. Para caudales menores a Q_1 se encuentra una BVV trabajando a velocidad de giro por debajo de la nominal hasta que en Q_1 esta bomba alcanza la velocidad nominal. Una vez se supera Q_1 se enciende la segunda BVV y trabaja a la misma velocidad de giro que la BVV que ya se encontraba encendida, otorgando ambas los caudales entre Q_1 y Q_2 . Cuando se llega a Q_2 las dos BVV se encuentran trabajando a velocidad nominal y se enciende la BVF que otorga

el caudal Q_1 , haciendo que las BVV varíen su velocidad de giro tal que garanticen los caudales entre Q_2 y Q_{Max} . El caudal sigue incrementándose hasta llegar a Q_{Max} donde todas las bombas trabajan a velocidad nominal.

El mismo esquema se sigue en el proceso de paro de las bombas, cuando la demanda se reduce hasta llegar a Q_2 . En Q_2 se para la BVF y quedan en funcionamiento las BVV, garantizando los caudales entre Q_1 y Q_2 , variando la velocidad de giro.

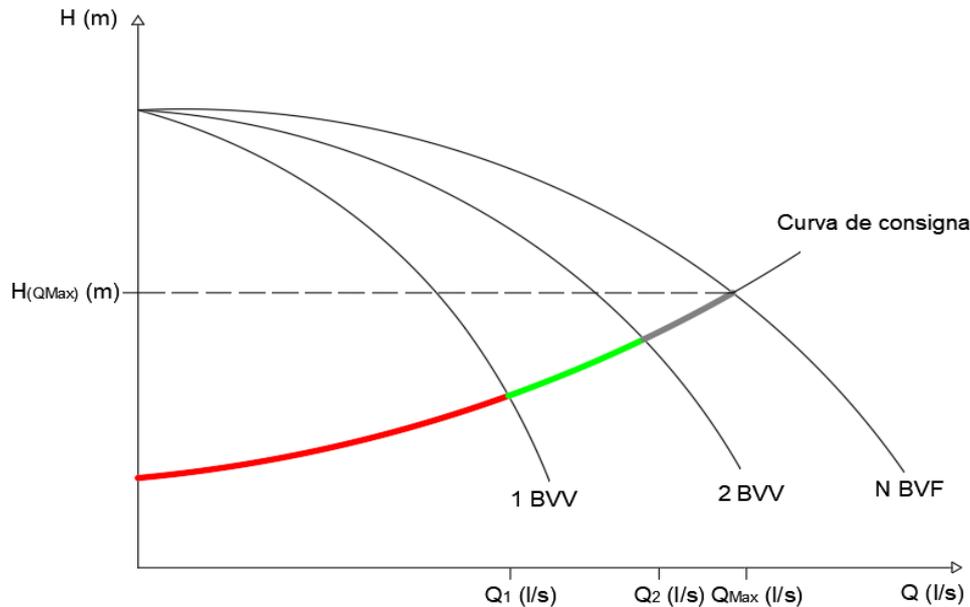


Figura 23. Regulación caudalimétrica con BVF + BVV. Fuente: (Arango Gil, 2018)

3.6 Valoración de criterios

Los criterios planteados para la MP1 son 5 mostrados en la Tabla 3, mientras que los criterios planteados para la MP2 son 9 agrupados en 3 criterios de primer nivel o factores, presentados en la Tabla 4. Los criterios pueden ser de tipo cuantitativo y cualitativo, tal como se describirán en los apartados siguientes y el AHP permite evaluar ambos tipos de variables y combinarlas para obtener un solo vector propio que determine la prioridad de los criterios. A continuación, se establece el razonamiento efectuado para cada uno de los criterios planteados.

Entre MP1 y MP2 existen criterios en común que han sido valorados de la misma forma, a diferencia del criterio del número de bombas que para MP1 fue valorado de una forma y para MP2 de otra. En los apartados siguientes se describirán cada uno de los criterios, detallándose la forma de valoración con respecto a cada metodología.

3.6.1 Criterios valorados para MP1

3.6.1.1 Número de bombas

El número de bombas es un criterio que por lo general se define de una forma arbitraria, pues es el primer criterio que se establece en un método tradicional de diseño de EB. A partir del número de bombas que se desee tener en la EB se obtiene el modelo que garantice el cumplimiento del caudal máximo con el número de bombas determinado. Para la valoración del criterio en la metodología planteada se evalúan diferentes modelos de bomba con diferentes números de bomba que garanticen el caudal a demandar.

Este criterio corresponde a una variable cuantitativa, por lo cual su valoración será numérica y con respecto a una normalización entre las alternativas. Para MP1 se valora positivamente un menor número de bombas, pues se busca la simplicidad del sistema.

3.6.1.2 Complejidad del sistema de regulación

Los modos de regulación descritos en apartado 3.5.2 son los que han sido valorados para la metodología que se propone. Estos modos de regulación valorados han sido los mismos para MP1 y para MP2. Como lo que se pretende evaluar es la complejidad del sistema de regulación, se ha establecido un nivel de complejidad para cada modelo de regulación que va a depender de los equipos de regulación que se requieran (Tabla 6). De acuerdo con lo anterior, la complejidad del sistema de regulación ha sido valorada como una variable cualitativa.

Tabla 6. Equipos requeridos para cada uno de los modos de regulación

| Código | Modo de regulación | Variador frecuencia | Presostato | Transductor presión | Caudalímetro | PLC | No. Elementos de regulación |
|--------|---|---------------------|------------|---------------------|--------------|-----|-----------------------------|
| 1 | Sin regulación | | | | | | 0 |
| 2.1 | Regulación manométrica con BVF | | X | | | | 1 |
| 2.2 | Regulación caudalímetro a con BVF | | | | X | X | 2 |
| 3.1 | Regulación manométrica con BVV | X | | X | | X | 3 |
| 3.2 | Regulación caudalimétrica con BVV | X | | X | X | X | 4 |
| 4.1 | Regulación manométrica con BVF + BVV | X | | X | | X | 3 |
| 4.2 | Regulación caudalímetro a con BVF + BVV | X | | X | X | X | 4 |

En la Tabla 6 se presentan cada uno de los modos de regulación explicados en el apartado 3.5.2 y se les ha asignado un código con el cual serán identificados durante el documento en adelante. En esta tabla se han mostrado los equipos que cada modo de regulación requiere para que sea efectuado y la columna final establece el número de equipos que deben ser instalados en cada modo de regulación. De acuerdo con esto, a mayor número de equipos requeridos para efectuar la regulación el sistema de regulación será más complejo.

Con la valoración cualitativa del modo de regulación se busca establecer la simplicidad del modo de regulación, por lo cual, a efectos de los modos de regulación valorados, el modo 1 es el que presenta una complejidad menor y será el mejor valorado. Los modos de regulación 3.2 y 4.2 son los que requieren un mayor número de equipos, por lo cual serán los modos de regulación más complejos.

3.6.1.3 Coste de inversión

El coste de inversión es un criterio que depende de los elementos a instalar en la EB, que correspondan a la infraestructura y a la regulación. Los costes de infraestructura se basan en el suministro e instalación de bombas, tuberías y accesorios de la EB que se obtienen a partir del esquema básico (Figura 16), mientras que los costes de regulación corresponden al suministro e instalación de los elementos requeridos para cada modo de regulación. El coste de inversión viene siendo una variable cuantitativa y se evalúa positivamente cuanto menor sea el valor de la inversión.

De acuerdo con el esquema básico de la EB (Figura 16), los elementos que componen la infraestructura son los mostrados en la Tabla 7 donde además se muestran las expresiones para el cálculo de las cantidades de cada uno de estos. En esta tabla cuando se indica $n+1$ es cuando se contabiliza la bomba de reserva que no se encuentra consignada en la n bombas de la instalación. Cuando se contabilizan los elementos de la infraestructura, no son relevantes los n BVV y m BVF.

Tabla 7. Expresiones para el cálculo de cantidades de elementos de la infraestructura de la EB

| Elemento | Calculo cantidades |
|-------------------------|--|
| Bombas | n |
| Tubería (m) | $N1 \cdot n + N2 \cdot (n + 1) + N3 \cdot 2$ |
| Tees | $2 \cdot ((n + 1) - 2) + 2$ |
| Codos | 2 |
| Válvulas seccionamiento | $2(n + 1) + 2$ |
| Válvulas Retención | $n + 1$ |

Los elementos que varían dependiendo del modo de regulación son los presentados en la Tabla 8. Para este caso cobra relevancia establecer n BVV y m BVF, y N_b el número total de bombas, pues dependiendo del modo de regulación, asimismo serán contabilizados los elementos requeridos.

Tabla 8. Elementos de regulación para establecer los costes de inversión

| Modo de regulación | No. Bombas | No. Variadores | No. Presostatos | No. Transductores presión | No. Caudalímetro | No. PLC |
|--------------------|---------------|----------------|-----------------|---------------------------|------------------|---------|
| 1. BVF | m | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.1 BVF + P | m | 0 | $m - 1$ | 0 | 0 | 0 |
| 2.2 BVF + Q | m | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 3.1 BVV + P | n | n | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3.2 BVV + Q* | n | n | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 4.1 BVF + BVV + P | $N_b = n + m$ | n | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 4.2 BVF + BVV + Q* | $N_b = n + m$ | n | 0 | 1 | 1 | 1 |

La forma de obtención de los costes de inversión de cada uno de los elementos de la EB se hizo de forma diferente para un grupo de elementos que para otro. El coste de suministro de los siguientes elementos fue obtenido a partir de bases de datos o listados de precios de fabricantes.

- Coste de suministro de bombas obtenido de la base de datos manejada por Arango (2018)
- Coste de suministro de presostatos obtenido de la base de datos de Ingenieros C.Y.P.E. (2017)
- Coste de suministro de transductores de presión obtenidos del listado de precios de OMEGA (2020)
- Coste de suministro de PLC han sido obtenidos del listado de precios de Farnell (2020)

Los otros elementos que se listan a continuación se les elaboró una función de coste que consiste en un modelo de regresión entre el coste (obtenido a partir de una base de datos o un listado de precios de fabricante) y una variable, distinta para cada elemento, con la cual varía el comportamiento de los precios. Al establecerse una regresión, es necesaria que el parámetro R^2 se encuentre cercano a 1. Cada una de las funciones de coste serán descritas con mayor detalle en los apartados siguientes.

- Variadores de frecuencia
- Caudalímetro
- Válvulas de seccionamiento y retención
- Tubería en fundición dúctil
- Tee y codos en fundición dúctil

Adicionalmente a los costes de suministro se le añadieron los costes de instalación de cada uno de los elementos a valorar. El cálculo de los costes de instalación ha sido desarrollado con análisis de precios unitarios que han sido consultados en la base de datos de Ingenieros C.Y.P.E. (2017).

3.6.1.3.1 Variadores de frecuencia

Los costes de los variadores de frecuencia dependen de la potencia que la bomba posea. Los costes fueron obtenidos de la base de datos de Siemens (2019). La función de coste para los variadores de frecuencia se encuentra representada en la ecuación 23.

$$F(\text{€}) = 168.19 + 116.08 P - 0.6033P^2 \quad (23)$$

Donde P representa la potencia. Esta función de coste ya tiene incluido el coste de instalación de los variadores de frecuencia. La proyección de coste se ajusta muy bien a los datos del fabricante (Figura 24).

Esta función de coste tiene un comportamiento polinómico y creciente, lo que indica que, a mayor potencia requerida por la bomba, más robusto tendrá que ser el equipo y, por ende, será más COSTEso. La función de coste ha tenido un índice de regresión R^2 de 0.99, que demuestra que el ajuste del modelo es correcto a los datos manejados por el fabricante.

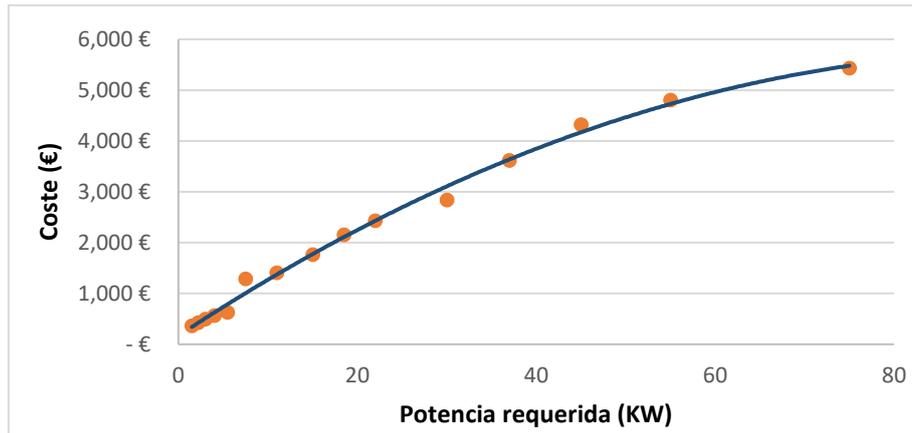


Figura 24. función de coste para variador de frecuencia

3.6.1.3.2 Caudalímetro

Para el caudalímetro se han planteado dos opciones tecnológicas que quien diseña podrá seleccionar entre ellas. El caudalímetro electromagnético y contador Woltman. La tecnología con la que trabajan estos equipos es aceptada para diámetros de tuberías entre DN 50mm y DN 300mm. De acuerdo con esto, se han establecido dos funciones de coste con base en los listados de precio de CONTHIDRA (2019). La ecuación 24 representa la función de coste para el caudalímetro electromagnético mientras que la ecuación 25 representa la función de coste para el contador Woltman.

$$F(€) = 3340.90 - 5.106 DN + 0.0466 DN^2 \quad (24)$$

$$F(€) = 885.71 - 9.22DN + 0.0615 DN^2 \quad (25)$$

Para estos elementos el modelo de regresión lineal fue también polinomio creciente. Para el caudalímetro electromagnético se obtuvo un coeficiente R^2 de 0.986 y para el contador Woltman el coeficiente de regresión fue de 0.988. En las Figuras 25 y 26 se encuentra la representación del modelo de regresión para el caudalímetro electromagnético y el contador Woltman respectivamente.

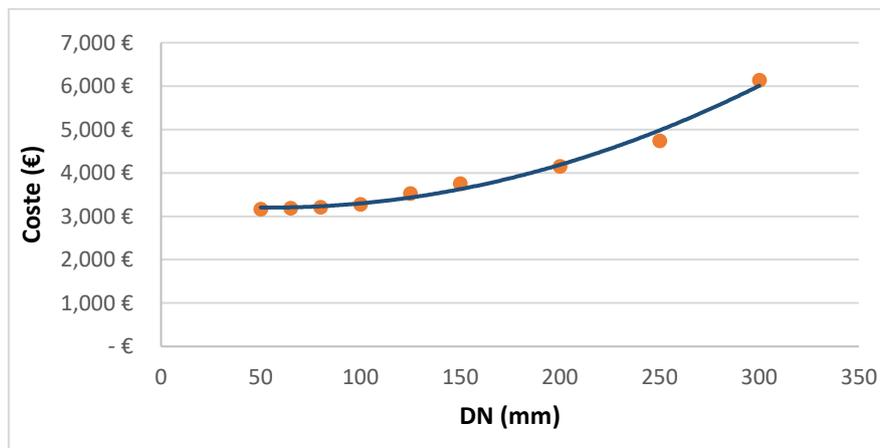


Figura 25. Función de coste para caudalímetro electromagnético

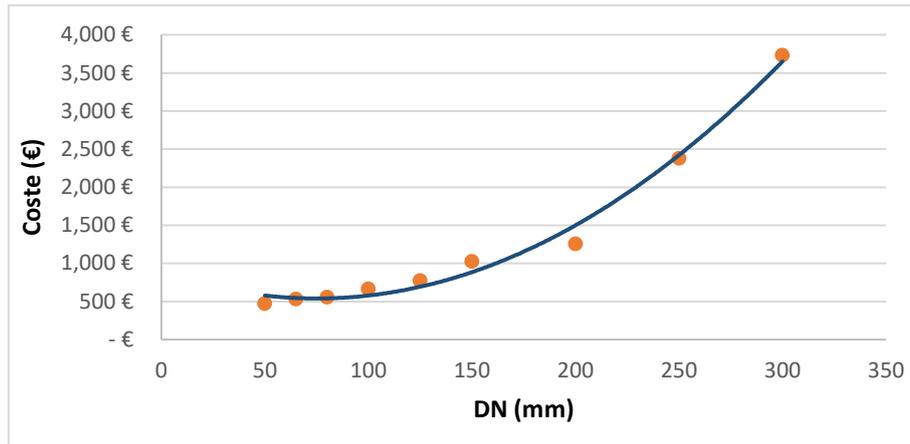


Figura 26. Función de coste para contador Woltman

3.6.1.3.3 Válvulas

Las funciones de coste para las válvulas varían en función del diámetro, tanto para las válvulas de seccionamiento como las válvulas de retención, el diámetro considerado será el mismo que para las tuberías. Las funciones se establecieron con base en listados de precios de Salvador Escoda S.A., (2019). La función de coste para la válvula de seccionamiento se presenta en la ecuación 26 y la función de coste para la válvula de retención se presenta en la ecuación 27.

$$F(€) = 63.629 + 0.7947DN + 0.013DN^2 \quad (26)$$

$$F(€) = 35.63 - 0.1418DN + 0.0079DN^2 \quad (27)$$

Las funciones de coste para las válvulas son polinómicas y crecientes en función del diámetro de la válvula. Para las válvulas de seccionamiento el coeficiente de regresión lineal obtenido fue 0.998 y para las válvulas de retención el coeficiente lineal obtenido fue 0.999. De acuerdo con esto, el modelo de regresión se ajusta al comportamiento de los precios de las válvulas. En las Figuras 27 y 28 se presentan los modelos de función de coste para la válvula de seccionamiento y para la válvula de retención respectivamente.

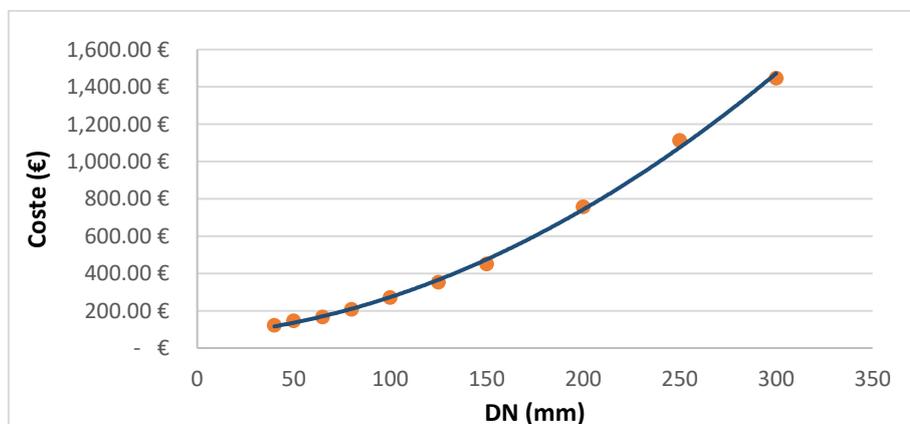


Figura 27. Función de coste para válvula de seccionamiento

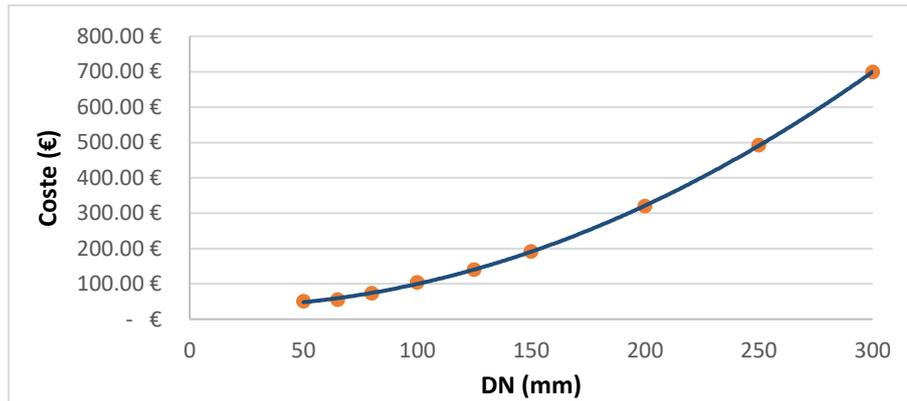


Figura 28. Función de coste para válvula de retención

3.6.1.3.4 Tubería y accesorios

Las funciones de coste para estos elementos vienen dadas por el diámetro de la tubería que se establezca, los precios para la elaboración de las funciones de coste han sido obtenidos de Ingenieros C.Y.P.E. (2017). Las funciones de coste tanto de las tuberías de fundición dúctil como los accesorios como Tee y codos vienen dadas por el diámetro nominal. La función de coste de los codos viene dada por la ecuación 28, la función de coste de las tees viene dada por la ecuación 29 y la función de coste de la tubería de fundición dúctil viene dada por la ecuación 30.

$$F(\text{€}) = 29.166e^{0.0103 \cdot DN} \quad (28)$$

$$F(\text{€}) = 42.598e^{0.0095 \cdot DN} \quad (29)$$

$$F(\text{€}) = 10.128 + 0.203DN + 0.0005DN^2 \quad (30)$$

Las funciones de coste de los accesorios de fundición dúctil tienen una forma exponencial, tal como se aprecia en las Figuras 29 y 30 para los codos y las tees respectivamente. Los coeficientes de regresión son 0.98 y 0.97 para codo y tees respectivamente. Por otro lado, la función de coste de la tubería de fundición dúctil tiene un comportamiento polinómico representado en la Figura 31, el coeficiente de regresión para esta función es 0.99.

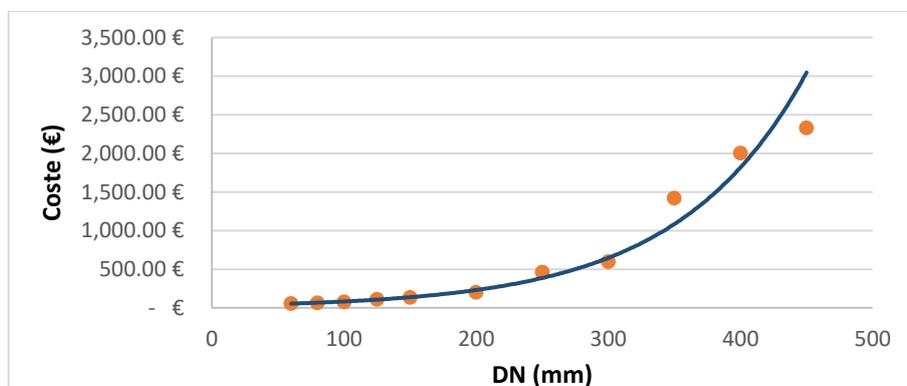


Figura 29. Función de coste para codo bridado en Fundición Dúctil

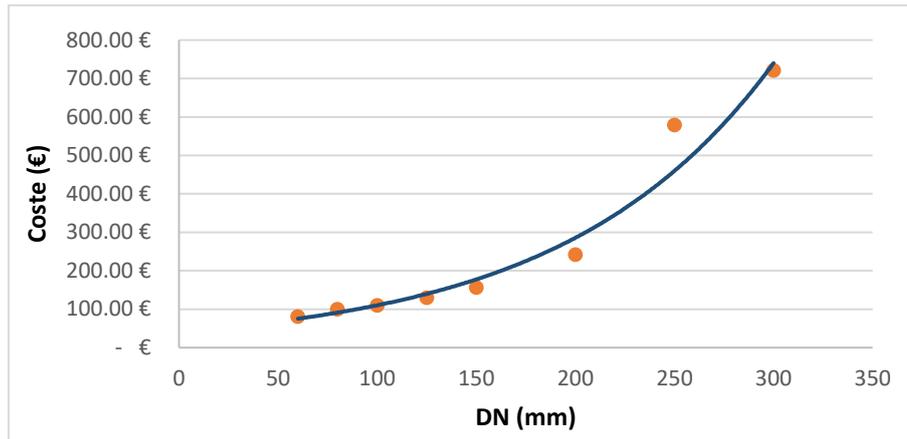


Figura 30. Función de coste para tees de fundición dúctil

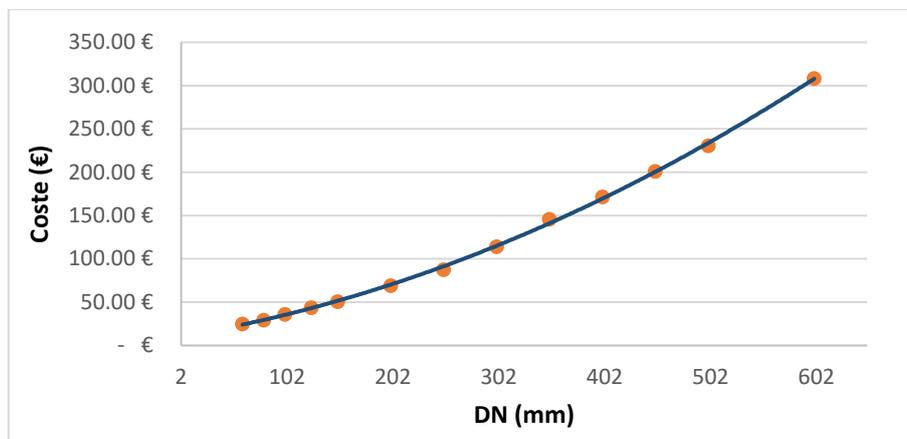


Figura 31. Función de coste para tubería en fundición dúctil

3.6.1.4 Costes de operación

Los costes de operación equivalen a los costes asociados a la energía consumida. El coste de operación es por tanto una variable cuantitativa y se valora positivamente cuando menos gasto de operación se incurra.

Para la determinación de la energía gastada en la instalación es necesario el cálculo de la potencia de la bomba para el caudal que se demanda en cada hora del día. La potencia útil de la bomba viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \gamma QH \tag{31}$$

donde, γ es el peso específico del fluido, Q: caudal horario, H: altura de bombeo y η : rendimiento del grupo de bombeo en funcionamiento. Para calcular la potencia absorbida por la bomba que sería la que finalmente se afecta por el coste de la energía eléctrica, se debe dividir la potencia entre el rendimiento, quedando la siguiente expresión:

$$P = \frac{\gamma QH}{\eta} \quad (32)$$

Cuando el modo de regulación involucra BVV, se debe modificar la ecuación de rendimiento (ecuación 2), para que este sea calculado de acuerdo con la velocidad de giro que se está usando. Quedando la siguiente expresión:

$$\eta = E \frac{Q}{\alpha n} - F \left(\frac{Q}{\alpha n} \right)^2 \quad (33)$$

Siendo n el número de bombas, E y F los coeficientes característicos y α el parámetro que determina la relación de la velocidad de la bomba con respecto a la nominal. Adicionalmente, cuando el modo de regulación incluye la combinación de BVV y BVF, la potencia que la instalación gasta corresponde a la siguiente una generalizada de la ecuación 32, que se presenta mediante la siguiente expresión:

$$P = P_{nBVV} + P_{mBVF} = \frac{\gamma Q_{nBVV}H}{\eta_{nBVV}} + \frac{\gamma Q_{mBVF}H}{\eta_{mBVF}} \quad (34)$$

donde, Q_{nBVV} y Q_{mBVF} corresponde al caudal que las bombas de velocidad variable y velocidad fija se encuentran suministrando hora a hora. Cabe resaltar que cuando las BVV se encuentran en funcionamiento, trabajan a la misma velocidad de giro, por lo cual su rendimiento será el mismo para todas las bombas que se encuentren funcionando hora a hora.

Una vez calculada la potencia de la bomba para cada caudal demandado hora a hora, se obtiene el precio de coste de operación horario acorde a las tarifas establecidas por la empresa prestadora de servicios de energía. Se aplica el factor de coste de energía eléctrica para cada franja del día y se calcula el coste correspondiente el día de invierno y el día de verano. Finalmente, el coste anual de operación se obtiene extrapolando el coste diario de invierno y verano al número de días al año que corresponden a cada estación climatológica.

3.6.1.5 Costes de mantenimiento

Con el mantenimiento de una estación de bombeo se pretende conseguir aumentar la disponibilidad de un equipo de forma rentable (González Fernandez, 2015). El mantenimiento de una EB se divide en 3 tipos: mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.

El mantenimiento preventivo corresponde a actividades programadas de mantenimiento de equipos que se desarrollan con una frecuencia determinada para garantizar la disponibilidad del equipo en un periodo de tiempo. El mantenimiento predictivo se limita a equipos de importancia alta en la instalación, como las bombas, pero depende de diferentes variables que se midan durante la operación de la instalación, si alguna variable se encuentra por fuera de un rango preestablecido, se efectúa el mantenimiento al equipo. El mantenimiento correctivo se realiza cuando un equipo o la instalación sufren un fallo, por lo cual se requiere que la instalación o el equipo salga de funcionamiento para el mantenimiento.

Los costes de mantenimiento predictivo dependerán de las mediciones a diferentes variables en la operación del sistema, y los costes de mantenimiento correctivo dependerán de los fallos que pueda tener el sistema. Para la etapa de diseño de una EB establecer estos costes se dificulta, por lo cual los costes de mantenimiento estimados en esta etapa corresponden únicamente al mantenimiento preventivo.

El coste del mantenimiento preventivo se calcula mediante un programa de mantenimiento, en el cual se establecen actividades a desarrollar en una frecuencia determinada para cada uno de los elementos que componen la EB. El manual de mantenimiento del BID (2011), establece una guía de actividades a desarrollar para el mantenimiento preventivo de una EB. En la Tabla 9 se establecen las actividades de mantenimiento tenidas en cuenta para esta metodología.

Tabla 9. Frecuencias y costes de mantenimiento de EB

| Mantenimiento de equipos regulación | | | |
|--|-------------------|-----------------------|--------------------|
| Actividad | Frecuencia | Valor Unitario | Valor Anual |
| Revisión de presostato | semestral | 3.03 € | 6.07 € |
| Revisión de PLC | anual | 37.34 € | 37.34 € |
| Revisión de transductor de presión | semestral | 9.75 € | 19.49 € |
| Revisión de variador de frecuencia | anual | 22.43 € | 22.43 € |
| Inspección de funcionamiento y calibración macromedidores y caudalímetros | anual | 58.26 € | 58.26 € |
| Mantenimiento de Infraestructura | | | |
| Actividad | Frecuencia | Valor Unitario | Valor Anual |
| Limpieza y evaluación de diafragma de válvulas | anual | 10.76 € | 10.76 € |
| Medición y análisis de vibraciones de válvulas | anual | 9.34 € | 9.34 € |
| Cambio de empaques rotos entre el acoplamiento de bridas, válvulas, medidores y válvulas de retención sostenedoras de presiones. | anual | 26.29 € | 26.29 € |
| Revisión de presaestopa | mensual | 1.48 € | 17.78 € |
| Lubricación de elementos mecánicos por unidad de bombeo | semestral | 3.82 € | 7.64 € |
| Medición y análisis de parámetros eléctricos y vibraciones mecánicas | semestral | 20.18 € | 40.36 € |
| Lubricación de rodamientos de motor eléctrico | semestral | 5.84 € | 11.68 € |
| Ajuste tornillería unidades de bombeo | semestral | 6.07 € | 12.14 € |
| Pruebas de aislamiento de motor eléctrico | anual | 9.43 € | 9.43 € |
| Prueba de resistencia al bobinado | anual | 9.43 € | 9.43 € |
| Mantenimiento de Tubería HD (ML) | semestral | 1.07 € | 2.14 € |
| Mantenimiento de Accesorios HD | semestral | 1.07 € | 2.14 € |

A efectos del presente trabajo, estas actividades se modificaron enfocándose solo en las que pudiesen variar de una alternativa a otra, en la (Tabla 9). Es decir, que dependieran del modo de regulación y/o

del número de bombas, e incluyendo el mantenimiento a los equipos de regulación. Las actividades que fuesen iguales para todas las soluciones no fueron tenidas en cuenta, debido a que no modifican la posible solución que al final se pueda llegar a obtener, pues corresponde a un coste que se añadiría a todas las soluciones de igual manera.

Los costes unitarios de cada una de las actividades fueron establecidos mediante análisis de precios unitarios con base en la base de datos de Ingenieros C.Y.P.E. (2017), y su valor anual afectado por la frecuencia de cada actividad. Al igual que los otros criterios económicos, los costes de mantenimiento serán valorados positivamente en cuanto menores sean.

3.6.2 Criterios valorados para MP2

En la MP2 el número de criterios a valorar se ha incrementado de 5 a 9 criterios. Este cambio se ha debido a la necesidad de incorporar criterios que permitieran definir una EB que garantice no solo los criterios técnicos y económicos ya definidos, sino criterios del componente ambiental. Adicionalmente, se modificó la forma de valoración del criterio de número de bombas y se incorporó el tamaño de la estación de bombeo como criterio técnico.

La MP2 no solo contempla un mayor número de criterios que la MP1, sino que además se ha tenido en cuenta la jerarquización de los criterios, estableciendo criterios de primer nivel y criterios de segundo nivel (Ver Tabla 4). Los criterios de primer nivel han agrupado subcriterios que comparten características similares, de tal forma que la agrupación tenga elementos cercanos y la valoración por parte de los expertos sea más sencilla. Los criterios de primer nivel serán descritos a continuación:

- Factores técnicos: permiten la valoración de criterios que establecen los detalles técnicos de funcionamiento de la EB. El cálculo de estos criterios obedece a los requerimientos del sistema de abastecimiento.
- Factores ambientales: han sido planteados con miras a otorgar a los diseños de las EB un componente ambiental. Esto permite incorporar al diseño la eficiencia energética lo que podría garantizar que la infraestructura cumpla con las metas ambientales planteadas en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)
- Factores económicos: agrupan los criterios que conducen a una valoración económica de las alternativas. Los criterios de segundo nivel de este grupo son los costes de inversión, costes de operación y costes de mantenimiento que han sido estimados de la misma forma que la MP1.

Los criterios de segundo nivel comprendidos en los factores económicos han sido valorados de la misma forma que en MP1 y lo mismo sucede con el criterio de complejidad del sistema de regulación, por lo cual en los apartados siguientes se contempla la valoración de los factores técnicos y ambientales que han sido definidos para MP2 o que su valoración difiere con el criterio compartido en MP1.

3.6.2.1 Flexibilidad

La flexibilidad es uno de los principales criterios definidos en MP2. Corresponde al grupo de factores técnicos y en el cual se valora el número de bombas, pero de forma inversa a como se valora en MP1. Pues para MP1 se valora positivamente la simplicidad de la EB mediante un menor número de bombas, para MP2 se valora positivamente un mayor número de bombas, pues el enfoque es la flexibilidad de la EB. Este es un criterio cuantitativo.

La modificación de la valoración del número de bombas entre MP1 y MP2 obedece a que la simplicidad se puede valorar implícitamente a través de los costes de inversión, mientras que la flexibilidad no necesariamente es reflejada en estos costes de inversión, pues dependerá del coste unitario del modelo de bomba a valorar y por ello debe considerarse como un criterio alternativo.

La flexibilidad ofrece a una EB la garantía de intercambiar los equipos de bombeo en su operación, evitando así el desgaste acelerado de estos y la posibilidad de hacer uso de otros equipos de bombeo en el momento en que se presente un fallo. Asimismo, la flexibilidad permite que a mayor número de bombas más fácilmente se puede ajustar el funcionamiento de la EB a la demanda de la red.

Al igual que, en la MP1, existe una bomba de reserva que garantiza la fiabilidad del sistema como premisa del diseño. Esta bomba no se contabiliza dentro del número de bombas para garantizar la flexibilidad.

3.6.2.2 Tamaño de la estación de bombeo

El tamaño corresponde al área calculada teniendo en cuenta el diseño básico de la EB (Figura 16), acorde al número de bombas de cada solución. Corresponde a un criterio cuantitativo.

El tamaño de la EB puede llegado el momento ser un parámetro decisivo. Cuanto menor sea el área requerida por la EB más fácilmente podrá implementarse la solución. De forma general se considerará que a menor tamaño de la EB mejor será el diseño. No obstante, si en determinadas circunstancias existiesen restricciones reales de espacio este criterio sería al mismo tiempo que un valor una restricción. Por ejemplo, si se dispone de un tamaño máximo de EB de 1000 m², todas las soluciones que excediesen ese valor deberían ser eliminadas. Posteriormente, podría clasificarse las soluciones por tamaño, pero quedarían descartadas aquellas que no verificasen dicha restricción.

3.6.2.3 Índice de eficiencia energética (MEI)

Se define como el índice de eficiencia mínima de escala adimensional para la eficiencia hidráulica de la bomba. Cuando esta se encuentra en el punto de máximo rendimiento (BEP), carga parcial (punto de funcionamiento de la bomba al 75% del caudal del BEP) o sobre carga (punto de funcionamiento al 110% del caudal de BEP). El cálculo se realiza acorde al procedimiento definido en el Reglamento UE 547/2012 de la Comisión Europea. En dicho reglamento se establece que el rendimiento de la bomba en BEP debe calcularse de acuerdo con la expresión:

$$\eta_{BEP} = -11.48x^2 - 0.85y^2 - 0.38xy + 88.59x + 13.46y - C \quad (35)$$

donde, η_{BEP} corresponde al rendimiento de la bomba funcionando en su punto óptimo $y = \ln(Q_{BEP})$ Q_{BEP} es el caudal que otorga la bomba en su punto máximo en m^3/s , $x = \ln(n_s)$, donde n_s es el número específico de revoluciones de la bomba y viene dado por la expresión:

$$n_s = n \frac{\sqrt{Q_{BEP}}}{(1/i H_{BEP})^{3/4}} [min^{-1}] \tag{36}$$

donde, H_{BEP} es la altura de bombeo en el punto óptimo de funcionamiento (m), n : corresponde al número específico de revoluciones de la bomba (rpm), Q_{BEP} : caudal bombeado en el punto óptimo especificado en m^3/s , i : etapas que corresponde al número de impulsores en serie de la bomba hidráulica.

De la ecuación 35, se despeja el factor C y dependiendo del tipo de bomba que de acuerdo con el Reglamento UE 547/2012 sea la que se esté evaluando, se obtiene el MEI conforme a la Tabla 10. Los tipos de bomba hidráulica definidos en el reglamento UE 547/2012 son:

- ESOB: Bomba hidráulica de aspiración axial con cojinetes propios
- ESCC: Bomba hidráulica de acoplamiento directo de aspiración axial
- ESSCi: Bomba hidráulica de acoplamiento directo en línea de aspiración axial
- MS-V: Bomba hidráulica vertical multicelular
- MSS: Bomba hidráulica sumergible multicelular

Tabla 10. Valores de MEI según el C de cada tipo de bomba

| Tipo Bomba | MEI | | | | | | |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |
| C (ESOB, 1450) | 132.58 | 130.68 | 129.35 | 128.07 | 126.97 | 126.1 | 124.85 |
| C (ESOB, 2900) | 135.6 | 133.43 | 131.61 | 130.27 | 129.18 | 128.12 | 127.06 |
| C (ESCC, 1450) | 132.74 | 131.2 | 129.77 | 128.46 | 127.38 | 126.57 | 125.46 |
| C (ESCC, 2900) | 135.93 | 133.82 | 132.23 | 130.77 | 129.86 | 128.8 | 127.75 |
| C (ESSCi, 1450) | 136.67 | 134.6 | 133.44 | 132.3 | 131 | 130.32 | 128.98 |
| C (ESSCi, 2900) | 139.45 | 136.53 | 134.91 | 133.69 | 132.65 | 131.34 | 129.83 |
| C (MS-V, 2900) | 138.19 | 135.41 | 134.89 | 133.95 | 133.43 | 131.87 | 130.37 |
| C (MSS, 2900) | 134.31 | 132.43 | 130.94 | 128.79 | 127.27 | 125.22 | 123.84 |

El Reglamento UE 547/2012 establece que el MEI debe ser superior a 0.4, por lo cual los modelos de bomba que obtengan valores inferiores a este no cuentan con la eficiencia energética que la norma exige. La valoración del MEI se ha establecido cualitativamente, aunque tiene un concepto matemático, se sabe que con MEI inferiores a 0.4 el modelo de bomba no es energéticamente viable y con MEI de 0.7 corresponde a modelos de bomba con alta viabilidad energética. Por lo tanto, en esta escala ha sido valorado el MEI.

3.6.2.4 Emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ se han calculado acorde al factor de emisión por energía eléctrica consumida. Las comercializadoras de energía indican los factores de emisión dependiendo de la acreditación GdO (Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad). Esta acreditación revela que parte de la energía eléctrica comercializada por la compañía ha sido obtenida a partir de fuentes renovables y cogeneración de alta eficiencia. Debido a que se ha hecho uso de la estructura tarifaria de energía eléctrica de Endesa, el factor de emisión de CO₂ ha sido el que esta compañía ha suministrado que es 0.37 KgCO₂/KWh (OECC & Ministerio para la Transición Ecológica, 2019).

En definitiva, las emisiones de CO₂ recogerán de forma directa el consumo de energía, no convertido en términos económicos a través de la tarifa eléctrica sino en términos de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

3.6.2.5 Rendimiento de regulación:

Corresponde al rendimiento de la energía en la estación de bombeo que la regulación ofrece. Viene dado por la expresión:

$$\eta_{reg} = \frac{H_{necesaria}}{H_{suministrada}} \quad (37)$$

donde, $H_{necesaria}$ es la que se requiere de acuerdo con la curva consigna y $H_{suministrada}$ la que otorga el sistema de bombeo.

3.6.3 Definición de alternativas viables para aplicar AHP

Una vez calculados todos los criterios y generadas todas las posibles alternativas valorando cada modelo de bomba de la base de datos con diferentes modos de regulación y diferentes valores a cada uno de los criterios, solo serán valoradas a través del AHP las alternativas que tengan la condición de dominancia sobre otras.

Por lo cual, el grupo de alternativas pasa por un proceso de depuración reduciendo el número de alternativas viables, mediante uno de los fundamentos del análisis de decisión multicriterio (MCDA): la frontera de Pareto. El principio de la dominancia (Abbass et al., 2001) implica que no existe una alternativa óptima única, sino un conjunto de soluciones alternativas, donde estas soluciones son óptimas más ampliamente que otras, en un espacio de búsqueda cuando se consideran los objetivos simultáneamente.

Para la aplicación de la frontera de Pareto, las alternativas establecidas como dominantes corresponderían entonces a las que tuviesen mejores resultados para cada uno de los criterios evaluados. Cada uno de los criterios se considera mejor o peor para cada alternativa de acuerdo con el juicio de valoración presentado en la Tabla 11.

El juicio de valoración fue establecido con base en criterios que por lo general son requeridos en un proceso de diseño de EB y que en la medida que se cumplan, se garantizará la obtención de un grupo

de alternativas óptimas que presentan mayor relevancia con respecto a estos juicios de valor para cada uno de los criterios.

Tabla 11. Juicios de valoración de criterios para Frontera Pareto

| Criterios para MP1 | | Juicio de valoración positiva |
|-------------------------|---|--|
| C1 | Numero de bombas instaladas. | Menor número de bombas |
| C2 | Coste de inversión de la instalación. | Menor coste de inversión |
| C3 | Coste de operación | Menor coste de operación |
| C4 | Coste de mantenimiento. | Menor coste de Mantenimiento |
| C5 | Complejidad del sistema de regulación. | Complejidad sencilla, es decir que involucre menos elementos de regulación |
| Criterios para MP2 | | Juicio de valoración positiva |
| F1-Factores Técnicos | C1 Tamaño de la Estación de Bombeo | Menor área de la EB |
| | C2 Complejidad del sistema de regulación | Complejidad sencilla, es decir que involucre menos elementos de regulación |
| | C3 Flexibilidad del sistema | Mayor número de bombas que garanticen flexibilidad |
| F2-Factores Ambientales | C4 MEI - Eficiencia energética de la bomba | Mayor valor de MEI |
| | C5 CO ₂ Emitido | Menor emisión de CO ₂ anual |
| | C6 Rendimiento de regulación | Mayor rendimiento de regulación |
| F3-Factores Económicos | C7 Coste de inversión | Menor coste de inversión |
| | C8 Coste de operación | Menor coste de operación |
| | C9 Coste de Mantenimiento | Menor coste de Mantenimiento |

La mayor parte de los criterios valorados tienen una definición cuantitativa. Por lo cual la prioridad se establece estableciendo si el mejor es el valor máximo o el valor mínimo. Los criterios como la complejidad del sistema de regulación y el MEI la valoración es cualitativa y para la valoración de estos criterios cualitativos es necesario establecer unos escalones de valoración en que se establezca en qué medida son valorados positiva o negativamente.

3.7 Modulo 3 – Aplicación del método AHP

El módulo 3 de la metodología es aplicable a las alternativas viables que son dominantes en la frontera de Pareto. Aunque el análisis multicriterio es igual para la MP1 y la MP2, la jerarquización de los criterios modifica su análisis y resultados finales.

3.7.1 Construcción jerárquica de AHP

La construcción jerárquica permite conocer las interrelaciones de cada uno de los elementos del AHP propuesto. Por ello, se ha establecido la construcción jerárquica de cada una de las metodologías. Para la MP1 los criterios se encuentran en un solo nivel y afectan directamente a las alternativas (Figura 32). Mientras que para la MP2 los criterios se encuentran en dos niveles, los de segundo nivel agrupados en factores y finalmente su ponderación será la que afecte las alternativas (Figura 33).

Debido a la diferencia en la jerarquización de ambas metodologías los resultados para el objetivo principal que es el diseño de la estación de bombeo, se espera sean distintos.

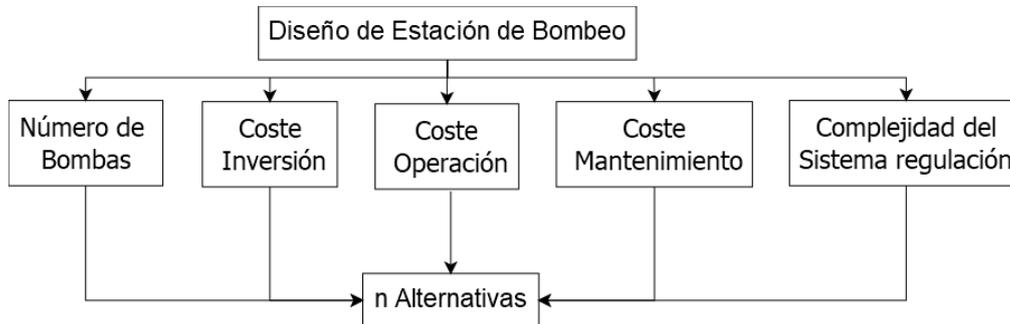


Figura 32. Construcción jerárquica de AHP en la MP1

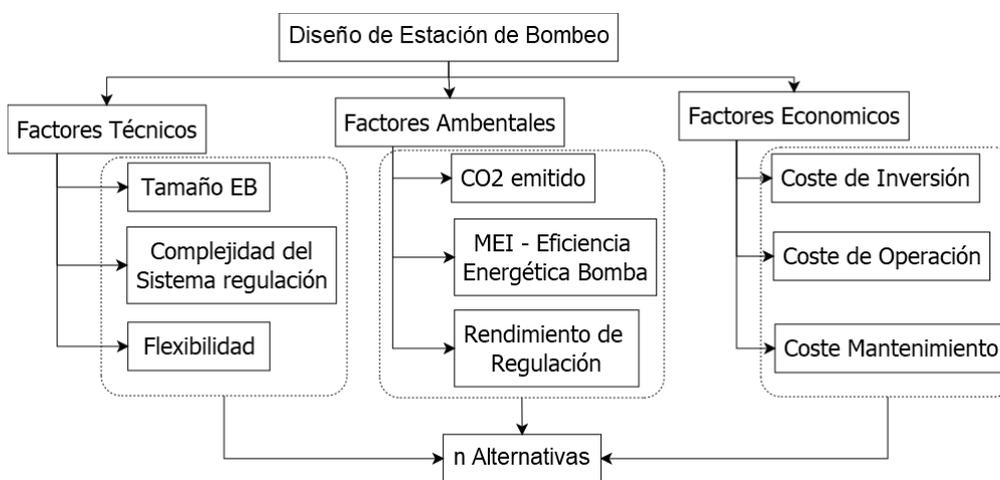


Figura 33. Construcción jerárquica de AHP para MP2

3.7.2 Comparación de criterios

Para establecer la prioridad de cada uno de los criterios previamente establecidos, el AHP requiere que se efectúe una comparación por pares de criterios y esta comparación debe ser llevada a cabo por expertos o interesados en el objetivo final de la construcción jerárquica. Por lo anterior, se realizaron consultas a expertos en diseño de EB tanto para el caso de la MP1 como la MP2.

La encuesta para la MP1 fue realizada ar 49 expertos (Anexo 01). Los expertos que respondieron a esta encuesta se desempeñan en diferentes colectivos laborales: academia, comercial, construcción, consultoría, gestión, operación y dirección. Varios de los expertos se desempeñan en dos o más de estos campos de trabajo. La encuesta para la MP2 fue respondida por 8 expertos (Anexo 01), donde todos los expertos se desempeñan en el ámbito académico.

En la MP2 El número de expertos consultados se redujo, debido a que, como se verá en este apartado, al evaluar los juicios obtenidos a través de los vectores propios de los criterios de todos los colectivos de expertos, los del grupo de la academia fueron quienes tuvieron resultados de juicios de valor más cercanos al promedio total y por ende no se vio la necesidad de extender la encuesta a un número mayor de expertos.

En las encuestas se les consultó a los expertos la prioridad de cada uno de los criterios, preguntando por pares de ellos, con lo cual los expertos dieron una percepción de preferencia de unos criterios sobre otros. En la encuesta de la MP2, se les consultó además la preferencia entre los factores o criterios de primer nivel en la estructura jerárquica.

3.7.2.1 Valoración de criterios

La utilización del método AHP requiere que el experto tenga cierta experiencia en la valoración jerárquica. Las encuestas con las que se valoraron los juicios de los expertos fueron estructuradas de forma distinta (Anexo 01).

Para el caso de MP1 se realizó una estructuración puntuando de 1 a 9 la comparación entre dos criterios Ci y Cj. En la Figura 34 se muestra un ejemplo de la valoración en la encuesta. De esta forma un valor de 1 indica una importancia extremadamente fuerte de Ci respecto de Cj. En el otro extremo, cuando la importancia extrema es de Cj respecto de Ci la valoración es de 9. Lógicamente una valoración 5 indica una valoración por igual de ambos criterios.



Figura 34. Esquema de los juicios a establecer entre dos criterios en la encuesta presentada a expertos para la MP1.

La escala establecida en la encuesta tiene, por tanto, una valoración asociada en la escala de Saaty, tal como se establece en la Tabla 12. Con la valoración asociada de Saaty se realiza el análisis de resultados.

Tabla 12. Escalas de valoración de Saaty acorde a las escalas de la encuesta para MP1

| MP1 | |
|-----------------|-----------------------|
| Escala encuesta | Escala Saaty asociada |
| 1 | 1/9 |
| 2 | 1/7 |
| 3 | 1/5 |
| 4 | 1/3 |
| 5 | 1 |
| 6 | 3 |
| 7 | 5 |
| 8 | 7 |
| 9 | 9 |

Para el caso de la MP2, los expertos consultados que fueron académicos ya eran conocedores del método AHP y de su funcionamiento, por lo que se empleó directamente la valoración según el criterio de Saaty, pero a través de una escala cualitativa. En la Figura 40 se encuentra un ejemplo de comparación entre dos criterios en la encuesta realizada.

7. De los siguientes FACTORES AMBIENTALES por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

| | | | | | | | |
|---|--------------------------|--|--|--|--|--|--|
| MEI (Eficiencia energética de la bomba) | <input type="checkbox"/> | | | | | | |
| CO ₂ Emitido | <input type="checkbox"/> | | | | | | |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> | | | | | | |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

Figura 35. Ejemplo de esquema de los juicios a establecer entre dos criterios en la encuesta presentada a expertos para la MP2.

Luego, la escala cualitativa se representa asociada al valor de Saaty de acuerdo con la Tabla 13. La escala de la encuesta para MP2 será la presentada en la Tabla 13 o su valor inverso dependiendo de a cuál de los criterios de preferencia se refiera el experto, en el Anexo 01 se puede observar que para esta encuesta la preferencia de los criterios se pregunta antes de dar una valoración sobre su importancia.

Tabla 13. Escalas de valoración de Saaty acorde a las escalas de la encuesta para MP2

| MP2 | |
|-----------------------|-----------------------|
| Escala encuesta* | Escala Saaty asociada |
| Igual importancia | 1 |
| Moderado | 3 |
| Fuerte | 5 |
| Muy Fuerte | 7 |
| Extremadamente fuerte | 9 |

Una vez los expertos responden las encuestas se obtiene el vector propio de criterios de cada experto, mediante el proceso que el AHP establece. Este proceso se basa en la normalización de la matriz de decisión de cada experto y promediando los valores de cada criterio de la matriz normalizada. Después de calculado el vector propio de cada experto, se calcula la razón de consistencia de acuerdo con el procedimiento descrito en el Capítulo 2.

3.7.2.2 Discusión sobre escala de Saaty

Haciendo un análisis de la escala de Saaty se encontró que, cuando un experto otorga un juicio, le está dando una importancia relativa a un criterio sobre otro. Si esa importancia se lleva a porcentajes, se encuentra que la valoración otorga los porcentajes que se detallan en la Tabla 14.

Tabla 14. Escala de Saaty y porcentajes de importancia dados a cada elemento comparado

| Escala Saaty | Elemento 1 | Elemento 2 |
|--------------|------------|------------|
| 1 | 50% | 50% |
| 2 | 67% | 33% |
| 3 | 75% | 25% |
| 4 | 80% | 20% |
| 5 | 83% | 17% |
| 6 | 86% | 14% |
| 7 | 88% | 13% |
| 8 | 89% | 11% |
| 9 | 90% | 10% |

De acuerdo con esta valoración, si se le otorga al elemento 1 sobre el elemento 2 una valoración de 5, que correspondería a una importancia fuerte sobre el elemento 2, se asociaría a una importancia del 83% al elemento 1 y del 17% al elemento 2.

Los expertos que han respondido a estas encuestas han sido ingenieros, quienes tienen en su ámbito de trabajo la práctica de dar juicios de valor a diferentes criterios con base en importancias de uno sobre otro. No estaría claro si al valorar un elemento con 5 realmente el decisor está pensando en las importancias relativas que los porcentajes estarían otorgando, o si en realidad estaría pensando en una escala más lineal de valoración, donde el juicio de 5 correspondería a un 70% para el elemento 1 y un 30% para el elemento 2.

Esta sería una cuestión por resolver en futuros desarrollos, donde se evalúen realmente los juicios que los expertos estarían dando a las comparaciones pareadas. Puede ser que la condición de Saaty para definir su escala de valoración con respecto a elementos intangibles, no sea acorde a la estructura de pensamiento que en ingeniería se tiene, donde siempre se trabaja con elementos tangibles y se acostumbra a dar juicios de valor sobre ellos. No obstante, para efectos del desarrollo de esta metodología se seguirá haciendo uso de la escala de Saaty.

3.7.2.3 Ponderación de los criterios

Según Saaty (2001), cuando una matriz tiene una razón de consistencia $CR < 0.1$ esta debe descartarse y por ende, debe descartarse la valoración del experto. Una de las propuestas de este trabajo consiste en evitar que la valoración de un experto que sea considerada inconsistente no sea tenida en cuenta, puesto que esta es una de las limitaciones del AHP que aún no han sido resueltas. Por lo tanto, la propuesta consiste en ponderar cada uno de los valores del vector propio de cada experto, por la inversa de la razón de consistencia a fin de evitar prescindir de la decisión de alguno de los expertos. Una vez ponderados los vectores propios por la inversa de la razón de consistencia, se agregan los vectores propios de todos los expertos mediante la media geométrica, tal como lo establece el proceso de AHP.

A través del desarrollo de este trabajo se busca obtener un vector propio de decisión de criterios general, con el fin de evitar tener que recurrir al concepto de expertos cada vez que se requiera realizar

el diseño de una nueva EB. Por lo cual, de acuerdo con las consultas hechas a través de los formularios para la MP1 y la MP2, los vectores propios de los grupos de criterios son los presentados en las Tablas 15 y 16.

Tabla 15. Vector propio de la MP1

| Criterios | Vector Propio |
|---|---------------|
| C1 Numero de bombas instaladas. | 0.32 |
| C2 Coste de inversión de la instalación. | 0.19 |
| C3 Coste de operación. | 0.27 |
| C4 Coste de mantenimiento. | 0.15 |
| C5 Complejidad del sistema de regulación. | 0.07 |

Tabla 16. Vector Propio de la MP2

| Criterios de primer nivel | Cod | Criterios de segundo nivel | Peso local | Peso global |
|---------------------------|------|--|------------|-------------|
| F1-Factores Técnicos | 0.49 | C1 Tamaño de la Estación de Bombeo | 0.09 | 0.05 |
| | | C2 Complejidad del sistema de regulación | 0.33 | 0.16 |
| | | C3 Flexibilidad del sistema | 0.58 | 0.28 |
| F2-Factores Ambientales | 0.22 | C4 MEI - Eficiencia energética de la bomba | 0.38 | 0.08 |
| | | C5 CO ₂ Emitido | 0.10 | 0.02 |
| | | C6 Rendimiento de regulación | 0.53 | 0.12 |
| F3-Factores Económicos | 0.29 | C7 Coste de inversión | 0.36 | 0.10 |
| | | C8 Coste de operación | 0.53 | 0.15 |
| | | C9 Coste de Mantenimiento | 0.11 | 0.03 |

Como se puede observar, para ambas metodologías el número de bombas corresponde a un criterio con importancia alta. Así estos sean contrarios, otorgando mayor valoración a un menor número de bombas en MP1 buscando la simplicidad y otorgando mayor valoración a un mayor número de bombas para MP2 en miras a la flexibilidad.

En cuanto a los costes, se ha observado que el coste de operación es el criterio con mayor importancia entre el grupo de criterios asociados al factor económico en la MP2, y de igual forma es el criterio con mayor importancia entre los criterios económicos de la MP1. Además, la jerarquización de los otros criterios económicos se comporta de igual manera para ambas metodologías.

Con el fin de valorar la posición de los expertos en cuanto a la toma de decisiones de acuerdo con el ámbito de trabajo en el cual se desempeñan, se aprovechó la consulta a expertos de la MP1 y se obtuvieron los pesos de los criterios o vectores propios para los diferentes colectivos consultados. Estos vectores se pueden observar en la Tabla 17.

Tabla 17. Vectores propios de expertos en diferentes campos de trabajo

| Criterios | | Academia | Comercial | Constructor | Consultoría | Gestión | Operación | Dirección |
|-----------|--|----------|-----------|-------------|-------------|---------|-----------|-----------|
| C1 | Numero de bombas instaladas. | 0.428 | 0.037 | 0.369 | 0.335 | 0.337 | 0.447 | 0.482 |
| C2 | Coste de inversión de la instalación. | 0.159 | 0.339 | 0.103 | 0.180 | 0.145 | 0.066 | 0.096 |
| C3 | Coste de operación. | 0.227 | 0.431 | 0.237 | 0.247 | 0.261 | 0.104 | 0.215 |
| C4 | Coste de mantenimiento. | 0.114 | 0.142 | 0.230 | 0.146 | 0.163 | 0.108 | 0.124 |
| C5 | Complejidad del sistema de regulación. | 0.072 | 0.050 | 0.061 | 0.093 | 0.094 | 0.274 | 0.083 |

La importancia de los criterios varía de un colectivo a otro. Sin embargo, para todos los colectivos excepto para el comercial, el número de bombas corresponde al criterio más importante del grupo de criterios valorados. El criterio con menor importancia relativa que prevalece en todos los criterios es la complejidad del sistema de regulación, excepto para el grupo de comercial que le da la importancia mínima al número de bombas, su valoración puede tener un sesgo asociado a su actividad comercial y el propósito de venta. El colectivo de operación la cual la complejidad del sistema de operación se le da una alta importancia, siendo el segundo en importancia después del número de bombas, lo que también puede deberse a su ámbito de trabajo que entre más complejo sea el sistema de regulación su labor se verá más afectada.

Al observar estas diferencias, y con el fin de plantear la MP2, se evaluó que tan alejados se encontraban los juicios de los grupos de expertos con respecto al promedio para cada criterio. Para llevar a cabo esta valoración se calculó la desviación entre el valor de cada criterio para cada colectivo con el promedio del total de los colectivos para cada criterio. Y se ponderó la suma de todos los criterios con el promedio de todos los colectivos, obteniendo un valor ponderado de la desviación que cada colectivo tiene con respecto al vector promedio de todos los colectivos. La desviación que cada uno de los colectivos tiene con respecto al vector promedio, se presenta en la Figura 36.

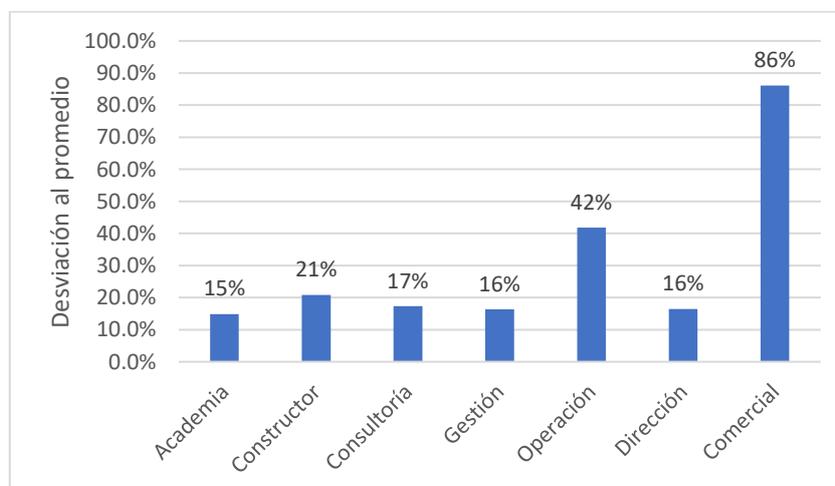


Figura 36. Desviación con respecto al promedio total de cada colectivo de expertos

De acuerdo con la Figura 36, el colectivo comercial se encuentra un 86% alejado de la valoración media de los expertos, lo que puede deberse a su actividad comercial como ya se discutió anteriormente. Mientras que los grupos de la academia, gestión y dirección son los que se encuentran más cercanos al valor promedio del juicio del total de colectivos. Y de estos, la academia es la que más cerca se encuentra a dicho valor promedio con un 15% de diferencia.

De acuerdo con lo anterior, para MP2 solo fueron consultados expertos de la academia, pues es el grupo que se encuentra más cercano al criterio promedio de todos los colectivos y de esta forma se evita tener que consultar un gran número de expertos que puedan tener índices de consistencia no aceptables.

3.7.3 Valoración de las alternativas

Las alternativas son todas las opciones de EB que se han generado una vez se han calculado todos los elementos que la componen y los criterios han sido establecidos. La valoración de las alternativas se desarrolló de la misma forma para la MP1 que para la MP2.

Ahora, el método AHP propone que se debe obtener un vector propio de alternativas con respecto a cada uno de los criterios. Es decir, dependiendo del valor que para cada criterio tenga una alternativa, se le debe asignar un juicio con respecto a dicho criterio.

Los juicios que se le otorgan a las alternativas con respecto a cada uno de los criterios pueden definirse dependiendo del tipo de criterio a valorar, esto será si es un criterio cuantitativo o cualitativo. Cuando es un criterio cuantitativo se le dará una valoración de acuerdo con un máximo o un mínimo de acuerdo con el ideal del criterio. Si corresponde a un criterio cualitativo, la variable se valorará de acuerdo a la escala de valoración definida.

Por tanto, a efectos del desarrollo de esta metodología las variables consideradas cualitativas son:

- Complejidad del sistema de regulación: es definido como variable cualitativa porque su juicio depende de que la complejidad sea más o menos compleja, y no depende de un valor en específico.
- índice MEI – Eficiencia energética de la bomba: es considerado como variable cualitativa, debido que, aunque tiene un razonamiento matemático, la norma UE 547/2012 ha establecido unos valores límite que permiten escalar el juicio de valor considerándolo como positivo o negativo.

Para efectos de esta metodología se optó por valorar las alternativas cualitativas mediante la definición de *Ratings* o categorías, debido a la naturaleza de su valoración, pues tanto la complejidad del sistema de regulación como el MEI ya previamente están establecidos en categorías.

Para establecer los Ratings se requiere realizar las comparaciones pareadas entre las categorías de cada uno de los criterios. En las Tablas 18 y 19 se muestran las valoraciones y Ratings establecidos para las variables cualitativas.

Tabla 18. Matriz de comparación para la obtención del vector ideal o Rating del criterio Nivel de Complejidad

| Matriz de comparación | | | | | | | | Rating |
|-----------------------|-----|------|------|------|------|------|------|--------|
| Nivel de Complejidad | 1 | 2.1. | 2.2. | 3.1. | 3.2. | 4.1. | 4.2. | |
| 1 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 7 | 9 | 1.00 |
| 2.1. | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 5 | 7 | 0.57 |
| 2.2. | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 3 | 5 | 0.32 |
| 3.1. | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 0.15 |
| 3.2. | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 | 0.07 |
| 4.1. | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 1 | 3 | 0.15 |
| 4.2. | 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 1/3 | 1 | 0.07 |

Tabla 19. Matriz de comparación para la obtención del vector ideal o Rating del criterio MEI – índice de eficiencia energética

| Matriz de comparación | | | | | | | | Rating |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| Valor de MEI | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | |
| 0.1 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 0.05 |
| 0.2 | 3 | 1 | 1/3 | 1/7 | 1/9 | 1/9 | 1/9 | 0.07 |
| 0.3 | 5 | 3 | 1 | 1/5 | 1/7 | 1/9 | 1/9 | 0.12 |
| 0.4 | 9 | 7 | 5 | 1 | 1/3 | 1/5 | 1/7 | 0.27 |
| 0.5 | 9 | 9 | 7 | 3 | 1 | 1/3 | 1/5 | 0.40 |
| 0.6 | 9 | 9 | 9 | 5 | 3 | 1 | 1/3 | 0.61 |
| 0.7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 5 | 3 | 1 | 1.00 |

Para variables cuantitativas se realiza la normalización de los valores. Es decir, para cada criterio se establece la razón entre el valor del criterio para cada alternativa sobre la sumatoria total de los criterios para el total de las alternativas. Esta normalización se idealiza para obtener un vector de prioridad ideal, similar al que se obtiene con el *Rating*, y así valorar las alternativas con el mismo modelo de valoración.

Para finalizar, los vectores ideales de todas las alternativas para cada uno de los criterios se deberán ponderar con el vector propio de criterios globales, obteniendo así la jerarquización de las alternativas y la obtención de una alternativa óptima. La alternativa óptima corresponderá a una solución de un modelo de bomba con un modo de regulación específico que tendrá valorados cada uno de los otros criterios.

3.7.3.1 Discusión sobre valoración de las alternativas

Los juicios de valor asignados a las alternativas con respecto a cada criterio finalmente son modelos sobre el comportamiento de una variable. Es decir, representan la distribución del comportamiento de un criterio en cuanto a un conjunto de variables.

Así las cosas, los modelos de comportamiento de cada uno de los criterios pueden variar dependiendo del diseño que se esté desarrollando. Para dar un ejemplo, se supone que los costes de inversión para un grupo de soluciones tienen una variación entre 20.000€ y 20.100€. ¿Cómo establecer el comportamiento del rango de precios? ¿realmente se puede decir que 20.000€ corresponde a un valor extremadamente menor que 20.100€? ¿podría decirse que las alternativas con costes de inversión cercanos a los 20.000€ son mejores que las alternativas con valores cercanos a los 20.100€? ¿Cómo valorar las alternativas en estos casos?

Si se sigue el método de matrices de comparación pareada con la escala de T. Saaty (2008), se tendrá un comportamiento polinómico del rango. Mientras que si se efectúa la normalización de los valores de los criterios tal como se ha establecido para esta metodología, el rango será valorado a través de un modelo más lineal. Si se efectúa la valoración de las alternativas por medio de *ratings*, el modelo de comportamiento del rango de alternativas será de tipo escalonado.

En la Figura 37 se presentan un ejemplo diferente al ejemplo de las preguntas anteriormente realizadas, en el cual se muestran diferentes modelos de valoración de alternativas para el criterio de costes de inversión.

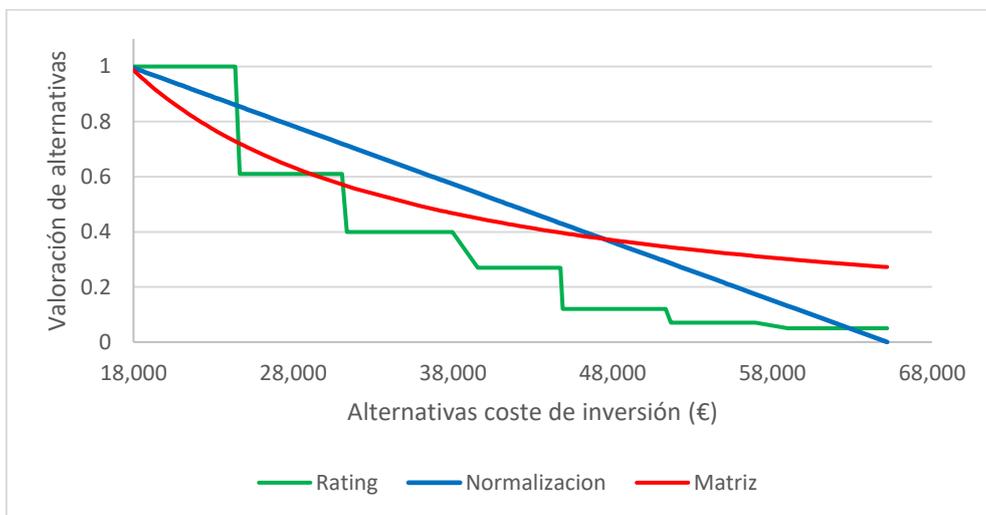


Figura 37. Comportamiento de diferentes escalas de valoración

En la Figura 37 las escalas de valor se encuentran en un vector propio idealizado. Este vector corresponde a la idealización del vector propio de las alternativas con respecto a la que del grupo de estas se considere la mejor. La línea roja en la grafica corresponde a la valoración de las alternativas a través de una matriz de comparación pareada, la línea azul trata de la normalización de los valores de las alternativas con respecto a la suma y la idealización de este vector resultante. Finalmente, la línea verde corresponde a la definición de escalones de valoración del criterio en el que si, por ejemplo, una alternativa está entre 26000€ y 31000€, la valoración será siempre 0.6.

De acuerdo con esto, una alternativa tendrá un valor u otro para el vector dependiendo del tipo de escala de valoración con la que se haya definido valorar. Para efectos del presente documento la valoración de las alternativas cuantitativas se efectuó mediante la normalización, es decir linealmente y de las cualitativas en escalas de Rating.

3.7.4 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad no es un objetivo final de la metodología planteada, si bien es cierto, que se requiere establecer un análisis de sensibilidad tal que se garantice que la alternativa seleccionada sea realmente la óptima, mediante la identificación de parámetros que puedan modificarla y su afectación en el resultado final, en este documento no se ha llegado a establecer un análisis de sensibilidad lo suficientemente robusto para ello.

No obstante, como primera medida para que el análisis de sensibilidad se efectúe, se propone que se modifiquen algunos elementos de la infraestructura de la EB, tales como elementos de regulación que tengan variaciones dentro de las posibles alternativas generadas, pero que finalmente permita valorar que no haya una alteración de la alternativa óptima al cambiar los equipos de regulación, o identificar si se efectúan alteraciones mínimas.

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN A CASO DE ESTUDIO

Las metodologías MP1 y MP2 que han sido descritas en el capítulo 3, han sido aplicadas en este capítulo a un caso de estudio. Es decir, se desarrollará el diseño de una EB a partir de estas metodologías. Adicionalmente, se ha comparado el diseño mediante las metodologías propuestas con el diseño de la forma tradicional y una evaluación económica basada en la estimación de costes anuales.

Como ya se ha indicado anteriormente, todo el proceso metodológico fue llevado a cabo a través de una herramienta de cálculo que mediante procesos iterativos y con macros establecidas va desarrollando todos los pasos de las metodologías propuestas generando resultados para ambas metodologías MP1 y MP2.

4.1 Modulo 1 – Hipótesis de partida

El caso de estudio a valorar corresponde a un caso real de una ciudad de 30.000 habitantes que cuenta con 4 puntos de suministro (PS1, PS2, PS3 y PS4). Los puntos de suministro son sistemas de bombeo de inyección directa. En la Figura 38 se muestran todos los puntos de suministro de la red y se resalta el punto de suministro con el cual se aplicarán las metodologías propuestas. La red de abastecimiento es mallada y el caudal medio total de la red corresponde a 103 l/s, de los cuales el PS1 suministra un caudal de 36.29 l/s, PS2 27.39 l/s, PS3 22.04 l/s y PS4 17.20 l/s.

Este caso de estudio ha sido obtenido a partir de León Celi et al. (2017) donde ha analizado la distribución óptima de caudales desde cada una de las fuentes de suministro de esta red. En la Tabla 20 se presentan los datos de las curvas consigna de los cuatro puntos de suministro. En el trabajo desarrollado por León Celi se establece la mejor distribución de caudales entre las diferentes fuentes. Sin embargo, no determina el diseño final de las EB. Por tal motivo, se ha elegido uno de los puntos de suministro como caso de estudio para la aplicación de la metodología que en este documento se propone. De los puntos de suministro con los que cuenta la red de abastecimiento, se analizará la EB correspondiente a PS2.

Tabla 20. Datos de curva consigna de los puntos de suministro de la red

| | PS1 | PS2 | PS3 | PS4 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| DH | 31.55 | 17.95 | 25.64 | 28.18 |
| R | 0.0111 | 0.0232 | 0.0332 | 0.0405 |

Como se ha indicado anteriormente, el punto de suministro establecido para el desarrollo de la metodología propuesta es el PS2. El cual tiene la curva de consigna mostrada en la Tabla 20 y cuenta con un caudal máximo de suministro de 51.40 l/s. En la Figura 38 se encuentra señalado el punto PS2 en la red objeto de estudio.

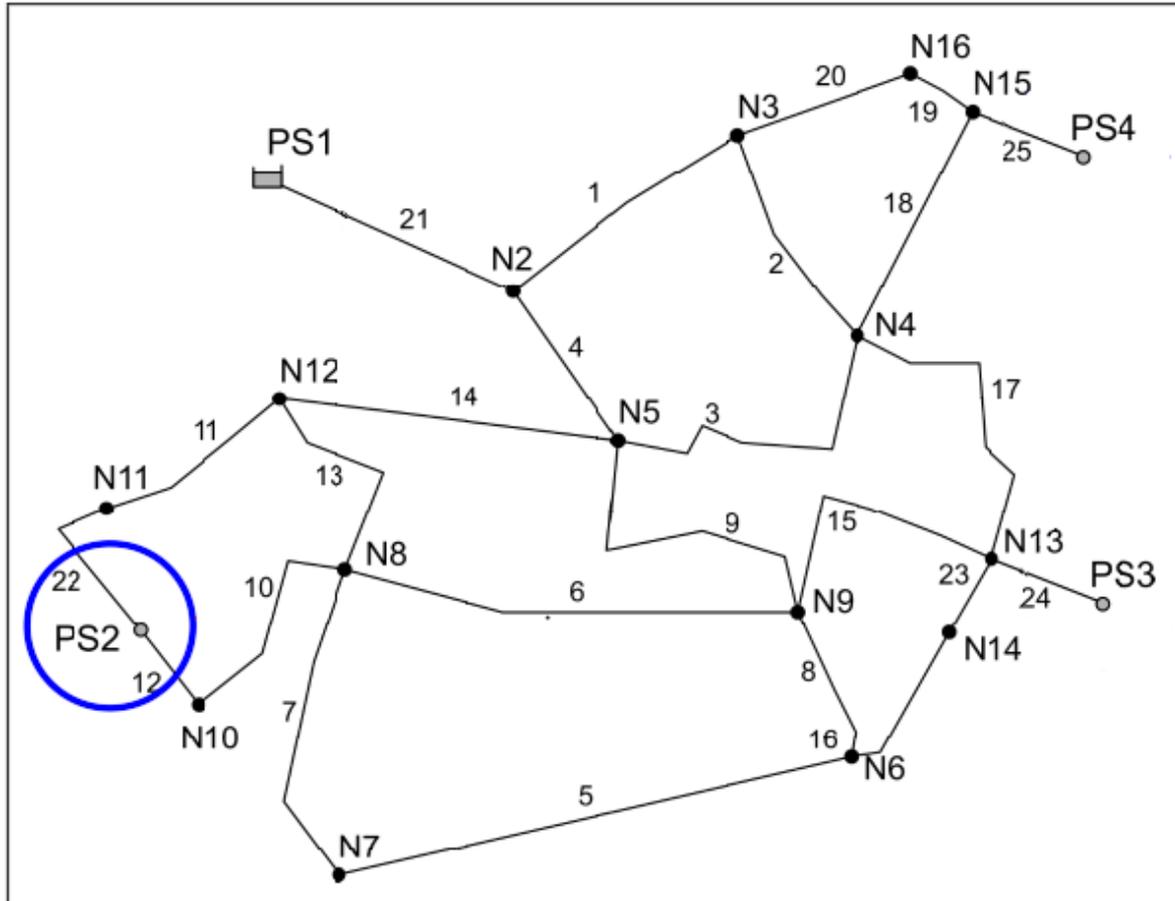


Figura 38. Red de distribución caso real – selección caso de estudio

Tal como se explicó en la metodología, lo primero que se debe obtener son las hipótesis de partida del sistema de bombeo. De acuerdo con esto, el punto de suministro PS2 cuenta con la curva de consigna que se muestra en la siguiente expresión:

$$H = 17.95 + 0.0232 * Q^2 \quad (38)$$

El punto PS2 satisface la demanda de una zona de la red, por lo cual las curvas de consigna y de modulación no obedecen al comportamiento de la demanda de toda la población, pues el total de la población es abastecida por los cuatro puntos de suministro. El caudal medio del abastecimiento asociado al PS2 es 26.98 l/s. La curva de modulación de la demanda se muestra en la Figura 39.

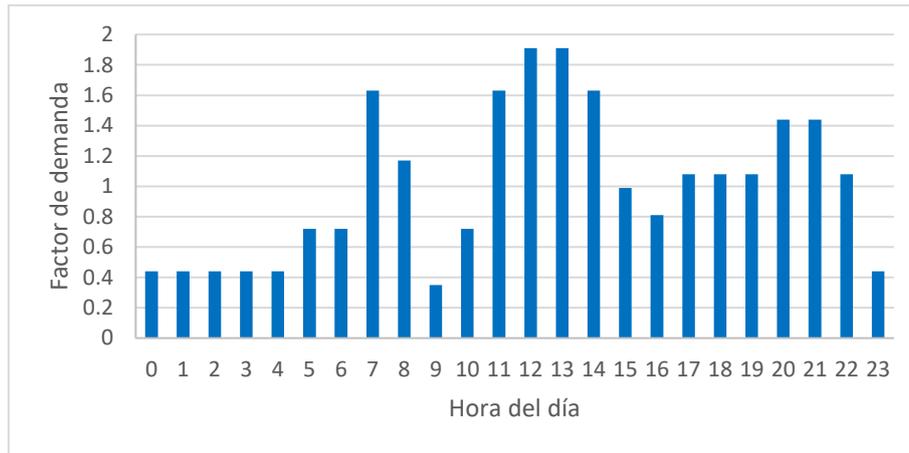


Figura 39. Curva de modulación del punto de suministro PS2

La base de datos utilizada es de un fabricante de bombas centrífugas homologadas, que contiene 67 diferentes modelos y suministra los datos necesarios para garantizar el proceso de diseño. A continuación, en la Tabla 21 se muestran algunos ejemplos de modelos de bomba con la información que suministra el fabricante. Para mayor detalle de la información de la base de datos, se puede consultar el Anexo 02.

Tabla 21. Datos otorgados por fabricante para cada modelo de bomba

| Modelo | rpm | Potencia (KW) | CV | Rend. Máximo | H ₀ | A | Q Máximo | Q Óptimo | E | F |
|--------|------|---------------|-----|--------------|----------------|------|----------|----------|--------|--------|
| 32-13 | 2900 | 2 | 3 | 0.56 | 26.17 | 0.24 | 10.52 | 5.26 | 0.2128 | 0.0202 |
| 40-20 | 2900 | 5.5 | 7.5 | 0.56 | 41.33 | 0.17 | 15.59 | 7.7944 | 0.1437 | 0.0092 |
| 80-20 | 2900 | 30 | 40 | 0.79 | 54.18 | 0.12 | 21.06 | 10.5293 | 0.1501 | 0.0071 |

La Tabla 21 contiene en la primera columna el modelo de bomba del fabricante. Seguido de las revoluciones de trabajo de la bomba a velocidad fija. Los fabricantes por lo general tienen bases de datos de bomba para dos tipos de números específicos de revoluciones 2900 rpm y 1450 rpm, para este caso en específico se tomó la base de datos correspondiente a 2900 rpm. La tercera columna corresponde a la potencia del motor eléctrico de la bomba en KW. La columna 4 es la potencia de la bomba. Después se encuentra el rendimiento máximo que puede otorgar el modelo de bomba. Los parámetros H₀ y A corresponden a los parámetros de la curva motriz asociada al modelo de la bomba (ecuación 1). Sigue el caudal máximo que puede aportar la bomba. El caudal óptimo que se da cuando se obtiene el máximo rendimiento, es decir, en el punto óptimo de la bomba. Finalmente se presentan los coeficientes característicos de la ecuación de rendimiento (ecuación 2).

El esquema de bombeo a usar será el establecido en la Figura 16 del capítulo anterior, incluyendo la bomba de reserva para la estación de bombeo. Para finalizar las hipótesis de partida, las tarifas eléctricas que se han usado en este caso de estudio serán las presentadas en la Tabla 5 que ofrece la empresa ENDESA para su Tarifa Óptima, y que se ven representadas en la Figura 40 a continuación.

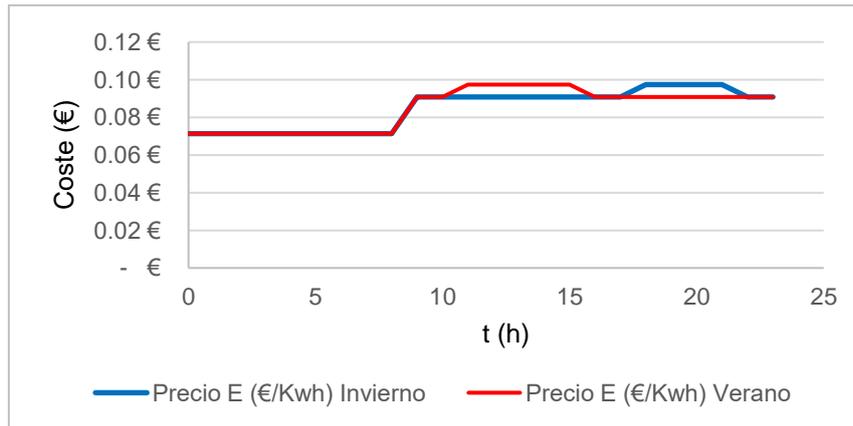


Figura 40. Variación Tarifaria ENDESA – Tarifa Optima

4.2 Modulo 2 – Selección de alternativas viables

Dentro de este módulo el primer paso corresponde a la definición de viabilidad del modelo de bomba para lo cual, se debe conocer la altura correspondiente al caudal máximo del sistema de abastecimiento. Para este caso de estudio, esta altura corresponde a $H(Q_{max}) = 79.24$ m. Por lo cual, una vez efectuado el proceso de cálculo de los 67 modelos de bomba, los modelos viables para este caso de estudio son los presentados en la Tabla 22.

Tabla 22. Modelos viables para abastecer PS2

| ID | Modelo | No. Bombas | rpm | Potencia (KW) | CV | Rend. Máximo | H ₀ | A | Q Máximo | Q Optimo | E | F |
|-----|------------|------------|------|---------------|-----|--------------|----------------|------|----------|----------|------|--------|
| B1 | 32-26/20 | 8 | 2900 | 15 | 20 | 0.43 | 0.43 | 0.25 | 19.29 | 9.65 | 0.09 | 0.0046 |
| B2 | 32-26/25 | 6 | 2900 | 18.5 | 25 | 0.45 | 0.45 | 0.23 | 21.18 | 10.59 | 0.08 | 0.0040 |
| B3 | 40-26/30 | 4 | 2900 | 22 | 30 | 0.55 | 0.55 | 0.11 | 30.18 | 15.09 | 0.07 | 0.0024 |
| B4 | 50-26/30 | 7 | 2900 | 22 | 30 | 0.61 | 0.61 | 0.04 | 45.42 | 22.71 | 0.05 | 0.0012 |
| B5 | 50-26/40 | 3 | 2900 | 30 | 40 | 0.63 | 0.63 | 0.04 | 48.63 | 24.32 | 0.05 | 0.0011 |
| B6 | 65-26/60 | 8 | 2900 | 45 | 60 | 0.75 | 0.75 | 0.31 | 17.41 | 8.71 | 0.17 | 0.0099 |
| B7 | 65-26/75 | 6 | 2900 | 55 | 75 | 0.77 | 0.77 | 0.32 | 18.11 | 9.06 | 0.17 | 0.0094 |
| B8 | 80-26/75 | 8 | 2900 | 55 | 75 | 0.82 | 0.82 | 0.14 | 24.78 | 12.39 | 0.13 | 0.0053 |
| B9 | 80-26/100 | 5 | 2900 | 75 | 100 | 0.8 | 0.8 | 0.14 | 26.83 | 13.41 | 0.12 | 0.0044 |
| B10 | 100-26/100 | 9 | 2900 | 75 | 100 | 0.83 | 0.83 | 0.07 | 33.94 | 16.97 | 0.10 | 0.0029 |

En esta Tabla 22 se han presentado los modelos viables con los datos de la base de datos de bombas del fabricante para cada uno de los modelos. Durante este proceso se define tanto la viabilidad del modelo para abastecer los requerimientos de demanda del sistema, como el número de bombas necesarias para cumplir con ello. De este proceso se ha podido establecer que de los 67 modelos de bombas disponibles solo 10 tienen altura superior a $H(Q_{max})$ y por lo tanto pueden garantizar el abastecimiento del caudal máximo de la red en estudio.

Una vez definida la viabilidad y el número de bombas, se evalúan los diferentes modos de regulación y a partir de variar los modos de regulación se generan 151 alternativas de diseño de la EB. Como este proceso solo busca la generación de las alternativas que seguidamente se valorarán, no existe diferencia entre las alternativas a valorar para MP1 y MP2. Es decir, con este proceso solo se han definido los modelos de bomba y los modos de regulación de las diferentes alternativas, no se ha entrado a evaluar positiva o negativamente los resultados de estos cálculos de alternativas. En la Tabla 23 se plantean los modelos de bomba con los modos de regulación que han sido evaluados y con los que se han obtenido alternativas de solución.

Tabla 23. Alternativas viables para el abastecimiento del punto de suministro PS2

| ID Modelo | Modelo | No. bombas | No soluciones | Modos de regulación evaluados | | | | | | |
|-----------|------------|------------|---------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | 1 | 2.1. | 2.2. | 3.1. | 3.2. | 4.1. | 4.2. |
| B1 | 32-26/20 | 8 | 18 | X | | X | X | X | X | X |
| B2 | 32-26/25 | 6 | 14 | X | | X | X | X | X | X |
| B3 | 40-26/30 | 4 | 11 | X | X | X | X | X | X | X |
| B4 | 50-26/30 | 7 | 16 | X | | X | X | X | X | X |
| B5 | 50-26/40 | 3 | 9 | X | | X | X | X | X | X |
| B6 | 65-26/60 | 8 | 18 | X | | X | X | X | X | X |
| B7 | 65-26/75 | 6 | 15 | X | X | X | X | X | X | X |
| B8 | 80-26/75 | 8 | 18 | X | | X | X | X | X | X |
| B9 | 80-26/100 | 5 | 12 | X | | X | X | X | X | X |
| B10 | 100-26/100 | 9 | 20 | X | | X | X | X | X | X |

En la Tabla 23 se presentan los modelos de bombas, el número de bombas que para cada modelo se requiere que permita abastecer el caudal máximo del punto de suministro PS2. Además, se plantea el número de soluciones por cada modelo. Es importante recordar que cada solución corresponde al número de bombas con un modo de regulación específico y que los modos de regulación 4.1 y 4.2 se evalúan para diferentes números de BVF y BVV. Finalmente, se muestran los diferentes modos de regulación valorados para cada modelo de bomba.

Como se puede observar el modo de regulación 2.1 es poco usual encontrarlo como solución, sobretodo en modelos con un alto número de bombas, debido a los escalones de presión establecidos en las consignas de presión de arranque y paro de la bomba. El escalón definido ha sido el establecido en la metodología con $\Delta H = 5m$. Este escalón hace que alguna consigna de arranque o paro de las bombas se encuentre por encima de H_0 , por lo cual hace que el modelo de bomba valorado con este modo de regulación no sea viable.

Una vez realizado el cálculo de cada uno de los criterios, se efectúa la frontera de Pareto con la cual se obtienen las alternativas dominantes. Una alternativa será más dominante que otra en la medida en que tenga una mejor valoración de los criterios acorde a la Tabla 11. Las alternativas dominantes tendrán entonces un valor para cada criterio con el que se permitirá iniciar el proceso de AHP.

La diferencia entre la MP1 y la MP2 se evidencia en la frontera de Pareto cuando se ponderan los criterios que cada una de las metodologías propone. Para MP1, el número de soluciones dominantes fue de 31/151, lo que indica que, de las 151 alternativas disponibles, únicamente 31 eran dominantes. En la Tabla 24 se presentan los resultados para la frontera de Pareto de la MP1, donde se encontrarán los modelos dominantes y el número de soluciones por modelo que han sido dominantes sobre otras posibles alternativas.

Tabla 24. Resultados Frontera de Pareto para MP1

| ID Modelo | No bomba | No sol. | Modos de regulación evaluados | | | | | | | | Coste inversión (€) | | Coste operación (€/año) | | Coste mantenimiento (€/año) | |
|-----------|----------|---------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|---------------------|------------|-------------------------|------------|-----------------------------|-------|
| | | | 1 | 2.1 | 2.2 | 3.1 | 3.2 | 4.1 | 4.2 | Coste min. | Coste máx. | Coste min. | Coste máx. | Coste min. | Coste máx. | |
| B3 | 4 | 3 | X | | X | | | | | X | 53,507 | 58,346 | 20,909 | 48,413 | 1,280 | 1,417 |
| B4 | 7 | 1 | | | X | | | | | | 86,454 | 86,454 | 27,263 | 27,263 | 2,195 | 2,195 |
| B5 | 3 | 9 | X | X | X | X | X | X | X | X | 53,172 | 64,904 | 16,492 | 51,645 | 1,011 | 1,193 |
| B6 | 8 | 1 | | | X | | | | | | 119,627 | 119,627 | 18,119 | 18,119 | 2,471 | 2,471 |
| B7 | 6 | 9 | X | X | X | | X | | X | | 102,674 | 133,449 | 14,035 | 32,973 | 1,823 | 2,073 |
| B8 | 8 | 1 | | | X | | | | | | 157,361 | 157,361 | 16,961 | 16,961 | 2,471 | 2,471 |
| B10 | 5 | 7 | X | | X | | X | | X | | 121,097 | 150,910 | 13,363 | 36,469 | 1,558 | 1,785 |

Para el caso de la MP1 de los 10 modelos de bomba viables, 7 han sido definidos en las alternativas dominantes y de las 151 soluciones que incluyen los diferentes modos de regulación solo 31 en total han sido dominantes. El modelo B5 es el modelo con el que se han podido valorar todos los modos de regulación y por ende el número de soluciones que se han generado es el superior entre el conjunto de modelos.

Adicionalmente se presentan los rangos de los costes de inversión, operación y mantenimiento. Estos rangos determinan entre que valores se mueven los diferentes modelos de bomba, encontrándose que los modelos B5 y B3 tienen los valores de inversión más bajos. En cuanto a los costes de operación los rangos de valores son mayores en cuanto más modos de regulación hayan sido valorados y por ende B5, B7 y B10 tienen los rangos más amplios en los costes de operación. Los costes de mantenimiento no se muestran relevantes, pues casi todas las alternativas tienen costes de mantenimiento sobre el mismo rango.

Para MP2 las soluciones dominantes fueron 98/151, lo que indica que de las 151 alternativas disponibles 98 son dominantes. Cabe destacar que, cuanto mayor es el número de criterios a valorar más difícil es la aparición de la dominancia de unas soluciones respecto de otras. De ahí que MP1 tenga finalmente menos soluciones dominantes que MP2.

En el caso de la MP2 cuando se efectúa la frontera de Pareto, no se tiene en cuenta la agrupación de los criterios por factores, se evalúan los 9 criterios en conjunto y para determinar que una alternativa domine a otra. No obstante, los resultados se han mostrado divididos en los factores, pero esto ha sido a efectos de presentación y no porque obedezca a que el algoritmo haya tenido en cuenta las agrupaciones por factores para la valoración de las alternativas en la frontera de Pareto.

Los resultados de la frontera de Pareto para MP2 se han planteado en tres tablas, en la Tabla 25 se encuentran los resultados de la frontera de Pareto con la información de los factores técnicos, en la Tabla 26 se plantean los resultados de la frontera de Pareto con la información del grupo de criterios que hacen parte de los factores ambiental y finalmente en la Tabla 27 se plantean los resultados para la frontera de Pareto que corresponden a los criterios de los factores económicos. En este punto se podrán encontrar los modelos dominantes y el número de soluciones por modelo que han sido dominantes sobre otras posibles alternativas.

Tabla 25. Resultados de los factores técnicos en la Frontera de Pareto para MP2

| Modelo | No bombas | No soluciones | Modos de reg. | | | | | | Tamaño (m2) | |
|--------|-----------|---------------|---------------|------|------|------|------|------|-------------|------|
| | | | 1 | 2.1. | 2.2. | 3.1. | 3.2. | 4.1. | | 4.2. |
| B1 | 8 | 11 | X | | X | | | X | X | 173 |
| B2 | 6 | 9 | X | | X | | X | X | X | 144 |
| B3 | 4 | 8 | X | X | X | | X | X | X | 141 |
| B4 | 7 | 10 | X | | X | | X | X | X | 158 |
| B5 | 3 | 9 | X | X | X | X | X | X | X | 151 |
| B6 | 8 | 11 | X | | X | | X | X | X | 173 |
| B7 | 6 | 10 | X | X | X | | X | X | X | 144 |
| B8 | 8 | 10 | X | | X | | X | | X | 173 |
| B9 | 5 | 8 | X | | X | | X | X | X | 158 |
| B10 | 9 | 12 | X | | X | | X | X | X | 187 |

Tabla 26. Resultados de los factores ambientales en la Frontera de Pareto para MP2

| Modelo | MEI | Kg CO ₂ | | Rend. Reg. | |
|--------|-----|--------------------|-----------|------------|------|
| | | Min. | Max. | Min. | Max. |
| B1 | 0.1 | 486,150 | 2,477,038 | 0.56 | 1 |
| B2 | 0.1 | 361,189 | 1,678,043 | 0.52 | 1 |
| B3 | 0.1 | 208,774 | 858,078 | 0.54 | 1 |
| B4 | 0.1 | 332,846 | 2,561,660 | 0.6 | 1 |
| B5 | 0.1 | 132,609 | 687,108 | 0.5 | 1 |
| B6 | 0.7 | 280,802 | 1,317,900 | 0.56 | 1 |
| B7 | 0.7 | 227,098 | 876,161 | 0.54 | 1 |
| B8 | 0.7 | 244,860 | 1,504,232 | 0.58 | 1 |
| B9 | 0.7 | 167,573 | 808,372 | 0.52 | 1 |
| B10 | 0.1 | 291,737 | 2,350,395 | 0.6 | 1 |

Tabla 27. Resultados de los factores económicos en la Frontera de Pareto para MP2

| Modelo | Coste inv. (€/año) | | Coste oper. (€/año) | | Coste mant.(€/año) | |
|------------|--------------------|--------------|---------------------|-------------|--------------------|------------|
| | Coste min. | Coste máx. | Coste min. | Coste máx. | Coste min. | Coste máx. |
| B1 | 84,634.00 € | 101,233.00 € | 25,738.00 € | 69,801.00 € | 2,375.00 € | 2,670.00 € |
| B2 | 67,990.00 € | 83,054.00 € | 24,302.00 € | 63,102.00 € | 1,823.00 € | 2,073.00 € |
| B3 | 53,507.00 € | 65,636.00 € | 18,963.00 € | 48,413.00 € | 1,280.00 € | 1,485.00 € |
| B4 | 84,676.00 € | 104,095.00 € | 20,782.00 € | 82,310.00 € | 2,099.00 € | 2,371.00 € |
| B5 | 53,172.00 € | 64,904.00 € | 16,492.00 € | 51,645.00 € | 1,011.00 € | 1,193.00 € |
| B6 | 117,849.00 € | 153,619.00 € | 14,400.00 € | 37,154.00 € | 2,375.00 € | 2,670.00 € |
| B7 | 102,674.00 € | 133,449.00 € | 14,035.00 € | 32,973.00 € | 1,823.00 € | 2,073.00 € |
| B8 | 155,583.00 € | 195,813.00 € | 13,641.00 € | 42,349.00 € | 2,375.00 € | 2,670.00 € |
| B9 | 121,097.00 € | 150,910.00 € | 13,363.00 € | 36,469.00 € | 1,558.00 € | 1,785.00 € |
| B10 | 204,184.00 € | 255,919.00 € | 14,577.00 € | 58,745.00 € | 2,651.00 € | 2,968.00 € |

Como se puede observar, para MP2 fueron dominadas algunas soluciones, pero ninguno de los modelos de bombas viables fue descartado. Como ya se indicó, a mayor número de criterios, se dificulta establecer las relaciones de dominancia entre las alternativas a valorar.

Se puede observar que para el caso de los criterios técnicos la alternativa B5 sigue presentando todos los modos de regulación en las alternativas dominantes y los modos de regulación 2.1 y 3.1 son los más escasos en los resultados de dominancia. Los modos de regulación 2.1 han venido siendo escasos desde la viabilidad de las bombas, por el criterio de las alturas de consigna para los arranques y paros. El modelo 3.1 sin embargo ha sido dominado en esta frontera de Pareto para casi todos los modelos de bomba, y el modo de regulación 2.2 aparece para casi todos los modelos, lo que indica que las alternativas con modo de regulación 2.2 están dominando a las alternativas con modo de regulación 3.1, debido a su sencillez y los altos rendimientos que se pueden llegar a alcanzar. El tamaño de la EB varía de acuerdo con el número de bombas en la instalación, cuanto mayor sea el número de bombas, mayor tamaño tendrá la EB.

En la Tabla 26, para los factores ambientales se puede notar que la alternativa B5 que podría ser candidata a una de las óptimas por permitir varios modos de regulación, no cuenta con un MEI que cumpla con la norma. De las alternativas que tienen MEI aceptable, la B7 y B9 son las que tienen rangos de valores menores de emisiones de CO₂. Los rendimientos de regulación oscilan entre casi los mismos valores para todas las alternativas, por lo cual este criterio no repercutiría en la definición de alternativas dominantes.

En los factores económicos se puede notar que los modelos de bomba que no cumplen con el MEI son los que tienen rangos de valores de inversión más bajos, lo que se puede deber a que estas bombas sean más económicas en el mercado. Entre las que tienen mejores valores de MEI, la B7 viene siendo la que cuenta con el menor coste de inversión. Asimismo, las alternativas con MEI aceptable tienen rangos de valores más bajos para los costes de operación, lo que indica una eficiencia energética. Los costes de mantenimiento siguen siendo similares para todas las alternativas.

Una vez se efectúa la frontera de Pareto, las alternativas que se han generado pasan a ser evaluadas mediante el método AHP.

4.3 Modulo 3 – Aplicación de método AHP

Aunque el procedimiento en la aplicación del método AHP sea similar para MP1 que para MP2, la valoración de los criterios es distinta. Por tanto, a efectos de presentación de los resultados para el caso de estudio, se han definido dos subapartados para cada metodología evaluada. Así se conocerán en detalle los resultados que arroja la aplicación del AHP para cada metodología.

4.3.1 Aplicación de método AHP para MP1

Para la aplicación del método AHP, uno de los primeros pasos supone la jerarquización de los elementos a valorar. Por lo tanto, la jerarquía de los elementos para MP1 en este caso de estudio específico se plantea en la Figura 41.

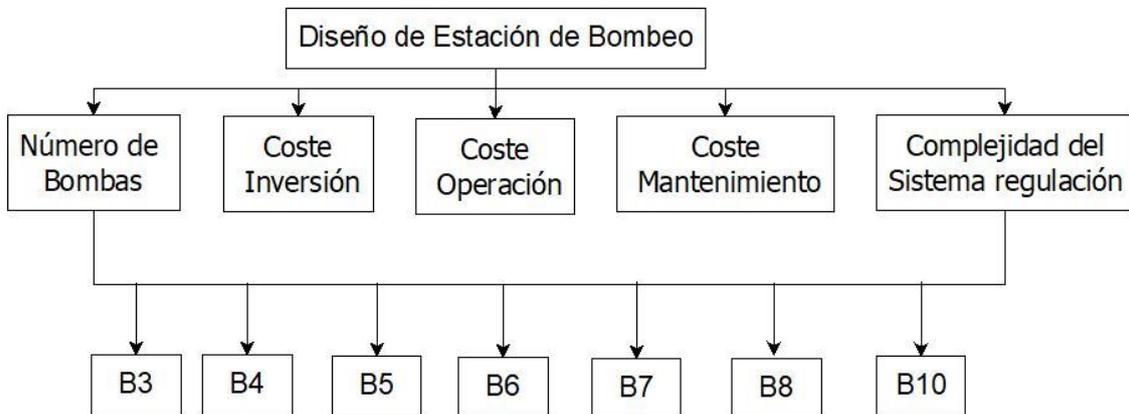


Figura 41. Estructuración jerárquica para MP1

En la estructuración jerárquica se puede observar claramente como todos los criterios influyen en las alternativas a valorar. Las alternativas que se han presentado corresponden a los modelos de bomba que han sido dominantes en la frontera de Pareto. A partir de esta estructuración jerárquica, se pasa a valorar los criterios.

Como se ha estipulado en el Capítulo 3, los criterios o variables pueden ser cualitativas o cuantitativas. La única variable cualitativa en MP1 es la complejidad del modo de regulación, que fue valorada de acuerdo con el Ratings presentados en la Tablas 18.

Para la valoración de las variables cuantitativas fue utilizado el método de normalización, con el cual se obtuvo el vector propio de alternativas normalizado por cada criterio. Una vez se normaliza este vector, se calcula el vector ideal con respecto a la alternativa que tenga mejor valoración del grupo de alternativas para ese criterio. Es decir, para un criterio dado, se divide el valor del vector de cada alternativa con respecto a la mejor alternativa. La mejor valoración de las alternativas corresponderá al máximo si el criterio supone que el valor máximo es el mejor y el mínimo si el criterio supone que el valor mínimo es el mejor.

Esto ha sido realizado con el fin de que, al ponderar los vectores propios de las alternativas con el vector global de los criterios, todas las alternativas se encuentren valoradas en escalas similares. En las variables cualitativas, los ratings establecen vectores de prioridad ideal y por ende para las variables cuantitativas se ha establecido el vector de prioridad ideal.

Cada uno de los modelos de bomba, supone una alternativa dada que, a su vez, genera un mayor número de alternativas dependiendo del modo de regulación evaluado. Por lo tanto, para cada alternativa, es decir para cada modelo de bomba, existen unos rangos de valoración en los que se encuentra el modelo y que vienen siendo la valoración de las diferentes alternativas de regulación que el modelo posee. Los rangos en los que cada modelo se evalúa con respecto a cada uno de los criterios se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28. Pesos de alternativas acorde a cada criterio de MP1

| Modelo Bomba | No Bombas | Complejidad | | Coste inversión | | Coste operación | | Coste Mantenimiento | |
|--------------|-----------|-------------|------|-----------------|------|-----------------|------|---------------------|------|
| | | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| B3 | 0.8 | 0.07 | 1 | 0.95 | 1 | 0.08 | 0.8 | 0.72 | 0.82 |
| B4 | 0.2 | 0.32 | 0.32 | 0.68 | 0.68 | 0.64 | 0.64 | 0.19 | 0.19 |
| B5 | 1 | 0.07 | 1 | 0.89 | 1 | 0 | 0.92 | 0.88 | 1 |
| B6 | 0 | 0.32 | 0.32 | 0.36 | 0.36 | 0.88 | 0.88 | 0 | 0 |
| B7 | 0.4 | 0.07 | 1 | 0.23 | 0.52 | 0.49 | 0.98 | 0.27 | 0.44 |
| B8 | 0 | 0.32 | 0.32 | 0 | 0 | 0.91 | 0.91 | 0 | 0 |
| B10 | 0.6 | 0.07 | 1 | 0.06 | 0.35 | 0.4 | 1 | 0.47 | 0.63 |

Para el criterio de número de bombas no se muestra un rango, pues este criterio viene siendo el mismo para todos los posibles modos de regulación que puedan surgir para cada modelo de bomba. El valor del número de bombas no cambia con la modificación del modo de regulación. Los demás criterios si presentan un rango de valoración que supone los valores mínimos y máximos encontrados con los que se ha valorado ese criterio en esa alternativa. Algunas alternativas tienen valoraciones muy dispersas con respecto a algunos criterios y en otras las valoraciones se encuentran muy cercanas. Por ejemplo, para B5 la complejidad se encuentra entre 0.89 y 1, es decir que todos los modos de regulación de esta alternativa se encuentran con una buena calificación en cuando a la complejidad del sistema de regulación. Mientras que, para esta misma alternativa, el coste de operación se encuentra entre 0 y 0.92, lo que indica que los modos de regulación valorados generan costes de operación muy dispersos entre sí.

Una vez se tienen los vectores ideales de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios, se ponderan con los pesos globales de los criterios presentados en la Tabla 15. El resultado de la ponderación de los criterios con los pesos de las alternativas define el vector jerárquico de prioridad de las alternativas. Este vector jerárquico de prioridad corresponde a una clasificación de las alternativas con respecto a una alternativa valorada como “ideal” u optima.

Este vector jerárquico que prioriza las alternativas presenta valores de jerarquía para cada alternativa con cada modo de regulación valorado. Es así como se presentan nuevamente rangos de prioridad

para cada una de las alternativas, pero ya no con respecto a cada criterio, sino un rango de prioridad total, que establece las mejores alternativas. Estos rangos de prioridad son mostrados en la Figura 42.

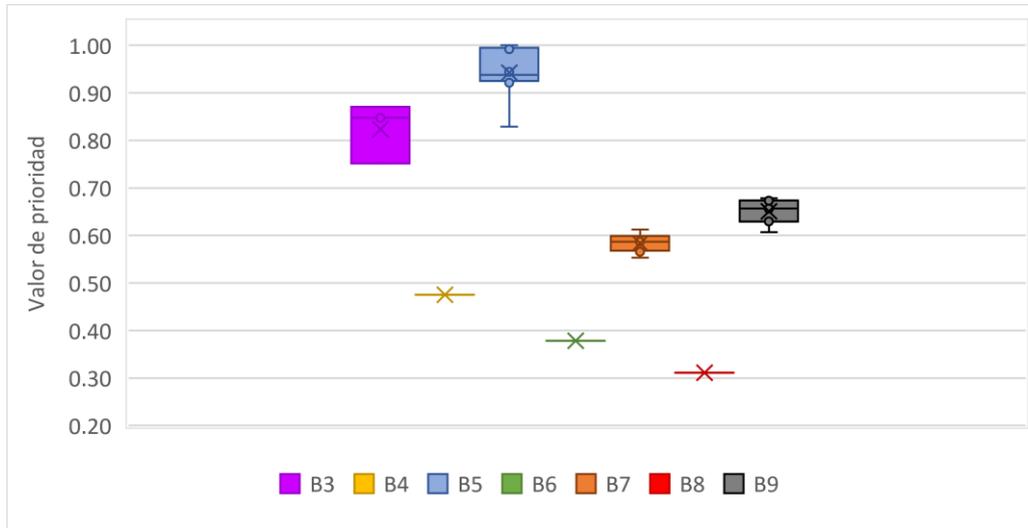


Figura 42. Resultados de jerarquización de alternativas de modelos de bombas con la MP1

En la Figura 42 se muestran las alternativas valoradas para la MP1, en la cual se puede observar que las alternativas B3 y B5 son las que presentan mejor valoración y por tanto están en cercanas a la valoración de 1, que vendría siendo la ideal. Además, son las alternativas que presentan un mayor número de soluciones con diferentes modos de regulación. Para B5 todas las soluciones planteadas con la variación de los modos de regulación se encuentran por encima del 80% de prioridad.

Hay una diferencia importante entre las alternativas que se encuentran en la parte superior cercana al valor ideal y las demás alternativas. A través de la Figura 42 puede observar claramente la diferencia con las alternativas que se encuentran en un grado de jerarquización menor, por lo cual estas con una escala baja en la priorización serían descartadas.

En la B5 las alternativas que se encuentran en el tercer cuartil tienen una valoración inferior a las alternativas de B3 que se encuentran en el primer cuartil. Por lo cual, existen alternativas de B3 con modos de regulación que pueden ser mejores que algunas de las soluciones con la variación del modo de regulación de B5.

Cada uno de los modelos de bomba, tiene una alternativa que es la que ha obtenido la mejor valoración. En la Tabla 29 se presentan las alternativas con mejor valoración para los modelos de bomba que se encuentran mejor valorados en la jerarquía.

Tabla 29. Valores de criterios en Modelos de bomba con mayor jerarquía en MP1

| Modelo Bomba | B5 | B3 |
|---------------------|-------------|-------------|
| No Bombas | 3 | 4 |
| Complejidad | 4.2. | 4.2. |
| Coste inversión | 61,796.32 € | 58,345.99 € |
| Coste operación | 16,600.16 € | 20,909.03 € |
| Coste Mantenimiento | 1,170.78 € | 1,417.45 € |

La alternativa con mayor valor en la jerarquía fue B5. El número de bombas, que es el criterio con mayor peso en esta metodología es menor que en B3. La complejidad del sistema de regulación es la misma por lo tanto no es un criterio decisivo en este caso.

Ahora bien, con respecto a los costes de inversión la B3 tiene menores costes, sin embargo, los costes de operación son superiores y este es un criterio con un peso alto en la valoración de los criterios por parte de expertos. En cuanto al coste de mantenimiento la alternativa B5 tiene menores costes, y aunque no es un criterio con un alto peso, se pudiese efectuar una alteración a la posible decisión.

Entre los posibles modos de regulación que B5 tiene, se han valorado cada una de las alternativas de B5 y se les ha otorgado un peso en la escala de jerarquía. En la Tabla 30 se presenta el peso jerárquico de cada alternativa variando la estrategia de regulación para B5 y el valor de los criterios para cada una de estas.

Tabla 30. Alternativas de modos de regulación de B5

| Solución | Prioridad ideal | Número de Bombas | n (BVV) | m (BVF) | Complejidad | Coste inversión | Coste Operación (€/año) | Coste Mantenimiento (€/año) |
|----------|-----------------|------------------|---------|---------|-------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0.829 | 3 | 0 | 3 | 1 | 53,171.57 € | 51,644.95 € | 1,010.82 € |
| 2 | 0.938 | 3 | 0 | 3 | 2.1. | 53,618.42 € | 33,574.44 € | 1,022.96 € |
| 3 | 0.944 | 3 | 0 | 3 | 2.2. | 54,949.88 € | 28,620.02 € | 1,106.42 € |
| 4 | 0.929 | 3 | 1 | 2 | 4.1. | 57,190.03 € | 28,457.46 € | 1,090.08 € |
| 5 | 0.998 | 3 | 1 | 2 | 4.2. | 58,688.70 € | 17,927.97 € | 1,148.35 € |
| 6 | 0.929 | 3 | 2 | 1 | 4.1. | 60,297.65 € | 27,359.92 € | 1,112.51 € |
| 7 | 1.000 | 3 | 2 | 1 | 4.2. | 61,796.32 € | 16,600.16 € | 1,170.78 € |
| 8 | 0.921 | 3 | 3 | 0 | 3.1. | 63,405.27 € | 27,246.72 € | 1,134.94 € |
| 9 | 0.992 | 3 | 3 | 0 | 3.2. | 64,903.94 € | 16,491.62 € | 1,193.21 € |

Como se observa en la Tabla 30 la alternativa con mayor valoración y que viene siendo la de mayor valoración en todo el conjunto de alternativas, es la señalada en rojo con una prioridad de 1, solución 7. El modo de regulación es 4.2 con 2 BVV y 1 BVF. A pesar de que el coste de inversión está entre los más altos de este conjunto de alternativas, el coste de operación es menor que las otras alternativas valoradas y hay que recordar que para los expertos este coste de operación corresponde a uno de los más importantes.

Las alternativas más económicas en los costes de inversión son las que tienen estrategias de regulación más simples. Sin embargo, los costes de operación de estas alternativas son superiores a las demás de su grupo y por esta razón no han sido las óptimas.

Adicional a esta valoración, se aprovechó el hecho de tener diferentes colectivos que valorasen las alternativas y por tanto se efectuó el proceso de AHP para el grupo de alternativas dominantes con los vectores propios de los criterios establecidos por cada uno de los colectivos consultados. Los vectores propios fueron mostrados en la Tabla 17 y con estos se obtiene la priorización de las alternativas mostrada en la Tabla 31.

Tabla 31. Valores de prioridad ideal para cada alternativa por grupo de expertos

| Modelo | Academia | Comercial | Construcción | Consultoría | Gestión | Operación | Dirección |
|--------|----------|-----------|--------------|-------------|---------|-----------|-----------|
| B3 | 0.86 | 0.92 | 0.85 | 0.87 | 0.86 | 0.89 | 0.84 |
| B4 | 0.43 | 0.64 | 0.40 | 0.47 | 0.46 | 0.34 | 0.39 |
| B5 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| B6 | 0.31 | 0.59 | 0.30 | 0.36 | 0.36 | 0.23 | 0.28 |
| B7 | 0.58 | 0.72 | 0.57 | 0.60 | 0.61 | 0.66 | 0.57 |
| B8 | 0.26 | 0.47 | 0.26 | 0.29 | 0.31 | 0.20 | 0.25 |
| B10 | 0.67 | 0.70 | 0.68 | 0.68 | 0.69 | 0.75 | 0.68 |

Como se puede observar, el modelo B5 es la alternativa óptima para todos los colectivos, y tiene sentido al ser la alternativa definida como óptima para el total de los expertos valorados. La alternativa B3 es la valorada como la siguiente en importancia para todos los grupos de expertos. En la tercera alternativa de la escala de jerarquía que es la B9 hay diferencia en los juicios de grupos de expertos, pues para el sector comercial la tercera alternativa en la jerarquía es la B7. No obstante, para el resto de las alternativas hay un consenso en la jerarquización.

Siendo la alternativa B5 la óptima según esta valoración, en la Tabla 32 se recogen los vectores de prioridad que los expertos le han dado a cada una de las soluciones de B5 con la variación del modo de regulación.

Tabla 32. Valoraciones de expertos a cada una de las soluciones del modelo 50-26/40

| Solución | Academia | Comercial | Construcción | Consultoría | Gestión | Operación | Dirección |
|----------|----------|-----------|--------------|-------------|---------|-----------|-----------|
| 1 | 0.87 | 0.65 | 0.86 | 0.87 | 0.86 | 1.00 | 0.89 |
| 2 | 0.95 | 0.86 | 0.95 | 0.96 | 0.95 | 0.92 | 0.96 |
| 3 | 0.96 | 0.89 | 0.95 | 0.96 | 0.95 | 0.85 | 0.96 |
| 4 | 0.94 | 0.88 | 0.94 | 0.94 | 0.93 | 0.80 | 0.94 |
| 5 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.80 | 1.00 |
| 6 | 0.94 | 0.88 | 0.94 | 0.94 | 0.93 | 0.80 | 0.95 |
| 7 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.80 | 1.00 |
| 8 | 0.94 | 0.87 | 0.94 | 0.93 | 0.93 | 0.80 | 0.94 |
| 9 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.80 | 1.00 |

La solución No. 7 continúa siendo la de mayor jerarquía para gran parte de los expertos excepto para los que se desempeñan en cargos de operación, quienes han denominado la mejor solución la No. 1. Si se observa la Tabla 30 la solución No. 1 tiene un bajo nivel de complejidad por lo cual para este grupo de expertos podría ser beneficioso, pues entre más sencillo sea un sistema de operar, tendrá mejores resultados para quienes laboran en este ámbito.

Es lógico que estos expertos le den mayor peso a reducir el nivel de complejidad del sistema de bombeo. Sin embargo, para todos los grupos de expertos, excepto para el operativo, la solución No. 1 es la menos óptima de todas, pues los costes de operación son excesivos y el rendimiento energético sería muy bajo.

4.3.2 Aplicación de método AHP para MP2

Para el caso de la MP2 la estructuración jerárquica corresponde a dos niveles de criterios. En el primer nivel se encuentran los factores que agrupan a criterios de segundo nivel que comparten características. En la Figura 43 se presenta la estructuración jerárquica para MP2.

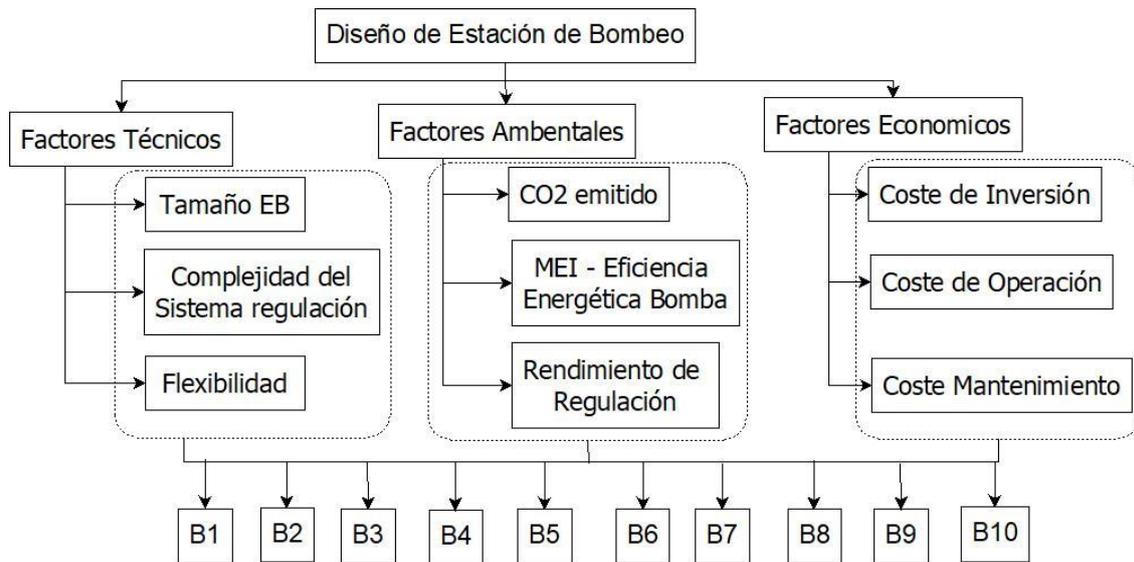


Figura 43. Estructuración jerárquica para MP2

Como se observa en la Figura 43, en MP2 ya las alternativas ya no se afectan directamente por cada uno de los criterios a valorar, sino que se afectan por la ponderación de los criterios de primer y segundo nivel. Como se ha mencionado a lo largo del documento, la agrupación de los criterios en factores permite establecer valoraciones pareadas en elementos que se encuentran cercanos y por ende se facilita al experto la comparación.

Como se ha estipulado en el Capítulo 3, las variables son cualitativas o cuantitativas, y las cualitativas son la complejidad del modo de regulación y el MEI. Para las cualitativas se usaron los Rating establecidos en las Tablas 18 y 19. Para las cuantitativas, fue utilizado el método de normalización, con el cual se obtuvo el vector propio de alternativas normalizado por cada criterio. Una vez se normaliza este vector, se calcula el vector ideal con respecto a la alternativa que tenga mejor valoración del grupo de alternativas para ese criterio. Es decir, para un criterio dado, se divide el valor del vector de cada alternativa con respecto a la mejor alternativa. La mejor valoración de las alternativas corresponderá al máximo si el criterio supone que el valor máximo es el mejor y el mínimo si el criterio supone que el valor mínimo es el mejor.

A partir de esta valoración se obtuvieron los pesos de las alternativas ideales con respecto a cada uno de los criterios, en la Tablas 33, 34 y 35 se plantean los rangos entre los que se han valorado cada uno

de los criterios para cada alternativa evaluada. Se ha dividido en tres tablas a efectos de presentación de resultados cada tabla corresponde a un grupo de factores.

Tabla 33 Pesos de alternativas para cada criterio de los factores técnicos en MP2

| Modelo Bomba | Flexibilidad | Complejidad sistema Regulación | | Tamaño EB |
|--------------|--------------|--------------------------------|-----|-----------|
| | | Min | Max | |
| B1 | 0.83 | 0.07 | 1 | 0.31 |
| B2 | 0.5 | 0.07 | 1 | 0.93 |
| B3 | 0.17 | 0.07 | 1 | 1 |
| B4 | 0.67 | 0.07 | 1 | 0.62 |
| B5 | 0 | 0.07 | 1 | 0.78 |
| B6 | 0.83 | 0.07 | 1 | 0.31 |
| B7 | 0.5 | 0.07 | 1 | 0.93 |
| B8 | 0.83 | 0.07 | 1 | 0.31 |
| B9 | 0.33 | 0.07 | 1 | 0.62 |
| B10 | 1 | 0.07 | 1 | 0 |

En cuanto a los factores técnicos se puede ver que hay una alta variación en la flexibilidad entre los modelos de bomba, lo que indica que cada modelo de bomba tiene un valor de número de bombas distinto de otro. Y el modelo B10 es el que tiene un mayor número de bombas que garantiza la flexibilidad de la EB. La complejidad es un criterio que varía de la misma forma para todos los modelos de bomba, por lo cual no efectúa una afectación importante a la hora la selección de una alternativa optima en este caso. El tamaño de la EB si varía considerablemente entre todos los modelos de bomba valorados, siendo B3 quien tiene la mayor valoración y B10 que tiene un mayor número de bombas, en el tamaño de la EB tiene una valoración baja.

Tabla 34. Pesos de alternativas para cada criterio de los factores ambientales en MP2

| Modelo Bomba | MEI | Kg CO ₂ | | Rendimiento Regulación | |
|--------------|------|--------------------|------|------------------------|-----|
| | | Min | Max | Min | Max |
| B1 | 0.05 | 0.03 | 0.85 | 0.12 | 1 |
| B2 | 0.05 | 0.36 | 0.91 | 0.05 | 1 |
| B3 | 0.07 | 0.7 | 0.97 | 0.09 | 1 |
| B4 | 0.05 | 0 | 0.92 | 0.2 | 1 |
| B5 | 0.05 | 0.77 | 1 | 0 | 1 |
| B6 | 1 | 0.51 | 0.94 | 0.13 | 1 |
| B7 | 1 | 0.69 | 0.96 | 0.08 | 1 |
| B8 | 1 | 0.44 | 0.95 | 0.17 | 1 |
| B9 | 1 | 0.72 | 0.99 | 0.06 | 1 |
| B10 | 0.05 | 0.09 | 0.93 | 0.2 | 1 |

En cuanto a los factores ambientales, se ve claramente como las alternativas que en la frontera de Pareto ya se había observado que cumplían con el MEI, en este punto tienen una alta valoración en contraste con las alternativas que tienen un MEI que no cumple con la norma. La valoración del CO₂ emitido la alternativa B9 es la que tiene menor variación en el rango, lo que indica que para esta alternativa los modos de regulación evaluados permiten que no se genere demasiada cantidad de CO₂ al año. Sin embargo, el rendimiento de regulación si tiene un alto rango de valoración para todas las alternativas, esto se debe a los modos de regulación, donde el modo de regulación 1 presenta muy bajos rendimientos y los modos de regulación que involucran BVV tienen rendimientos cercanos o iguales a 1.

Tabla 35. Pesos de alternativas para cada criterio de los factores ambientales en MP2

| Modelo Bomba | Coste inversión | | Coste operación | | Coste Mantenimiento | |
|--------------|-----------------|------|-----------------|------|---------------------|------|
| | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| B1 | 0.76 | 0.84 | 0.18 | 0.82 | 0.15 | 0.3 |
| B2 | 0.85 | 0.93 | 0.28 | 0.84 | 0.46 | 0.58 |
| B3 | 0.94 | 1 | 0.49 | 0.92 | 0.76 | 0.86 |
| B4 | 0.75 | 0.84 | 0 | 0.89 | 0.3 | 0.44 |
| B5 | 0.94 | 1 | 0.44 | 0.95 | 0.91 | 1 |
| B6 | 0.5 | 0.68 | 0.65 | 0.98 | 0.15 | 0.3 |
| B7 | 0.6 | 0.76 | 0.72 | 0.99 | 0.46 | 0.58 |
| B8 | 0.3 | 0.49 | 0.58 | 1 | 0.15 | 0.3 |
| B9 | 0.52 | 0.66 | 0.66 | 1 | 0.6 | 0.72 |
| B10 | 0 | 0.26 | 0.34 | 0.98 | 0 | 0.16 |

En cuanto a los factores económicos, las alternativas B3 y B5 son las que tienen mejor valoración para los costes de inversión. Sin embargo, también presentan bajas valoraciones en los costes de operación. Con respecto a los costes de operación las alternativas que tienen las soluciones con mejor valoración son la B8 y la B9. En cuanto a los costes de mantenimiento el modelo de bomba B5 presenta los menores costes de mantenimiento dentro de sus soluciones establecidas con los diferentes modos de regulación. En los criterios que no dependen del modo de regulación sino del modelo de bomba como el número de bombas y el MEI solo se muestra un valor y no un rango.

Una vez se tienen los vectores ideales de las alternativas con respecto a cada uno de los criterios, se ponderan con los pesos globales de los criterios presentados en la Tabla 16. El resultado de la ponderación de los criterios con los pesos de las alternativas define el vector jerárquico de prioridad de las alternativas. Este vector jerárquico de prioridad corresponde a una clasificación de las alternativas con respecto a una alternativa valorada como optima.

Este vector jerárquico que prioriza las alternativas presenta valores de jerarquía para cada alternativa con cada modo de regulación valorado. Es así como se presentan nuevamente rangos de prioridad para cada una de las alternativas, pero ya no con respecto a cada criterio, sino un rango de prioridad total, que establece las mejores alternativas. Estos rangos de prioridad son mostrados en la Figura 44.

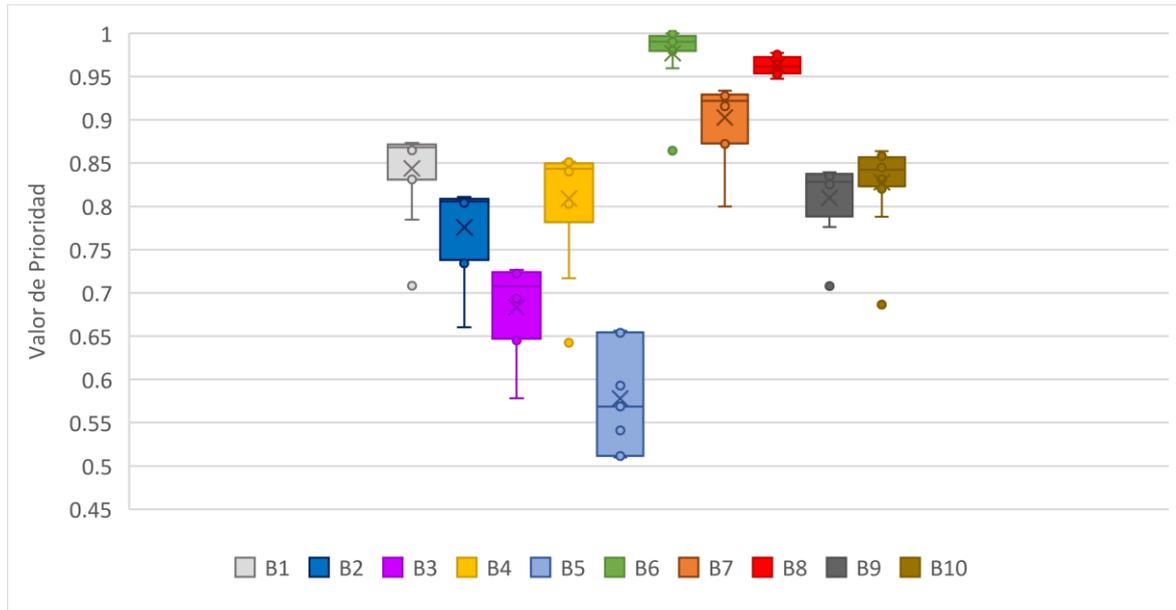


Figura 44. Resultados de jerarquización de alternativas de modelos de bombas con la MP2

En la Figura 44 se muestra el comportamiento de la jerarquización de las alternativas para la MP2, en este caso había un mayor número de modelos a valorar que en la MP1. Para este caso se puede observar que hay dos modelos con mejores resultados que son: B6 y B8 y se encuentran cercanos a 1, el modelo B7 se encuentra cercano a estas alternativas también, aunque con valores de jerarquización por debajo de estas.

Como se puede observar, tanto para la B6 como al B8, independientemente del modo de regulación, la mayor parte sus soluciones se encuentran valoradas con una alta escala de prioridad y por tanto estas alternativas son óptimas e independiente del modo de regulación seleccionados siempre estarán en un rango alto de jerarquía con respecto a los criterios establecidos en esta metodología.

Pueden existir soluciones en el tercer cuartil de la B6 que tengan una valoración inferior a algunas soluciones del primer cuartil de B8 y esto dependerá de los modos de regulación que se hayan valorado. Esto se debe a que los rangos dentro del diagrama corresponden a la prioridad que se le da a cada modelo de bomba con diferentes modos de regulación y variando la estrategia de regulación cambiando el número de BVF y BVV, cuando existe un modo de regulación 4.1 o 4.2.

Estas variaciones muestran distintas soluciones para un mismo modelo de bomba, es decir, se pueden encontrar mejores soluciones con distintos modos de regulación en el grupo del modelo B6 antes de encontrar jerárquicamente la alternativa óptima del grupo del modelo B8, así como podría haber soluciones del modelo B8 mejores que algunas soluciones dentro del modelo B6.

También es posible observar que B6 tiene una alternativa con un valor atípico alejado del resto de las alternativas que se encuentran cercanas a 1 en la escala de valoración. Cada uno de los modelos de bomba, tiene una alternativa que es la que ha obtenido la mejor valoración. En la Tabla 36 se presentan las alternativas con mejor valoración para los modelos de bomba que se encuentran mejor valorados en la jerarquía.

Tabla 36. Valores de criterios en Modelos de bomba con mayor jerarquía en MP2

| Modelo Bomba | B6 | B8 | B7 |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Flexibilidad | 8 | 8 | 6 |
| n BVV | 1 | 1 | 0 |
| m BVF | 7 | 7 | 6 |
| Complejidad sistema Regulación | 4.2. | 4.2. | 1 |
| Tamaño EB | 173 | 173 | 144 |
| MEI | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| Kg CO ₂ | 297,799 | 251,796 | 876,161 |
| Rendimiento Regulación | 1.00 | 1.00 | 0.54 |
| Coste inversión | 124,428.33 € | 162,719.68 € | 102,674.33 € |
| Coste operación | 15,667.20 € | 14,273.08 € | 32,972.92 € |
| Coste Mantenimiento | 2,512.72 € | 2,512.72 € | 1,823.27 € |

En la MP2 la alternativa con mayor valoración jerárquica es B6. El número de bombas en este caso se considera mejor, en cuanto mayor sea, por tanto, la alternativa optima tiene un número de bombas 8 que le da una valoración positiva en este criterio, que también ha obtenido un alto peso de acuerdo con el juicio de los expertos.

El modo de regulación de la alternativa optima es 4.2 por lo cual indica la combinación de BVV+BVF, es importante recordar que las BVV trabajan a la misma velocidad de giro siempre, por lo cual su rendimiento es el mismo, en futuros desarrollos podría valorarse la variación de la velocidad de giro para cada BVV buscando valorar la eficiencia energética con estrategias diferentes.

La alternativa que se encuentra en la posición 3 de jerarquía B7 tiene un modo de regulación de 1 con 6 BVF funcionando al tiempo, es curioso que esta alternativa sea la número 3 en jerarquía, lo que podría deberse a sus costes bajos de inversión. Sin embargo, sigue teniendo criterios con valores muy alejados de lo que se busca como óptimo, como el caso de los costes de operación que duplica los de B6 y B8.

Cuando se evalúa el mismo modo de regulación, que solo varía el número de BVF y BVV los criterios técnicos para un modelo de bomba serán iguales en todas las soluciones planteadas, por lo que finalmente lo que afectaría el proceso de decisión serán los otros factores, económicos y ambientales para priorizar la alternativa.

En la Tabla 37 se plantean los resultados de los factores técnicos para las diferentes soluciones con estrategias de regulación para el modelo de bomba B6 que corresponde a la alternativa optima. En la Tabla 38 se presentan los resultados para los factores ambientales para las diferentes soluciones con estrategias de regulación para el modelo de bomba B6. Y finalmente en la Tabla 39 se plantean los resultados para los factores económicos de esta solución.

Tabla 37. Resultados de B6 para diferentes estrategias de regulación para factores técnicos

| Solución | Prioridad ideal | Flexibilidad | n (BVV) | m (BVF) | Complejidad | Tamaño EB (m2) |
|----------|-----------------|--------------|---------|---------|-------------|----------------|
| 1 | 0.99 | 8 | 0 | 8 | 1 | 172.8 |
| 2 | 0.96 | 8 | 0 | 8 | 2.2. | 172.8 |
| 3 | 0.86 | 8 | 1 | 7 | 4.1. | 172.8 |
| 4 | 1.00 | 8 | 1 | 7 | 4.2. | 172.8 |
| 5 | 1.00 | 8 | 2 | 6 | 4.2. | 172.8 |
| 6 | 1.00 | 8 | 3 | 5 | 4.2. | 172.8 |
| 7 | 0.99 | 8 | 4 | 4 | 4.2. | 172.8 |
| 8 | 0.99 | 8 | 5 | 3 | 4.2. | 172.8 |
| 9 | 0.99 | 8 | 6 | 2 | 4.2. | 172.8 |
| 10 | 0.98 | 8 | 7 | 1 | 4.2. | 172.8 |
| 11 | 0.98 | 8 | 8 | 0 | 3.2. | 172.8 |

Como puede observarse las soluciones 4, 5 y 6 son las que presentan el vector de prioridad ideal mayor entre el grupo de alternativas posibles de B6. La estrategia de regulación es la misma para estas dos alternativas y por esto el tamaño y la flexibilidad son los mismos, los únicos parámetros que varían son el número de BVV y BVF. A continuación, se presentan los resultados para los factores ambientales.

Tabla 38. Resultados de B6 para diferentes estrategias de regulación para factores ambientales

| Solución | Prioridad ideal | MEI | CO ₂ | Rend. regulación |
|----------|-----------------|-----|-----------------|------------------|
| 1 | 0.99 | 0.7 | 1,317,900 | 0.56 |
| 2 | 0.96 | 0.7 | 325,185 | 0.72 |
| 3 | 0.86 | 0.7 | 533,426 | 0.61 |
| 4 | 1.00 | 0.7 | 297,799 | 1.00 |
| 5 | 1.00 | 0.7 | 285,516 | 1.00 |
| 6 | 1.00 | 0.7 | 281,752 | 1.00 |
| 7 | 0.99 | 0.7 | 281,078 | 1.00 |
| 8 | 0.99 | 0.7 | 280,841 | 1.00 |
| 9 | 0.99 | 0.7 | 280,823 | 1.00 |
| 10 | 0.98 | 0.7 | 280,811 | 1.00 |
| 11 | 0.98 | 0.7 | 280,802 | 1.00 |

En cuanto a los factores ambientales, las soluciones 4, 5 y 6 presentan un MEI con una valoración que es no solo aceptada por la UE 547/2012, sino considerada como un modelo de bomba con alta eficiencia energética. Además, la estrategia de regulación permite que el rendimiento de regulación sea del 100% y que las emisiones de CO₂ se encuentren entre las mínimas. Sin embargo, hay una variación entre las emisiones de CO₂ de la solución 4, 5 y 6, donde la solución 6 muestra que sus

emisiones son menores a la solución 5 y la solución 4 es la que genera mayores emisiones de CO₂. A continuación se detallan los factores económicos.

Tabla 39. Resultados de B6 para diferentes estrategias de regulación para factores económicos

| Solución | Prioridad ideal | Coste inversión | Coste Operación (€/año) | Coste Mantenimiento (€/año) |
|----------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | 0.99 | 117,849 € | 37,154 € | 2,375 € |
| 2 | 0.96 | 119,627 € | 18,119 € | 2,471 € |
| 3 | 0.86 | 122,930 € | 23,084 € | 2,454 € |
| 4 | 1.00 | 124,428 € | 15,667 € | 2,513 € |
| 5 | 1.00 | 128,598 € | 14,711 € | 2,535 € |
| 6 | 1.00 | 132,769 € | 14,447 € | 2,558 € |
| 7 | 0.99 | 136,939 € | 14,412 € | 2,580 € |
| 8 | 0.99 | 141,109 € | 14,401 € | 2,602 € |
| 9 | 0.99 | 145,279 € | 14,401 € | 2,625 € |
| 10 | 0.98 | 149,449 € | 14,401 € | 2,647 € |
| 11 | 0.98 | 153,619 € | 14,400 € | 2,670 € |

Como se puede observar las tres soluciones con mayor valoración en la prioridad no tienen los costes de inversión más bajos entre el total de las alternativas. La solución 6 tiene costes de operación menores a la solución 5 y la solución 4 tiene un mayor coste de operación que las otras dos soluciones óptimas. Adicionalmente, hay algunas soluciones que tienen menores costes de operación que estas dos seleccionadas. En cuanto a los costes de mantenimiento, la solución 4 presenta menos costes anuales de mantenimiento que las otras soluciones, no obstante, la diferencia no es exagerada.

Para el caso de este grupo de soluciones se han encontrado tres estrategias de solución óptimas. Sin embargo, la que posee criterios que van acorde a lo que realmente se busca es la solución 6, que tiene costes de operación más bajos y menores emisiones de CO₂. Es por tanto que con esta metodología la solución de EB sería la 6 con el modelo de bomba B6 y modo de regulación 4.2 con 3 BVV y 5 BVF.

4.4 Comparativa entre resultados de MP1 y MP2

Si se comparan los resultados de la MP1 con la MP2, se puede observar que todos los modelos que la MP1 ha entrado a valorar después de establecer la dominancia son también valorados en la MP2. No obstante, los modelos que son prioritarios en la MP1, tienen baja jerarquización en la MP2. En la Tabla 40 se presentan los valores de las alternativas óptimas para la MP1 sobre los criterios de la MP2.

Tabla 40. Alternativas Optimas MP1 con criterios de MP2

| Modelo Bomba | B5 | B3 |
|--------------------------------|-------------|-------------|
| Flexibilidad | 3 | 4 |
| n BVV | 2 | 1 |
| m BVF | 1 | 3 |
| Complejidad sistema Regulación | 4.2. | 4.2. |
| Tamaño EB | 151 | 141 |
| MEI | 0.1 | 0.1 |
| Kg CO ₂ | 133,906 | 226,955 |
| Rendimiento Regulación | 1.00 | 1.00 |
| Coste inversión | 61,796.32 € | 58,345.99 € |
| Coste operación | 16,600.16 € | 20,909.03 € |
| Coste Mantenimiento | 1,170.78 € | 1,417.45 € |

En este caso hay dos criterios principalmente que podrían haber incurrido en que estas alternativas fuesen jerarquizadas en baja categoría en la MP2. Uno es la flexibilidad, en la MP1 juega un papel importante el número de bombas, al igual que en la MP2, pero de manera inversa. A menor número de bombas, en la MP1 el criterio se considera una valoración positiva, mientras que cuando se habla de flexibilidad, se habla de un mayor número de bombas. Este es un criterio con alto peso en el vector global de los juicios de expertos, por lo cual pudo ser fuertemente afectado en el proceso decisivo con AHP.

El otro criterio que pudo haber sido decisivo es el MEI, pues estas bombas tienen un bajo valor del índice de eficiencia energética, lo que hace que no sean optimas energéticamente en su operación. El MEI es un valor, que, aunque no tiene un alto peso en el vector propio de los expertos, puede haber jugado un factor decisivo en este proceso de selección. Esto denota que es necesaria la inclusión de criterios de carácter ambiental que permitan establecer las condiciones de eficiencia energética con las que se deseen operar los sistemas de bombeo.

Finalmente, la alternativa B6 seleccionada con la MP2 tiene unos valores de criterios que son aceptables y pueden llegar a considerarse como realmente la mejor entre el conjunto de alternativas valoradas. Siempre quien toma la decisión final debe igual evaluar las posibilidades de estas alternativas y dependiendo de las condiciones del proyecto, tomar la decisión final, pero este proceso le permite ajustar las posibles soluciones que pueda tener.

Una vez efectuado el proceso de AHP, se realiza un análisis de sensibilidad variando los equipos de regulación a utilizar, al hacer este cambio, las alternativas siguen estando en la misma posición de jerarquización y la prioridad de cada uno de los modelos siguen establecidos en los mismos valores, por lo cual la distribución de las alternativas con respecto a la óptima sigue siendo igual.

4.5 Diseño de estación de bombeo con el método tradicional

En el método de diseño tradicional se define en primera instancia el número de bombas y a partir de definir este número se consulta una base de datos de bomba con el cual se selecciona el modelo.

Por tanto, considerando el caudal máximo del sistema de abastecimiento de 51.4l/s, y la curva de consigna definida en la ecuación 38, se establece un número de 4 bombas para el diseño, con lo cual, el caudal a valorar será 12.85l/s y la altura de bombeo será 79.2m. con este caudal y esta altura se evalúa el modelo de bomba en un catálogo de un fabricante de bombas homologadas y se selecciona el grupo de bombas que se ajuste a las condiciones de presión y caudal.

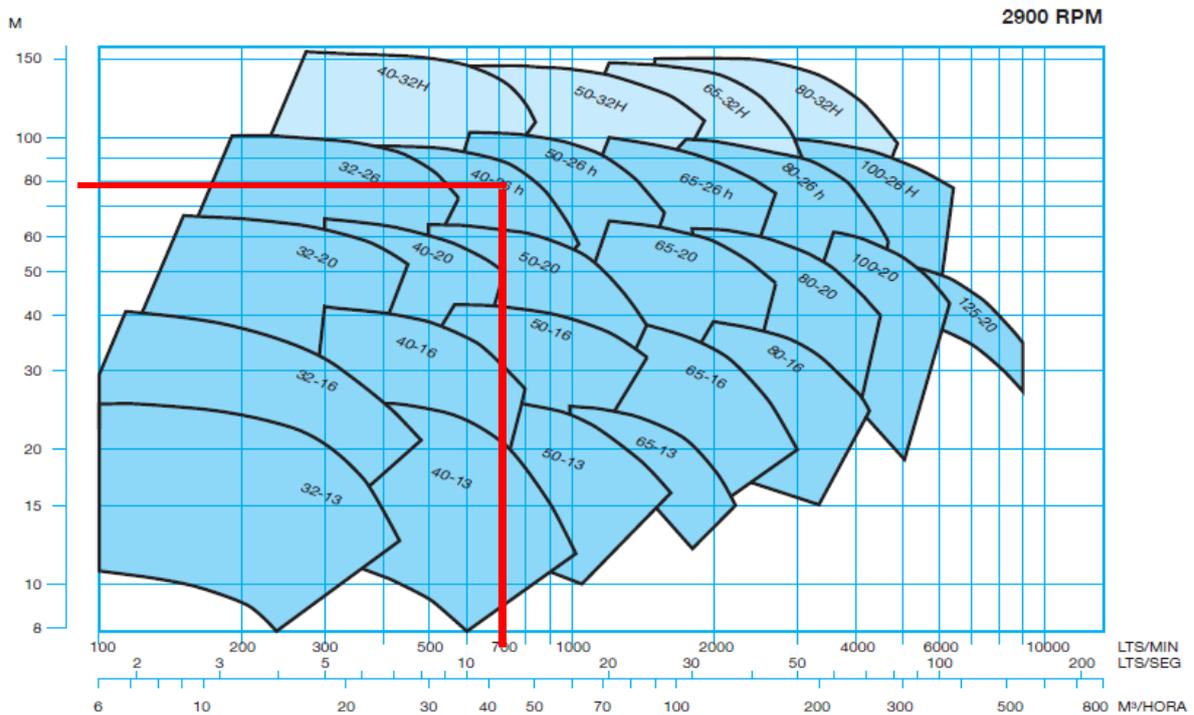


Figura 45. Conjuntos de modelos de bomba a valorar con las condiciones de altura y caudal del sistema de abastecimiento

Con este catálogo de bombas, se obtiene que la bomba que mejor se ajusta a las condiciones del sistema de abastecimiento es la 40-26, por lo cual se evalúa en la Figura 46 la curva de esta bomba, pues las condiciones de bombeo se ubican en la zona útil de acuerdo con la Figura 45.

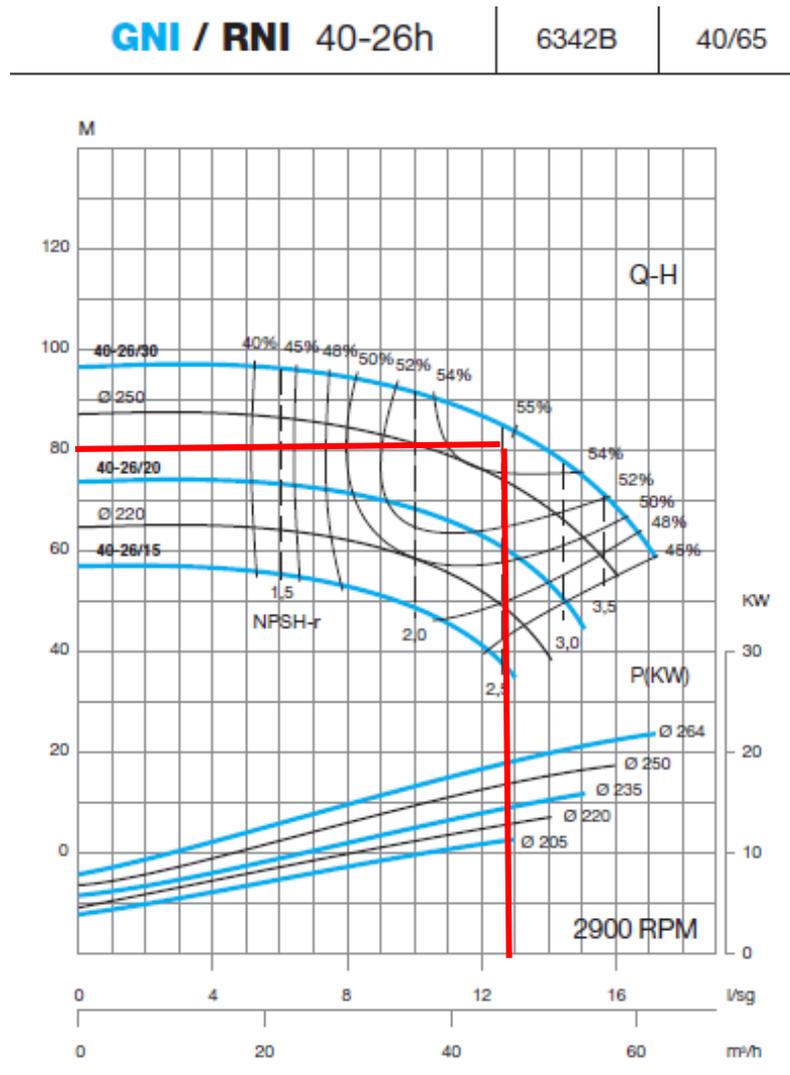


Figura 46. Curva del Modelo de bomba 40-26

Según la Figura 46 el modelo que mejor se ajusta es 40-26/30, que según la Tabla 22 corresponde a B3. Una vez definido el modelo de bomba y el número de bombas se evalúan los modos de regulación. Para La asignación del modo de regulación se estudiarán todos los modos de regulación posibles para este modelo, con lo cual se evalúan los modos de regulación de 1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1 y 4.2 el modo de regulación 2.1 no fue valorado debido a que no garantiza recubrimiento entre los arranques y paros de una bomba a otra. Los modos de regulación 4.1 y 4.2 fueron valorados variando el número de BVV y BVF, por lo cual se obtuvieron 12 posibles soluciones finales.

Una vez evaluados los modos de regulación y con base en los procedimientos descritos en el Capítulo 3, se calculan los costes para cada una de las posibles soluciones, con los cuales se efectúa una valoración económica, los resultados de los costes son presentados en la Tabla 41.

Tabla 41. Soluciones variando modo de regulación para el modelo B3

| Solución | Complejidad | n BVV | m BVF | Coste inversión (€) | Coste operación (€/año) | Coste mantenimiento (€/año) |
|----------|-------------|-------|-------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1 | 0 | 4 | 53,506.52 € | 48,413.19 € | 1,279.92 € |
| 2 | 2.1. | 0 | 4 | 54,511.93 € | 35,336.93 € | 1,298.13 € |
| 3 | 2.2. | 0 | 4 | 55,284.84 € | 27,681.52 € | 1,375.53 € |
| 4 | 4.1. | 1 | 3 | 56,847.31 € | 31,436.84 € | 1,359.18 € |
| 5 | 4.2. | 1 | 3 | 58,345.99 € | 20,909.03 € | 1,417.45 € |
| 6 | 4.1. | 2 | 2 | 59,277.26 € | 30,664.79 € | 1,381.61 € |
| 7 | 4.2. | 2 | 2 | 60,775.94 € | 19,073.49 € | 1,439.88 € |
| 8 | 4.1. | 3 | 1 | 61,707.22 € | 30,418.09 € | 1,404.04 € |
| 9 | 4.2. | 3 | 1 | 63,205.89 € | 18,965.95 € | 1,462.31 € |
| 10 | 3.1. | 4 | 0 | 64,137.17 € | 30,370.66 € | 1,426.47 € |
| 11 | 3.2. | 4 | 0 | 65,635.84 € | 18,962.69 € | 1,484.74 € |

Una vez obtenidos los costes de cada una de las posibles soluciones, se efectúa una valoración económica. Como primera instancia se descartaron las soluciones que estuvieran dominadas por otras, por lo cual solo quedaron las soluciones a valorar presentadas en la Tabla 42.

Tabla 42. Soluciones para valoración económica

| Solución | Complejidad | n BVV | m BVF | Coste inversión (€) | Coste operación (€/año) | Coste mantenimiento (€/año) |
|----------|-------------|-------|-------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 2 | 2.1. | 0 | 4 | 54,511.93 € | 35,336.93 € | 1,298.13 € |
| 3 | 2.2. | 0 | 4 | 55,284.84 € | 27,681.52 € | 1,375.53 € |
| 5 | 4.2. | 1 | 3 | 58,345.99 € | 20,909.03 € | 1,417.45 € |
| 7 | 4.2. | 2 | 2 | 60,775.94 € | 19,073.49 € | 1,439.88 € |
| 9 | 4.2. | 3 | 1 | 63,205.89 € | 18,965.95 € | 1,462.31 € |
| 11 | 3.2. | 4 | 0 | 65,635.84 € | 18,962.69 € | 1,484.74 € |

Para efectuar la valoración económica se hará uso del VPN y para ello se requiere calcular el Factor de Valor Presente (FVP) definido en la ecuación 13. Y tomando como base una tasa de interés de 3% anual correspondiente al año 2020 según Banco de España (2020). El FVP fue calculado para un periodo de 10 años, obteniéndose un FVP de 8.53.

Una vez obtenido el FVP se calcula el VPN correspondiente con la ecuación 11 para un tiempo de 10 años y se toma como referencia la alternativa de EB más económica (solución 2), es decir la que tenga menores costes de inversión para efectuar el cálculo del VPN. Asimismo, se calculó el TRC que se valora con la ecuación 16. Los resultados de esta valoración económica se muestran en la Tabla 43.

Para este caso, se consideró que los gastos corresponden a la inversión inicial y los costes de mantenimiento y los beneficios corresponden al ahorro en costes de operación que de una alternativa a otra se puedan llegar a tener. Así las cosas, los resultados de la valoración económica del proyecto con respecto a la alternativa más económica se presentan en la Tabla 43.

Tabla 43. Valoración económica respecto a solución con costes de inversión más bajos (solución 2)

| Solución | TRC | VPN10 |
|----------|------|--------------|
| 3 | 0.23 | 62,863.64 € |
| 5 | 0.54 | 114,164.95 € |
| 7 | 0.82 | 124,150.52 € |
| 9 | 1.14 | 119,395.89 € |
| 11 | 1.47 | 113,751.74 € |

Cuando se valoran las alternativas con respecto a la alternativa más económica en términos de coste de inversión, se encuentra que la alternativa que retorna a capital en menos tiempo es la No.3. Sin embargo, es la de menor VPN lo que indica que el ahorro en gastos energéticos con respecto a la alternativa más económica no es lo suficiente para establecer esta alternativa como la mejor valorada económicamente. Por lo tanto, se procede a comparar las alternativas con respecto a la alternativa 3. Los resultados de esta valoración se encuentran en la Tabla 44.

Tabla 44. Valoración económica respecto a solución 3

| Solución | TRC | VPN10 |
|----------|------|-------------|
| 5 | 0.90 | 51,301.30 € |
| 7 | 1.34 | 61,286.87 € |
| 9 | 1.94 | 56,532.25 € |
| 11 | 2.55 | 50,888.10 € |

Cuando se evalúan las alternativas con respecto a la solución 3, se encuentra que la alternativa con TRC menor es la 5 y, aunque no es la que tenga el mayor VPN, los VPN no están muy distantes entre las soluciones. La solución 11 está dando luces de que su TRC es muy alto y por lo cual tardaría mucho tiempo en recuperarse la inversión. La solución 7 es la que mayor VPN presenta y el TRC no es muy elevado, por tanto, se comparan las alternativas con respecto a la solución 5, los resultados se consignan en la Tabla 45.

Tabla 45. Valoración económica respecto a solución 5

| Solución | TRC | VPN10 |
|----------|------|------------|
| 7 | 2.95 | 9,985.57 € |
| 9 | 5.51 | 5,230.95 € |
| 11 | 8.17 | -413.20 € |

Como ya se entreveía, la solución 7 es la que presenta el mayor VPN, con un tiempo de retorno a capital de 2.95 si se compara con la solución 5 y tendría menor TRC si esta solución se compara con las otras. Como ya se veía la alternativa 11 para un periodo de 10 años no es rentable.

De acuerdo con el método tradicional y la valoración económica efectuada, la solución obtenida sería la 7 que corresponde al modelo de bomba B3 con un modo de regulación 4.2 con 2 BVV y 2BVF y los costes asociados en la Tabla 42.

4.6 Comparativa del diseño entre el método tradicional y el AHP

De acuerdo con la valoración económica previamente realizada, con el método tradicional la mejor opción vendría siendo el modelo de bomba B3 con modo de complejidad 4.2. Cuando se valoró esta alternativa por medio del método AHP y los criterios establecidos, en la MP1 esta alternativa fue dominada en la frontera de Pareto y ni siquiera llegó a ser parte del estudio mediante AHP. En la MP2 se encontró en un rango entre con una valoración 0.72. Esto indica que esta alternativa no garantiza a cabalidad alguno de los criterios establecidos. En la Tabla 46 se presenta esta alternativa B3 con la solución del modo de complejidad 4.2 con los criterios valorados para la MP2

Tabla 46. Alternativa definida por método tradicional con los valores de criterios del AHP Comparada con la seleccionada con MP1 y MP2.

| Modelo Bomba | B3 | B5 | B6 |
|--------------------------------|-------------|-------------|--------------|
| Flexibilidad | 4 | 3 | 8 |
| n BVV | 2 | 2 | 3 |
| m BVF | 2 | 1 | 5 |
| Complejidad sistema Regulación | 4.2. | 4.2. | 4.2. |
| Tamaño EB | 140.8 | 151.2 | 172.8 |
| MEI | 0.1 | 0.1 | 0.7 |
| Kg CO ₂ | 210,247 | 133,906 | 281,752 |
| Rendimiento Regulación | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Coste inversión | 60,775.94 € | 61,796.32 € | 132,768.55 € |
| Coste operación | 19,073.49 € | 16,600.16 € | 14,446.99 € |
| Coste Mantenimiento | 1,439.88 € | 1,170.78 € | 2,557.58 € |

Al comparar las alternativas seleccionadas por los tres métodos se puede observar la que garantiza la flexibilidad definitivamente es la B6 que tiene un mayor número de bombas a instalar. El modo de regulación 4.2 siempre se encuentra entre las soluciones optimas, esto debido al ahorro energético que su implantación puede llegar a generar. En cuanto al tamaño de la EB es lógico que la B6 sea mayor pues tiene un mayor número de bombas.

Al evaluar los factores ambientales se observa claramente como las soluciones obtenidas por los métodos donde no se contempla la eficiencia energética de la bomba no cumplen con esta condición y se encuentran en un valor de MEI inferior al requerido por la normativa UE 547/2012.

En cuanto a los costes de inversión la B6 al contemplar un mayor número de bombas, tiene un mayor valor. Sin embargo, al evaluar los costes de operación el ahorro es claro con respecto a la solución obtenida por el método tradicional. Y en cuanto a los costes de mantenimiento, estos son más elevados en la B6 también debido al número de bombas y la cantidad de elementos de regulación que se requieren.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

A partir del desarrollo de este documento, se han obtenido las conclusiones que a continuación se detallan:

- El AHP es un modelo de decisión multicriterio que permite la toma de decisiones en problemas complejos como el diseño de una estación de bombeo para abastecimiento, que, por su naturaleza, contempla diferentes aspectos que deben ser valorados a la hora de establecer un diseño que se ajuste a distintos requerimientos.
- Los criterios valorados obedecen a una serie de requerimientos planteados de forma paramétrica, sin embargo, en los procesos de diseño en ocasiones se tienen restricciones con algunos criterios y pueden requerirse otros criterios de valoración, es por tanto que siempre que se plantee un nuevo proyecto se evalúen las restricciones de los criterios definidos o se establezcan nuevos criterios de ser necesario.
- Durante el desarrollo de este trabajo se evidenció que la inclusión de criterios de carácter ambiental para la valoración de alternativas con miras al enfoque de eficiencia energética no solo es necesario ambientalmente, sino que esto repercute en ahorros energéticos y por tanto en ahorros de costes de operación.
- Este tipo de herramientas permite que el número de alternativas posibles de solución de diseño de una EB se reduzca para quien tome las decisiones y pueda valorar las alternativas objetivamente, sin embargo, el análisis de decisión multicriterio no reemplaza el criterio del diseñador y es necesario que siempre se tenga una mirada crítica a los resultados obtenidos.
- El ponderar los juicios de los expertos con la inversa del análisis de consistencia permite una solución al problema de consistencia y con el cual se generan diversos problemas al descartar los juicios que los expertos otorgan para un objetivo dado. Para esta metodología planteada los juicios ponderados con la inversa de la razón de consistencia permitieron tener en cuenta la valoración de todos los expertos.
- Durante el desarrollo de este documento se evidenció la importancia de la determinación del número de bombas. Encontrándose que el fijar el número de bombas arbitrariamente conlleva a incurrir en sobrevaloración de costes de inversión o costes de operación que pudiesen haber sido de menor cuantía si se hubiese fijado un número de bombas diferente.
- Se encontró que a mayor número de criterios valorados, se dificulta la ejecución del algoritmo de dominancia de la frontera de Pareto, por lo que es necesario que siempre que se efectúe la frontera de Pareto ya se haya garantizado la viabilidad del modelo de bomba para evitar que estos modelos pasen la frontera.

5.2 Desarrollos futuros

Algunos temas relacionados con este documento permiten definir líneas de investigación posteriores, a continuación, se detallan algunos desarrollos de investigación que se pueden llevar a cabo después de este trabajo:

- Es necesario ampliar la investigación sobre los juicios de valor de la escala de Saaty entre ingenieros que puedan estar acostumbrados a otorgar estos juicios de valor a medidas tangibles, adicionalmente estudiar la posibilidad de usar otro tipo de alternativas para el análisis de decisión multicriterio que puedan ajustarse a la estructura de pensamiento del ingeniero a través de medidas tangibles.
- Es posible que para futuros desarrollos se incluya la bomba de reserva como un criterio de diseño debido a que no todas las EB cuentan con una y puede ser garantía de fiabilidad o no, que depende de las preferencias de quien diseña.
- Existen diferentes formas en las que se pueden valorar las alternativas y es necesario que se amplíe el campo de investigación para establecer los modelos de valoración de alternativas de EB que mejor se ajusten a los diferentes requerimientos de las variables definidas.

5.3 Indicios de calidad

El presente documento tiene los indicios de calidad que se detallan a continuación:

- La metodología para el diseño de EB con MP2 ha sido aprobada para presentarse en el 24TH *International Congress On Project Management and Engineering* de AEIPRO, que será llevado a cabo el 7 de julio de 2020 en Alcoy. El título del artículo es *Metodología para la selección de soluciones de diseño de estaciones de bombeo derivadas de la aplicación de algoritmos de optimización*.
- A partir de este trabajo se está redactando un documento para presentar a la revista *Journal of Water Resources Planning and Management*.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Abbass, H., Sarker, R., & Newton, C. (2001). A Pareto-frontier differential evolution approach for multi-objective optimization problems. *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC, 2*, 971–978. <https://doi.org/10.1109/cec.2001.934295>
- Acosta Ríos, M., Díaz Pacheco, R., & Anaya Salazar, Á. (2009). Revisión de técnicas de análisis de decisión multicriterio (múltiple criteria decisión analysis- MCDA) como soporte a problemas complejos: Pronósticos de demanda. *Guillermo de Ockham: Revista Científica*, 7(2), 91–110. <https://doi.org/10.21500/22563202.547>
- Antón Piera, P. (2019). *Desarrollo de una Metodología de diseño de estaciones de bombeo para redes de distribución de agua basada en la optimización de costes y la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Aplicación a una ciudad de 30.000 habitantes y cuatro fuentes de*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Arango Gil, F. (2018). *Metodología Para Proyectos De Estaciones De Bombeo Directo a La Red Considerando La Estrategia De Regulación*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Banco de España. (2020). Tablas Tipos de Interés legal. Retrieved May 4, 2020, from https://clientebancario.bde.es/pcb/es/menu-horizontal/productoservici/relacionados/tiposinteres/guia-textual/tiposinteresrefe/Tabla_tipos_de_interes_legal.html
- BID. (2011). Evaluación para sistemas de bombeo de agua: Manual de mantenimiento. In *Iniciativa de Agua y Saneamiento*. Retrieved from <https://publications.iadb.org/handle/11319/2723>
- Cámara de comercio de España. (2019). *La Circularidad del agua*. Madrid.
- Comision Europea. *UE 547/2012*. , Pub. L. No. 547, 2012 28 (2012).
- CONTHIDRA. (2019). *Tarifa de Precios septiembre 2019* (pp. 1–40). pp. 1–40. Sevilla, España.
- Cordoba Zatarain, M. (2012). *Las empresas comercializadoras de electricidad en España*. Universidad de Cantabria.
- ENDESA. (2020). Tarifa eléctrica Optima. Retrieved from <https://www.endesa.com/es/empresas/luz/tarifa-optima>
- Farnell. (2020). PLC. Retrieved February 11, 2020, from <https://es.farnell.com/c/automatizacion-control-de-procesos/controladores-programadores-e-indicadores-de-procesos/controladores-logicos-programables-plc-/plcs-de-entrada-salida-digital>
- Fuertes, V. S., Iglesias, P. L., Izquierdo, J., López, P. A., López, G., Martínez, J., & Pérez, R. (2003). Ingeniería hidráulica en los abastecimientos de agua. In Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos (Ed.), *GMMF-UPV*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- González Fernandez, F. J. (2015). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado* (5th ed.; Fundación Confemetal, Ed.). Madrid.

- Greco, S., Ehgott, M., & Figueira, J. R. (2016). Multiple Criteria Decision Analysis, State of the Art Surveys. In Springer (Ed.), *International Series in Operations Research and Management Science* (2nd ed., Vol. 233). https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4_21
- Guyer, J. P. (2012). Introduction to pumping stations for water supply systems. In *Continuing Education and Development*. Stony Point, NY.
- IDEAL. (2018). *Bombas IDEAL serie RNI - GNI* (p. 64). p. 64. Retrieved from <https://www.bombasideal.com/wp-content/uploads/2018/11/400-CAT-RNI-GNI-50-60-Hz-D-081018.pdf>
- Iglesias Rey, P. L., Martínez Solano, F. J., Arango Gil, F., & Lozano cortés, J. (2018). Methodology for the selection of pumping stations considering its mode of operation. *IPWE*, 13.
- Ingenieros C.Y.P.E. (2017). *Generador de precios de la construcción*. España.
- Jefatura del estado. *Ley 54/1997*. , Pub. L. No. 54 (1997).
- Jefatura del estado. *Ley 24/2013*. , Pub. L. No. 24 (2013).
- Jefatura del estado. *Real Decreto - Ley 1/2019*. , Pub. L. No. 1 (2019).
- León Celi, C. F., Iglesias Rey, P. L., & Martínez Solano, F. J. (2017). Optimización de COSTEs de bombeo en redes de distribución de agua con capacidad de almacenamiento mediante el uso del concepto de curva de consigna. *Jornadas de Ingeniería Del Agua*, 1–9.
- López Jimenez, A., Martinez Solano, J., Lopez Patiño, G., & Perez García, R. (2003). *Curso de estaciones de bombeo en hidraulica* (Primera; Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos (GMMF), Ed.). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Martinez Solano, J. (2019). *Apuntes asignatura Planificación y Diseño de Redes de Distribución de Agua*. Valencia.
- Ministerio de Energía, T. y A. D. *Real Decreto 897/2017*. , Pub. L. No. 897/2017 (2017).
- Moreno Jimenez, J. M. (2002). *El proceso Analítico Jerárquico (AHP). Fundamentos, metodología y aplicaciones*. Zaragoza, España.
- Naciones Unidas. (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Retrieved from Naciones Unidas website: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- OECC, & Ministerio para la Transición Ecológica. (2019). *Factores de emisión*. Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm30-479095.pdf
- OMEGA. (2020). Transductores de presión a alta precisión. Retrieved February 11, 2020, from https://es.omega.com/pptst/PX409_SERIES.html
- Parlamento Europeo, & Consejo 13 julio 2009. *Directiva 2009/72/CE*. , (2009).
- Pimentel Gomes, H. (2009). *Eficiência Hidráulica e energética em saneamento* (2nd ed.; Editora Universitaria UFPB, Ed.). João Pessoa: Editora Universitaria UFPB.
- Pimentel Gomes, H. (2014). *Avaliação Econômica Eficiência Energética* (1st ed.; Editora da UFPB, Ed.). João Pessoa: Editora Universitaria UFPB.
- Saaty, T. (1980). *Analytic Hierarchy Process* (1st ed.; McGraw Hill Education, Ed.). London.
- Saaty, T. (2001). *The Analytic Network Process* (1st ed.; Pittsburg University Press, Ed.). Pittsburg University Press.

- Saaty, T. (2008). Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Service Sciences*, 1(3), 83–98. <https://doi.org/10.1504/ijssci.2008.017590>
- Saaty, T. L. (2006). The analytic network process. *International Series in Operations Research and Management Science*, 95, 1–26.
- Salvador Escoda S.A. (2019). *Válvulas y accesorios* (p. 156). p. 156. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sanks, R., Tchobanoglous, G., Bosserman, B., & Jones, G. M. (1998). Pumping Station Design. In *Butterworth-Heinemann* (Vol. 69).
- Shapira, A., & Goldenberg, M. (2005). AHP-based equipment selection model for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(12), 1263–1273. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2005\)131:12\(1263\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:12(1263))
- Siemens. (2019). Variadores de Frecuencia. Retrieved September 18, 2019, from https://www.solucionesyservicios.biz/epages/64466233.sf/es_ES/?ObjectPath=/Shops/64466233/Categories/Variadores-de-velocidad/MICROMASTER
- UNESCO. (2018). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261579_spa
- Zamora Parra, B., & Viedma Robles, A. (2016). *Máquinas Hidráulicas Teoría y Problemas* (Primera ed; Universidad Politécnica de Cartagena, Ed.). Retrieved from <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5476/isbn9788416325191.pdf>

CAPÍTULO 7. ANEXOS

ANEXO 01 – FORMULARIOS DE ENCUESTA

Lo fundamental de este formulario es obtener la importancia de cada uno de los criterios definidos para el diseño de estaciones de bombeo. Por lo cual se comparan los criterios de cada jerarquía por parejas y el experto deberá elegir el criterio que considere que tiene mayor importancia y definir cuanta más.

En un primer nivel están los factores que influyen en el diseño de una Estación de bombeo, estos son:
 FT: Factores técnicos --> Refieren a todos los factores que influyen en el diseño técnico de la estación de bombeo

FE: Factores Económicos --> se refieren a la economía en la ejecución de un proyecto de estaciones de bombeo

FA: Factores Ambientales --> Se refiere a los factores que pueden generar un impacto ambiental

Después de dar la importancia a los diferentes factores que influyen en el diseño de una estación de bombeo, deberá comparar cada uno de los criterios que hacen parte de cada uno de los factores

FACTORES QUE INFLUENCIAN EN EL DISEÑO DE ESTACIONES DE BOMBEO

Primer Nivel

Por favor compare los siguientes grupos de factores, de acuerdo a la importancia relativa de uno sobre otro

1. Cual de los factores nombrados a continuación tiene más importancia para usted en el diseño de una estación de bombeo

| | |
|---------------------------|--------------------------|
| Factores Técnicos | <input type="checkbox"/> |
| Factores Ambientales | <input type="checkbox"/> |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

2. Cual de los factores nombrados a continuación tiene más importancia para usted en el diseño de una estación de bombeo

| | |
|---------------------------|--------------------------|
| Factores Técnicos | <input type="checkbox"/> |
| Factores Económicos | <input type="checkbox"/> |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

3. Cual de los factores nombrados a continuación tiene más importancia para usted en el diseño de una estación de bombeo

| | |
|---------------------------|--------------------------|
| Factores Ambientales | <input type="checkbox"/> |
| Factores Económicos | <input type="checkbox"/> |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

CRITERIOS DE CADA UNO DE LOS FACTORES DE INFLUENCIA
Segundo Nivel

FACTORES TÉCNICOS

Los criterios a valorar en los factores técnicos son:

T1: Tamaño de la estación de bombeo: El cual se refiere al área requerida para la instalación de los equipos de la estación de bombeo

T2: Complejidad del sistema de regulación: corresponde a la complejidad de la regulación de caudales requeridos a bombear por la estación de bombeo.

T3: Flexibilidad del sistema: se refiere al número de bombas en la instalación, a mayor número de bombas el sistema es más flexible

4. De los siguientes FACTORES TÉCNICOS por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

| | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|--|--------------------------|--|
| Tamaño de la estación de bombeo | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |
| Complejidad del sistema de regulación | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

5. De los siguientes FACTORES TÉCNICOS por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

| | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------|--|--------------------------|--|
| Complejidad del sistema de regulación | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |
| Flexibilidad del sistema | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

6. De los siguientes FACTORES TÉCNICOS por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

| | | | | |
|---------------------------------|--------------------------|--|--------------------------|--|
| Tamaño de la estación de bombeo | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |
| Flexibilidad del sistema | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

FACTORES AMBIENTALES

A1: MEI-->Se refiere a la eficiencia energética que los proveedores de bombas deben garantizar de acuerdo a sus puntos de funcionamiento, de acuerdo al Reglamento europeo 547 de 2012

A2: CO2 Emitido--> se refiere al CO2 que pueda emitirse por los procesos de combustión por el accionamiento de la bomba

A3: Rendimiento de la regulación --> se refiere al rendimiento en el que la estación de bombeo debiera trabajar para garantizar la demanda, siendo que entre más bajo sea, el consumo energético se incrementará

7. De los siguientes FACTORES AMBIENTALES por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

| | |
|---|--------------------------|
| MEI (Eficiencia energética de la bomba) | <input type="checkbox"/> |
| CO ₂ Emitido | <input type="checkbox"/> |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

8. De los siguientes FACTORES AMBIENTALES por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

| | |
|---|--------------------------|
| MEI (Eficiencia energética de la bomba) | <input type="checkbox"/> |
| Rendimiento de la regulación | <input type="checkbox"/> |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

9. De los siguientes FACTORES AMBIENTALES por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

| | |
|------------------------------|--------------------------|
| CO ₂ Emitido | <input type="checkbox"/> |
| Rendimiento de la regulación | <input type="checkbox"/> |
| Son de igual importancia* | <input type="checkbox"/> |

¿Cuánto más importante?

| | | | | | | | |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Moderado | <input type="checkbox"/> | Fuerte | <input type="checkbox"/> | Muy fuerte | <input type="checkbox"/> | Extremadamente fuerte | <input type="checkbox"/> |
|----------|--------------------------|--------|--------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

FACTORES ECONÓMICOS

E1: Coste de inversión: Corresponde al costo inicial de inversión que debe tener la estación de bombeo.

E2: Coste de operación corresponde a los costos relacionados a la operación del sistema de bombeo, como costos energéticos.

E3: Coste de mantenimiento: corresponde a los costos relacionados al mantenimiento de equipos en la estación de bombeo.

10. De los siguientes FACTORES ECONÓMICOS por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

Coste de inversión

Coste de Operación

Son de igual importancia*

¿Cuánto más importante?

Moderado Fuerte Muy fuerte Extremadamente fuerte

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

11. De los siguientes FACTORES ECONÓMICOS por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

Coste de inversión

Coste de Mantenimiento

Son de igual importancia*

¿Cuánto más importante?

Moderado Fuerte Muy fuerte Extremadamente fuerte

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

12. De los siguientes FACTORES ECONÓMICOS por favor indique cuál de ellos es más importante para usted

Coste de Operación

Coste de Mantenimiento

Son de igual importancia*

¿Cuánto más importante?

Moderado Fuerte Muy fuerte Extremadamente fuerte

* Si para usted son de igual importancia, no es necesario contestar cuanto más importante lo es

Encuesta sobre los criterios de preferencia para el proceso de selección de una solución de diseño de estaciones de bombeo

Como especialista en instalaciones de bombeo se le solicitará que compare en pares los criterios a considerar a la hora de definir una alternativa de diseño para una estación de bombeo.

- C1. Numero de bombas instaladas: este criterio representa la flexibilidad del sistema respecto al número de bombas que se requieren en una estación de bombeo
- C2. Costo de inversión de la instalación: Corresponde al costo inicial de inversión que debe tener la estación de bombeo.
- C3. Costo de operación: corresponde a los costos relacionados a la operación del sistema de bombeo, como costos energéticos.
- C4. Costo de mantenimiento: corresponde a los costos relacionados al mantenimiento de equipos en la estación de bombeo.
- C5. Complejidad del sistema de regulación: corresponde a la complejidad de la regulación de caudales requeridos a bombear por la estación de bombeo.

Como la comparación es en pares de criterios, la intención es definir en una escala del 1 al 9 la importancia de un criterio sobre otro; siendo 1 que el primer criterio es extremadamente menos importante que el segundo y 9 que es extremadamente más importante que el segundo.

***Obligatorio**

1. Dirección de correo electrónico *

Datos del especialista

Por favor, indicar a continuación los datos solicitados

2. Dirección de Correo electrónico *

3. Indique el campo o campos en los que considera se centra su actividad profesional

Selecciona todos los que correspondan.

- Educación, investigación, universidad
- Consultoría, realización de informes y proyectos
- Dirección de obra y proyectos
- Constructor
- Comercial
- Operación y mantenimiento de sistemas
- Gestión privada
- Gestión pública

Otro:

4. Años de experiencia

Marca solo un óvalo.

- Inferior a 1 año
- Entre 1 y 3 años
- Entre 3 y 10 años
- Entre 10 y 20 años
- Más de 20 años

5. País

Como la comparación es en pares de criterios, la intención es definir en una escala del 1 al 9 la importancia de un criterio sobre otro; siendo 1 que el primer criterio es extremadamente menos importante que el segundo y 9 que es extremadamente más importante que el segundo.

Preguntas

Ejemplo:

Si a mi criterio, el costo de inversión es en extremo más importante que el costo de operación le daré a la pregunta número 5, el valor de 9. Pero si el costo de operación es, a mi criterio, en extremo más importante que el costo de inversión, a la pregunta 5 le daré el valor de 1. Es así como gradúo el nivel de importancia de un criterio sobre otro.

6. 1. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C1 [Nº de bombas a instalar] respecto del criterio C2 [Costo de inversión]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Número de bombas a instalar es extremadamente menos importante que el costo de inversión Número de bombas a instalar es extremadamente más importante que el costo de inversión

7. 2. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C1 [Nº de bombas a instalar] respecto del criterio C3 [Costo de operación]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Número de bombas a instalar es extremadamente menos importante que el costo de operación Número de bombas a instalar es extremadamente más importante que el costo de operación

8. 3. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C1 [Nº de bombas a instalar] respecto del criterio C4 [Costo de mantenimiento]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Número de bombas a instalar es extremadamente menos importante que el costo de mantenimiento Número de bombas a instalar es extremadamente más importante que el costo de mantenimiento

9. 4. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C1 [Nº de bombas a instalar] respecto del criterio C5 [Complejidad del sistema de regulación]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Número de bombas a instalar es extremadamente menos importante que la complejidad del sistema de regulación Número de bombas a instalar es extremadamente más importante que la complejidad del sistema de regulación

10. 5. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C2 [Costo de inversión] respecto del criterio C3 [Costo de operación]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Costo de inversión es extremadamente menos importante que el costo de operación Costo de inversión es extremadamente más importante que el costo de operación

11. 6. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C2 [Costo de inversión] respecto del criterio C4 [Costo de mantenimiento]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Costo de inversión es extremadamente menos importante que el costo de mantenimiento Costo de inversión es extremadamente más importante que el costo de mantenimiento

12. 7. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C2 [Costo de inversión] respecto del criterio C5 [Complejidad del sistema de regulación]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Costo de inversión es extremadamente menos importante que la complejidad del sistema de regulación Costo de inversión es extremadamente más importante que la complejidad del sistema de regulación

13. 8. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C3 [Costo de operación] respecto del criterio C4 [Costo de mantenimiento]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Costo de operación es extremadamente menos importante que el costo de mantenimiento Costo de operación es extremadamente más importante que el costo de mantenimiento

14. 9. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C3 [Costo de operación] respecto del criterio C5 [Complejidad del sistema de regulación]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Costo de operación es extremadamente menos importante que la complejidad en el sistema de regulación Costo de operación es extremadamente más importante que la complejidad en el sistema de regulación

15. 10. ¿Qué nivel de importancia tiene el criterio C4 [Costo de mantenimiento] respecto del criterio C5 [Complejidad del sistema de regulación]?

Marca solo un óvalo.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Costo de mantenimiento es extremadamente menos importante que la complejidad en el sistema de regulación Costo de mantenimiento es extremadamente más importante que la complejidad en el sistema de regulación

16. Espacio para observaciones

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

Google Formularios

BASE DE DATOS CATÁLOGO BOMBAS

| Nº | Mod | rpm | Modelo | kW | CV | Información de catálogo | | | | | | |
|----|-------|------|-----------|------|-----|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | (l/s) ² | 0.00 | 2.78 | 11.11 | 25.00 | 34.03 | 44.44 |
| | | | | | | l/s | 0.00 | 1.67 | 3.33 | 5.00 | 5.83 | 6.67 |
| | | | | | | l/min | 0 | 100 | 200 | 300 | 350 | 400 |
| 1 | 32-13 | 2900 | 32-13/3 | 2 | 3 | | 25 | 25.3 | 25.3 | 20.2 | 18.5 | 15.0 |
| 2 | 32-16 | 2900 | 32-16/2 | 1.5 | 2 | | 22.5 | 22.0 | 20.2 | 16.0 | 13.0 | |
| 3 | 32-16 | 2900 | 32-16/3 | 2.2 | 3 | | 27.2 | 26.8 | 25.2 | 21.4 | 18.5 | 14.8 |
| 4 | 32-16 | 2900 | 32-16/4 | 3 | 4 | | 36.5 | 35.5 | 34.2 | 31.5 | 28.5 | 25.5 |
| 5 | 32-16 | 2900 | 32-16/5.5 | 4 | 5.5 | | 41 | 41.0 | 40.5 | 37.5 | 34.5 | 30.7 |
| 6 | 32-20 | 2900 | 32-20/5.5 | 4 | 5.5 | | 47.5 | 47.0 | 45.0 | 40.0 | 36.0 | 31.0 |
| 7 | 32-20 | 2900 | 32-20/7.5 | 5.5 | 7.5 | | 55 | 55.0 | 53.5 | 50.0 | 47.0 | 43.0 |
| 8 | 32-20 | 2900 | 32-20/10 | 7.5 | 10 | | 68 | 67.5 | 66.0 | 62.5 | 59.0 | 56.0 |
| 9 | 32-26 | 2900 | 32-26/15 | 11 | 15 | | 69 | 68.5 | 68.0 | 66.0 | 64.0 | 61.5 |
| 10 | 32-26 | 2900 | 32-26/20 | 15 | 20 | | 91 | 90.5 | 90.0 | 87.5 | 85.5 | 82.5 |
| 11 | 32-26 | 2900 | 32-26/25 | 18.5 | 25 | | 101.5 | 101.5 | 100.5 | 98.0 | 96.0 | 93.5 |
| 12 | 40-13 | 2900 | 40-13/5.5 | 4 | 5.5 | | 26 | | 26.0 | 26.0 | 26.0 | 25.2 |
| 13 | 40-16 | 2900 | 40-16/4 | 3 | 4 | | 30 | | 26.0 | 25.0 | 24.0 | 23.5 |
| 14 | 40-16 | 2900 | 40-16/5.5 | 4 | 5.5 | | 35.4 | | 32.0 | 32.0 | 31.5 | 30.0 |
| 15 | 40-16 | 2900 | 40-16/7.5 | 5.5 | 7.5 | | 41.5 | | 41.5 | 41.0 | 40.5 | 40.0 |
| 16 | 40-20 | 2900 | 40-20/7.5 | 5.5 | 7.5 | | 40 | | 38.8 | 37.0 | 36.0 | 35.0 |
| 17 | 40-20 | 2900 | 40-20/10 | 7.5 | 10 | | 55.5 | | 56.0 | 53.5 | 52.5 | 51.0 |
| 18 | 40-20 | 2900 | 40-20/15 | 11 | 15 | | 66 | | 66.3 | 65.0 | 64.5 | 63.0 |
| 19 | 40-26 | 2900 | 40-26/15 | 11 | 15 | | 58 | | 58.0 | 56.5 | 56.0 | 55.0 |
| 20 | 40-26 | 2900 | 40-26/20 | 15 | 20 | | 71 | | 71.5 | 71.5 | 71.0 | 70.8 |
| 21 | 40-26 | 2900 | 40-26/30 | 22 | 30 | | 97 | | 97.0 | 97.0 | 97.0 | 97.0 |
| 22 | 50-13 | 2900 | 50-13/3 | 2.2 | 3 | | 16 | | | | 15.1 | 15.0 |
| 23 | 50-13 | 2900 | 50-13/4 | 3 | 4 | | 18.6 | | | | 18.3 | 18.1 |
| 24 | 50-13 | 2900 | 50-13/5.5 | 4 | 5.5 | | 23.2 | | | | 22.9 | 22.8 |
| 25 | 50-13 | 2900 | 50-13/7.5 | 5.5 | 7.5 | | 26.5 | | | | 26.5 | 26.5 |
| 26 | 50-16 | 2900 | 50-16/7.5 | 5.5 | 7.5 | | 29 | | | | 29.0 | 28.5 |
| 27 | 50-16 | 2900 | 50-16/10 | 7.5 | 10 | | 38 | | | | 37.1 | 36.9 |
| 28 | 50-16 | 2900 | 50-16/15 | 11 | 15 | | 43 | | | | 42.7 | 42.6 |
| 29 | 50-20 | 2900 | 50-20/15 | 11 | 15 | | 53.5 | | | | 53.4 | 53.2 |
| 30 | 50-20 | 2900 | 50-20/20 | 15 | 20 | | 62 | | | | 61.7 | 61.5 |
| 31 | 50-20 | 2900 | 50-20/25 | 18.5 | 25 | | 65 | | | | 65.0 | 64.5 |
| 32 | 50-26 | 2900 | 50-26/30 | 22 | 30 | | 80 | | | | 80.0 | 80.0 |
| 33 | 50-26 | 2900 | 50-26/40 | 30 | 40 | | 101 | | | | 101.0 | 101.0 |

| 56.25 | 69.44 | 100.00 | 136.11 | 177.78 | 225.00 | 277.78 | 400.00 | 544.44 | 711.11 |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 7.50 | 8.33 | 10.00 | 11.67 | 13.33 | 15.00 | 16.67 | 20.00 | 23.33 | 26.67 |
| 450 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| 20.5 | | | | | | | | | |
| 25.5 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| 52.0 | | | | | | | | | |
| 57.0 | | | | | | | | | |
| 78.5 | 73.0 | | | | | | | | |
| 90.3 | 85.0 | | | | | | | | |
| 25.0 | 24.0 | 23.0 | 21.5 | 19.0 | 17.0 | | | | |
| 22.5 | 21.0 | 19.0 | 15.0 | | | | | | |
| 29.0 | 28.0 | 27.0 | 23.8 | | | | | | |
| 39.0 | 38.5 | 36.0 | 32.0 | | | | | | |
| 33.0 | 31.0 | 22.0 | | | | | | | |
| 50.0 | 47.5 | 44.0 | | | | | | | |
| 62.0 | 61.0 | 56.0 | 51.0 | | | | | | |
| 54.0 | 52.0 | 50.0 | 43.0 | | | | | | |
| 70.0 | 69.8 | 69.0 | 61.5 | 54.7 | 44.0 | | | | |
| 95.0 | 94.0 | 91.0 | 88.0 | 83.0 | 77.0 | 65.0 | | | |
| 14.7 | 14.3 | 14.0 | 13.2 | 13.0 | 11.9 | 10.7 | | | |
| 18.0 | 17.9 | 17.8 | 17.3 | 16.4 | 15.6 | 14.4 | 11.4 | | |
| 22.7 | 22.6 | 22.5 | 22.0 | 21.3 | 20.9 | 20.0 | 18.0 | | |
| 26.5 | 26.5 | 26.0 | 25.6 | 24.9 | 24.4 | 23.5 | 22.0 | 19.4 | 16.8 |
| 28.0 | 27.8 | 27.5 | 27.0 | 26.0 | 25.0 | 23.0 | | | |
| 36.7 | 36.5 | 36.1 | 35.4 | 34.9 | 33.9 | 32.5 | 29.0 | | |
| 42.5 | 42.4 | 42.0 | 41.5 | 41.0 | 40.0 | 38.0 | 36.5 | 33.0 | |
| 53.0 | 52.5 | 52.0 | 50.0 | 48.0 | 46.0 | 44.0 | 35.0 | | |
| 61.0 | 60.5 | 60.0 | 59.0 | 57.0 | 55.0 | 52.5 | 45.0 | | |
| 64.2 | 64.0 | 63.5 | 62.0 | 60.5 | 58.5 | 57.0 | 50.0 | 40.0 | |
| 80.0 | 78.8 | 77.7 | 76.1 | 74.5 | 72.7 | 70.5 | 65.2 | | |
| 101.0 | 101.0 | 100.8 | 100.7 | 100.0 | 99.0 | 98.0 | 90.0 | 78.0 | 70.0 |

| Rmax | H0 |
|------|--------|
| 0.56 | 26.17 |
| 0.47 | 22.83 |
| 0.50 | 27.75 |
| 0.56 | 37.00 |
| 0.58 | 42.53 |
| 0.50 | 48.30 |
| 0.53 | 55.85 |
| 0.54 | 68.65 |
| 0.39 | 69.79 |
| 0.43 | 92.35 |
| 0.45 | 102.75 |
| 0.78 | 26.92 |
| 0.53 | 27.99 |
| 0.63 | 33.86 |
| 0.66 | 42.59 |
| 0.56 | 41.33 |
| 0.59 | 56.51 |
| 0.61 | 67.73 |
| 0.49 | 59.30 |
| 0.53 | 75.21 |
| 0.55 | 100.47 |
| 0.73 | 15.77 |
| 0.74 | 19.13 |
| 0.76 | 23.49 |
| 0.76 | 27.26 |
| 0.74 | 29.42 |
| 0.76 | 38.08 |
| 0.77 | 43.63 |
| 0.68 | 55.49 |
| 0.70 | 63.54 |
| 0.70 | 67.24 |
| 0.61 | 81.41 |
| 0.63 | 104.98 |

| | |
|-----|------|
| IVA | 1.21 |
|-----|------|

Parámetros de ajuste de curvas de bombas

| A | R2 | Qmax | Qopt | Hopt | E | F |
|-------|------|-------|-------|-------|--------|--------|
| -0.24 | 0.95 | 10.52 | 5.26 | 19.63 | 0.2128 | 0.0202 |
| -0.28 | 0.99 | 9.02 | 4.51 | 17.12 | 0.2084 | 0.0231 |
| -0.28 | 0.99 | 10.00 | 5.00 | 20.81 | 0.2000 | 0.0200 |
| -0.27 | 0.98 | 11.72 | 5.86 | 27.75 | 0.1912 | 0.0163 |
| -0.27 | 0.95 | 12.54 | 6.27 | 31.89 | 0.1851 | 0.0148 |
| -0.37 | 0.99 | 11.44 | 5.72 | 36.23 | 0.1748 | 0.0153 |
| -0.27 | 0.98 | 14.41 | 7.20 | 41.89 | 0.1472 | 0.0102 |
| -0.29 | 0.99 | 15.51 | 7.75 | 51.49 | 0.1393 | 0.0090 |
| -0.20 | 0.94 | 18.73 | 9.36 | 52.34 | 0.0833 | 0.0044 |
| -0.25 | 0.95 | 19.29 | 9.65 | 69.26 | 0.0891 | 0.0046 |
| -0.23 | 0.97 | 21.18 | 10.59 | 77.06 | 0.0850 | 0.0040 |
| -0.04 | 0.98 | 25.14 | 12.57 | 20.19 | 0.1241 | 0.0049 |
| -0.10 | 0.96 | 17.04 | 8.52 | 20.99 | 0.1232 | 0.0072 |
| -0.08 | 0.95 | 21.17 | 10.58 | 25.39 | 0.1181 | 0.0056 |
| -0.07 | 0.95 | 24.68 | 12.34 | 31.94 | 0.1073 | 0.0043 |
| -0.17 | 0.94 | 15.59 | 7.79 | 31.00 | 0.1437 | 0.0092 |
| -0.12 | 0.98 | 21.37 | 10.68 | 42.39 | 0.1104 | 0.0052 |
| -0.11 | 0.97 | 24.27 | 12.14 | 50.80 | 0.1005 | 0.0041 |
| -0.11 | 0.96 | 23.49 | 11.74 | 44.48 | 0.0834 | 0.0036 |
| -0.12 | 0.88 | 25.40 | 12.70 | 56.41 | 0.0835 | 0.0033 |
| -0.11 | 0.95 | 30.18 | 15.09 | 75.35 | 0.0729 | 0.0024 |
| -0.02 | 0.99 | 29.86 | 14.93 | 11.83 | 0.0978 | 0.0033 |
| -0.02 | 0.96 | 33.03 | 16.52 | 14.35 | 0.0896 | 0.0027 |
| -0.01 | 0.98 | 42.86 | 21.43 | 17.61 | 0.0705 | 0.0016 |
| -0.01 | 0.99 | 43.87 | 21.94 | 20.45 | 0.0693 | 0.0016 |
| -0.02 | 0.97 | 37.55 | 18.77 | 22.06 | 0.0788 | 0.0021 |
| -0.02 | 0.98 | 42.64 | 21.32 | 28.56 | 0.0713 | 0.0017 |
| -0.02 | 0.98 | 48.50 | 24.25 | 32.72 | 0.0631 | 0.0013 |
| -0.05 | 0.96 | 34.78 | 17.39 | 41.61 | 0.0782 | 0.0022 |
| -0.04 | 0.96 | 38.94 | 19.47 | 47.65 | 0.0714 | 0.0018 |
| -0.04 | 0.96 | 38.70 | 19.35 | 50.43 | 0.0723 | 0.0019 |
| -0.04 | 0.99 | 45.42 | 22.71 | 61.06 | 0.0537 | 0.0012 |
| -0.04 | 0.91 | 48.63 | 24.32 | 78.73 | 0.0518 | 0.0011 |

Costes bombas

| Coste suministro bomba (€) | Coste sum + IVA (€) | CosteSuminstr o + Instalación bomba (€) |
|----------------------------|---------------------|---|
| € 1,504 | 1,819.84 € | 2,361.83 € |
| € 1,571 | 1,900.91 € | 2,442.90 € |
| € 1,647 | 1,992.87 € | 2,534.86 € |
| € 1,738 | 2,102.98 € | 2,644.97 € |
| € 1,819 | 2,200.99 € | 2,742.98 € |
| € 2,159 | 2,612.39 € | 3,154.38 € |
| € 2,419 | 2,926.99 € | 3,468.98 € |
| € 2,613 | 3,161.73 € | 3,703.72 € |
| € 4,057 | 4,908.97 € | 5,450.96 € |
| € 4,397 | 5,320.37 € | 5,862.36 € |
| € 4,678 | 5,660.38 € | 6,202.37 € |
| € 1,946 | 2,354.66 € | 2,896.65 € |
| € 1,936 | 2,342.56 € | 2,884.55 € |
| € 2,036 | 2,463.56 € | 3,005.55 € |
| € 2,442 | 2,954.82 € | 3,496.81 € |
| € 2,625 | 3,176.25 € | 3,718.24 € |
| € 2,829 | 3,423.09 € | 3,965.08 € |
| € 3,675 | 4,446.75 € | 4,988.74 € |
| € 4,134 | 5,002.14 € | 5,544.13 € |
| € 4,473 | 5,412.33 € | 5,954.32 € |
| € 5,372 | 6,500.12 € | 7,042.11 € |
| € 1,700 | 2,057.00 € | 2,598.99 € |
| € 1,882 | 2,277.22 € | 2,819.21 € |
| € 1,992 | 2,410.32 € | 2,952.31 € |
| € 2,477 | 2,997.17 € | 3,539.16 € |
| € 2,719 | 3,289.99 € | 3,831.98 € |
| € 2,984 | 3,610.64 € | 4,152.63 € |
| € 3,587 | 4,340.27 € | 4,882.26 € |
| € 3,726 | 4,508.46 € | 5,050.45 € |
| € 4,064 | 4,917.44 € | 5,459.43 € |
| € 4,350 | 5,263.50 € | 5,805.49 € |
| € 5,384 | 6,514.64 € | 7,056.63 € |
| € 7,285 | 8,814.85 € | 9,356.84 € |