

## TESIS DOCTORAL

Contributions for pumping station design in water distribution system networks considering technical, economic, and environmental criteria.

### RESUMEN

El consumo de energía de una estación de bombeo (PS, del inglés pumping station) representa el mayor consumo de energía de la red de distribución de agua. Por lo tanto, un diseño adecuado de una PS y un correcto funcionamiento son determinantes en la gestión de redes de agua potable.

Un correcto funcionamiento de una PS consiste en que los puntos de funcionamiento de las bombas cumplan con la curva de consigna, de forma que la PS consuma la energía requerida de la red. La curva de consigna se define como la altura requerida de la fuente de suministro, es decir, la PS y que satisfaga el nudo de consumo crítico de la red manteniendo la presión mínima requerida de la red en el tiempo. Este funcionamiento ideal de una PS se consigue mediante sistemas de regulación, en donde se combinan bombas de velocidad fija (FSP, del inglés fixed speed pump) y bombas de velocidad variable (VSP, del inglés variable speed pump) con sistemas de control de caudal y presión. No obstante, el funcionamiento habitual de este sistema de control está restringido por el número total de bombas previamente definidos y por el número mínimo requerido de bombas según la demanda. Otra limitación de esta operación clásica es que se suele asumir una eficiencia fija del variador de frecuencia en la VSP. Estas aproximaciones pueden afectar en realizar una correcta optimización energética en las PS.

De este modo, la primera fase de ejecución de este trabajo fue el desarrollo de una metodología estandarizada para la optimización de la operación de los sistemas de regulación en la PS. Esta metodología de optimización se basa en el uso de la curva de consigna para la operación de los sistemas de regulación. La metodología tiene como objetivo determinar el número óptimo de VSP y FSP en funcionamiento y la velocidad de giro de las VSP para cualquier caudal en un intervalo de tiempo, de forma que el consumo energético sea mínimo. Esto permitirá redefinir el número total de bombas de la PS de una forma más analítica. Un aspecto importante de esta metodología es que se ha desarrollado una expresión matemática para determinar la eficiencia del variador de frecuencia en VSP cuando la velocidad de rotación cambia. Estas mejoras de cálculo permitirán evaluar el consumo de energía en los PS con mayor precisión.

Un diseño adecuado de una PS consta de tres aspectos fundamentales. Un aspecto es la selección óptima del modelo de bomba. El segundo aspecto es la definición del diseño de la PS, la cual está asociada con definir el número total de bombas. El tercer aspecto es la selección de la configuración del sistema de regulación más adecuada en una PS. Normalmente, la selección de estos tres aspectos en un diseño de una PS se basa en la minimización del coste del ciclo de vida (LCC, del inglés life cycle costs). Sin embargo, hay otros factores importantes a tener en cuenta en la selección de la solución para el diseño de una como son los factores técnicos, en los que se incluye el tamaño de la PS, su flexibilidad y complejidad de operación. Adicionalmente, es importante considerar indicadores medioambientales como, el índice de eficiencia Mínima de la bomba, las emisiones de gases de efecto invernadero y la eficiencia de la regulación de la PS. La consideración integral de criterios técnicos, medioambientales y económicos en el diseño de una PS permite que la solución seleccionada sea técnica, económicamente viable y medioambientalmente responsable.

De esta manera, la segunda y tercera fase de ejecución de este trabajo fue desarrollo de una metodología integral para el diseño de una PS, basados en un análisis de decisión multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico (AHP, del inglés analytic hierarchy process). En la segunda fase de este trabajo, la metodología de diseño de la PS se consideró criterios técnicos y económicos en método AHP. En la tercera y última fase de este trabajo, la metodología de diseño de la PS, se consideraron criterios técnicos, económicos y ambientales. Adicionalmente, en esta última fase del trabajo se consideró la optimización de operación de la PS y se consideró la variabilidad de la demanda en el proceso de diseño de la metodología. Estas metodologías consisten en determinar la prioridad de cada uno de los criterios considerados en el diseño de una PS con la finalidad de generar una valoración global de las posibles soluciones en una PS de acuerdo con la prioridad de cada criterio. Esta evaluación permite definir de una manera más objetiva la solución definitiva para el diseño de la PS disminuyendo la incertidumbre o arbitrariedad que pueden ocurrir por parte del diseñador.

Se presentaron dos casos de estudio (redes AN y EF) para demostrar la validez de las metodologías desarrolladas en este trabajo. La aplicación de la optimización propuesta para los sistemas de regulación de bombeo significó un ahorro considerable en el consumo energético en las PS de las dos redes analizadas en comparación con una operación clásica en los sistemas de regulación. En cuanto, al diseño de las PS de ambas redes considerando criterios técnicos, económicos y ambientales, se obtuvieron soluciones con características equilibradas siendo técnica y económicamente viables y responsables con el medio ambiente en comparación con soluciones de la PS basados en el enfoque clásico de minimización de los costos. Adicionalmente, la inclusión de la variabilidad de la demanda en el diseño permitió que la solución sea más fiable en condiciones extremas de operación que pueden ocurrir en una red.