

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ORIHUELA



**USO DE SOFTWARE PARA LA  
GESTIÓN ENERGÉTICA E  
HIDRÁULICA EN EL SISTEMA DE  
RIEGO DE CAMPOS DE GOLF**

TESIS DOCTORAL

AUTOR:

José Francisco García González

DIRECTORES:

Dr. Antonio Ruiz Canales

Dr. José Miguel Molina Martínez

Dr. Antonio Madueño Luna

Enero 2015



# Índice de contenidos

---

PREFACIO .....	1
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
INTRODUCCIÓN .....	9
BIBLIOGRAFÍA A LA INTRODUCCIÓN .....	23
PUBLICACIONES .....	35
COMUNICACIONES A CONGRESOS.....	43
CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	61







**1**

**Prefacio**



Este documento se ha elaborado siguiendo la normativa de la Universidad Miguel Hernández de Elche para la “Presentación de Tesis Doctorales con un conjunto de publicaciones”, y se ha dividido en las partes siguientes:

1. El presente *Prefacio*;
2. Los *Objetivos de la investigación*;
3. Una *Introducción*, en la que se presenta el tema de la Tesis, los antecedentes y objetivos del trabajo realizado;
4. Una *Bibliografía a la Introducción*;
5. Un apartado de *Publicaciones*, en donde aparece la publicación principal (con el índice de impacto, IF, en el año 2013):

García-González, J.F., Moreno, M.A., Molina, J.M., Madueño, A. and Ruiz-Canales, A. (2014). Use of software to model the water and energy use of an irrigation pipe network on a golf course. *Agricultural Water Management*. (IF: 2.233) con DOI 10.1016/j.agwat.2014.11.012

6. Un apartado con las 3 comunicaciones a congresos:

García-González, J.F., Moreno, M.A., Molina, J.M., Madueño, A., Ferrández-Villena, A. y Ruiz-Canales, A. (2014). Empleo de herramientas software de optimización del uso del agua para la automatización y el telecontrol de la red de riego de un campo de golf. *Actas de Horticultura nº 64*, comunicación AT1-13. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. Orihuela, Alicante.

García-González, J.F., Moreno, M.A., Molina, J.M., Madueño, A., Ferrández-Villena, A. y Ruiz-Canales, A. (2014). Empleo de herramientas software de optimización del uso de la energía para la automatización y el telecontrol de la red de riego de un campo de golf. *Actas de Horticultura nº 64*, comunicación AT2-02. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. Orihuela, Alicante.

García-González, J.F., Moreno, M.A., Molina, J.M., A. and Ruiz-Canales, A. (2013). Empleo de herramientas software para el modelado de la demanda, análisis dinámico y curvas de bombeo en la red principal de riego de un campo de golf. Aplicación a un caso de estudio en la provincia de Alicante. XXXI Congreso Nacional de Riegos, comunicación C-16. Asociación Española de Riegos y Drenajes. Orihuela, Alicante.

7. Un último apartado con las *Conclusiones de la investigación*.

La línea investigadora principal del grupo en el que se integra esta Tesis Doctoral se centra en la automatización y telecontrol para la gestión de recursos hídricos y energéticos. La mayoría de los investigadores del equipo trabajan en esta línea de I+D+i y otras líneas paralelas como eficiencia energética en el sector agroalimentario y modelización del consumo hídrico de cultivos, entre otros.

Adicionalmente, el investigador que presenta la Tesis es Ingeniero Agrónomo y egresado en el Master Oficial en Automatización y Telecontrol para la Gestión de Recursos Hídricos y Energéticos de la UMH, relacionado con la temática de la Tesis.

Los miembros de los grupos de investigación a los que se adscribe esta Tesis proceden del grupo Agua y Energía para una Agricultura Sostenible (AEAS) de la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH), Ingeniería Agromótica y del Mar de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y Mecanización y Tecnología Rural de la Universidad de Córdoba (UCO). Cuentan con una actividad docente e investigadora multidisciplinar. Han participado en numerosos proyectos de investigación subvencionados. Han sido miembros de comités científicos de numerosos congresos relacionados con la temática en la que son expertos. Son autores de más de 20 libros y más de 120 capítulos de libros. Han participado en el desarrollo de patentes y programas informáticos con registro de propiedad intelectual. Asimismo han presentado unas 400 comunicaciones a congresos nacionales e internacionales, y han publicado más de 80 artículos, de los cuales alrededor de 40 pertenecen a revistas JCR, situándose la mayoría en revistas del primer cuartil.

Asimismo este grupo colabora estrechamente con empresas del sector. Los investigadores del equipo han participado en diversos proyectos con empresas del sector agroalimentario y energético.

Por último, indicar que el apartado 3. *Introducción* no incluye un apartado de Material y Métodos, que están descritos en la publicación y comunicaciones a congresos. Este documento incorpora varias bibliografías, la de la publicación, la de las comunicaciones a congresos y la del apartado correspondiente, pudiéndose repetir las citas bibliográficas en los diferentes documentos.



## **Objetivos de la investigación**





El objetivo general de esta Tesis Doctoral y sus líneas de investigación derivadas es la mejora de la gestión del riego en un caso de estudio de un campo de golf mediante el modelado informático de la red de riego y la estación de bombeo. El estudio se ha llevado a cabo en un campo de golf localizado en una zona de limitada disponibilidad hídrica como es la provincia de Alicante. Se pretende con este estudio avanzar en el conocimiento de la mejora en el manejo del agua y la energía de las instalaciones de riego de campos de golf en la zona de estudio y extenderlo al resto de instalaciones de características similares.

Este objetivo general ha sido abordado estableciendo los análisis desarrollados en la presente Tesis Doctoral, planteados teniendo en cuenta según los siguientes objetivos específicos:

- Análisis energético del punto óptimo de funcionamiento de la estación de bombeo. Para ello se procedió a modelar la estación de bombeo mediante el software Modelo de Análisis de Eficiencia Energética en Estaciones de Bombeo (MAEEB®), del Centro Regional de Estudios del Agua de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Se plantea obtener la eficiencia de la estación de bombeo de estudio a partir de los datos de caudales y de presiones demandadas por la red de riego. Se generan diferentes escenarios de consumo y a partir de los escenarios generados se obtienen eficiencias de bombeo y sus costes asociados.
- Análisis hidráulico del punto óptimo de funcionamiento de la red de riego. Se emplea para ello el software EPANET 2.0® para el análisis dinámico de la red de riego. Los datos hidráulicos en cada nodo y tubería de la red de riego (caudal, presión, velocidad, pérdida de carga) se calculan a partir de la topología de la red y las características de los aspersores (curva de descarga y condiciones de servicio) y tuberías (diámetro interno). Se comparan los escenarios de la red de riego antes y después de la agrupación por sectores mediante el software EPANET 2.0®. Después de la comparación se obtienen los valores de demanda al principio de la red de riego (caudal y presión) y se emplean en el software MAEEB® para establecer las condiciones de funcionamiento de la red.
- Establecimiento de condiciones de funcionamiento de la red para la gestión adecuada del agua y la energía a partir de los resultados de los objetivos anteriores.





**3**

## **Introducción**



El riego es la operación cultural por la cual se aporta el agua necesaria para el desarrollo de una actividad agraria y sirve para compensar el déficit hídrico de una especie vegetal en una zona concreta (Merino et al., 1998). En la región meridional de Europa, y más concretamente en España, las condiciones climatológicas áridas y semiáridas imponen el uso del riego como práctica imprescindible para la correcta evolución de los cultivos de regadío, que llegan a consumir el 77 % de las reservas hídricas disponibles, quedando para el consumo humano un 15,5 % y un 6,8 % para las actividades industriales (INE, 2001; Rodríguez-Díaz et al., 2007) , por lo que la actividad agraria influye tanto en la cantidad como en la calidad del agua disponible para otros usos (EEA, 2014). Ante actividades con unas demandas hídricas tan elevadas compitiendo por un bien escaso, se precisa optimizar la distribución y consumo de agua en cada uno de los sectores demandantes, mejorando el transporte, la distribución, la gestión y el método de aplicación del agua. Esa misma necesidad de optimización se plantea en actividades similares con demandas hídricas elevadas como es el caso del golf. Junto con estas altas demandas hídricas existe desde el punto de vista social y medioambiental una mala percepción del golf. En este sentido se considera que se destina un bien escaso a actividades lúdico-deportivas, compitiendo con actividades productivas clásicas, entendiendo como tal a la agricultura y la industria (Rodríguez-Díaz et al., 2007).

### 3.1. CAMPOS DE GOLF.

El primer campo de golf construido en España data de 1889. Desde esa fecha hasta 2012 han ido aumentando hasta 424 campos. El mayor aumento tuvo lugar en el periodo 1990-2010, donde se cuadruplicó el número, pasando de 103 a 422 debido al aumento de la construcción, que como atractivo turístico para el turista nacional y extranjero, se asociaban los desarrollos urbanísticos a los campos de golf, En 2005 existían 289 campos de golf (Golf Spain, 2014), y se preveía duplicar el número de campos en la siguiente década (Schouten, 2003). A partir de la crisis económica sufrida desde 2008 en España se estanca la construcción y el desarrollo de complejos urbanísticos y de campos de golf, por lo que el ritmo se ralentiza hasta prácticamente cero, quedando finalmente el número de campos de golf en 424 a finales de 2012 (Golf Spain, 2014). La mayoría de los campos de golf se sitúan en la costa mediterránea, con un 13 % en la provincia de Málaga, un 7 % en la provincia de Barcelona y un 5 % en la provincia de Alicante, algunas de las cuales están consideradas como zonas elevado estrés hídrico y en donde pueden darse casos de restricciones de suministro en situaciones puntuales (MMA, 1998; Rodríguez-Díaz et al., 2007).

Los campos de golf son entornos en donde se cultivan principalmente especies cespitosas (*Poa pratensis* L., *Festuca rubra* L., *Cynodon dactylon* L., *Festuca arundinacea* Schreb., entre otras), que sirven como base para desarrollar una actividad lúdico-deportiva, contribuyendo significativamente a la economía de la zona, generando empleo y demandando importantes cantidades de agua y energía, por lo que es necesaria la sostenibilidad (Expósito et al., 2011). El uso de una especie cespitosa u otra, o una determinada combinación, varía en función de la zona del campo (*tee*, *green*, *antegreen*, *fairway* o *rough*), de las condiciones agroclimáticas y edafológicas, de la época del año y de la estética y las condiciones de juego propuestas y demandadas por propietarios, jugadores y espectadores (Weatherhead et al., 2006; Rodríguez-Díaz et al., 2007), por lo que las necesidades hídricas, y de mantenimiento, diferirán en función de las variables anteriores, pero siempre buscando una superficie de juego de alta calidad (Rodríguez-Díaz et al., 2007). En España, en el periodo estival pueden llegar a regarse todas las zonas. En invierno se riegan principalmente *tees* (zonas de salida del hoyo), *greens* (zona donde finaliza el hoyo) y *antegreen* (zona perimetral al *green*). En otros países, como Inglaterra, el riego es prácticamente nulo en invierno, al estar satisfechas las necesidades hídricas por las precipitaciones, y en verano suelen regarse *tees*, *greens* y *antegreens* debido al uso intenso a la que están sometidas esas zonas (Weatherhead et al., 2006; Rodríguez-Díaz et al., 2007). Por término medio, la superficie regada por campo es de 34,2 ha., representando los *tees* y *greens* el 11 % de la superficie, existiendo una amplitud en cuanto al consumo de agua que va desde los 2.000 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> hasta los 17.000 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, con un valor medio de 8.200 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> (Rodríguez-Díaz et al., 2007), valor similar al obtenido por Morell, (2002) de 8.000 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> y por Sanz-Magallón, (2005) de 7.563 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.

El agua y la energía son la parte esencial de los costes de operación y mantenimiento en las redes presurizadas de riego. Estos recursos con el paso del tiempo son cada vez más costosos, debido a la disponibilidad y competitividad frente a otros sectores económicos y productivos que también los demandan. Por ello deben ser analizados y optimizados de forma conjunta. En todos los campos de golf se dispone de instalaciones de redes de riego presurizadas y estaciones de bombeo. Por otra parte, los valores de la constante de cultivo, Kc, de las especies cespitosas usadas en los campos de golf varían entre 0,7 y 1,0 (Merino et al., 1998), valores similares al del resto de cultivos (FAO, 2006), pero el volumen de agua aplicado por unidad de superficie es más elevado en los campos de golf que en otros cultivos. Esto puede deberse, entre otros aspectos, a excesivas pluviometrías de los aspersores, una estructura edafológica que impide la correcta distribución y retención hídrica en todo el perfil del suelo, mala planificación de los riegos,



aplicaciones periódicas adicionales para la disolución de productos fitosanitarios, entre otras. Por todo ello es necesario reducir dichos consumos, tanto por el ahorro hídrico y económico como por el impacto ambiental provocado por los excesivos riegos (Expósito et al., 2011). Según los valores medios dados previamente y próximos a  $8.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , este valor es superior al de la demanda hídrica de cultivos con riego localizado. Estos se encuentran en un valor medio de  $5.400 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  y ascienden a los  $7.000\text{-}9.000 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$  para en el caso de los regadíos tradicionales (Rodríguez-Díaz et al., 2007). Analizando volúmenes totales, el riego de los campos de golf rondaba en el año 1999 los 85,1 millones de  $\text{m}^3$  frente a los 17,7 billones de  $\text{m}^3$  de la agricultura. Es decir, supone una cantidad muy pequeña que ronda el 0.05 % del total del volumen de agua empleada para riego (INE, 2001; Rodríguez-Díaz et al., 2007). Con el fin de disminuir el uso de agua de riego en campos de golf, se han llevado a cabo ensayos de riego deficitario controlado, RDC, evaluando la estética visual del césped en función del riego aplicado y la evapotranspiración (Silva et al., 2010).

La Real Federación Española de Golf estimó que los 85,1 millones de  $\text{m}^3$  de agua utilizada para el riego de los campos de golf generaron 2.375 millones de euros, por lo que la productividad media es de  $27,91 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$ . Este ratio es muy superior al de los cultivos más rentables, como la fresa, que ronda los  $3 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$  (Rodríguez-Díaz et al., 2007). Sanz-Magallón, 2005), consideró que sólo un tercio de los beneficios del golf son beneficios turísticos directos, relacionados con los *green-fees*, mientras que los otros dos tercios corresponden a beneficios turísticos indirectos, como pueden ser hoteles, restaurantes, alquiler de vehículos, etc. Es decir, la rentabilidad directa del uso del agua en los campos de golf es muy superior, aproximadamente el triple, a la rentabilidad de los cultivos considerados de mayor valor comercial.

En términos generales en España, el agua de riego de los campos de golf tienen como origen el 41 % de aguas residuales reutilizadas, el 28 % aguas superficiales y subterráneas y el 7 % de aguas desaladas. En los campos situados a menos de 10 km de la costa, éste último valor ha aumentado hasta llegar al 80 %. Por el contrario, en la agricultura tradicional el 68 % procede de aguas superficiales, el 28 % de aguas subterráneas y sólo el 4 % tienen orígenes no convencionales (FENACORE, 2005; Rodríguez-Díaz et al., 2007).

En cuanto a la energía, varios indicadores de gestión obtenidos en diferentes estudios muestran que en actividades agrarias el consumo de potencia ronda los  $2 \text{ kW} \cdot \text{ha}^{-1}$ , mientras que en los campos de golf el valor se puede elevar hasta los  $7 \text{ kW} \cdot \text{ha}^{-1}$  (Expósito et al., 2011). Ello es debido a que la jornada efectiva de riego se ve reducida a la noche, requiriéndose una alta capacidad de bombeo para desarrollar

la programación en tan corto espacio de tiempo. Por todo ello, se hace preciso diseñar una estación de bombeo y una red de riego que se amolde a las características no sólo agrometeorológicas y topográficas del entorno, sino que también permita una eficiencia máxima en el uso del agua y la energía. Ello repercutirá en una ventaja competitiva frente a otras instalaciones próximas, al ahorrar costes y subsecuentemente en que el estado fitosanitario y estético sea el deseado, con el mínimo impacto ambiental.

En las últimas décadas, los mayores avances referidos a la gestión y mantenimiento de los campos de golf se ha centrado en el mantenimiento del césped, especialmente en la fertilización (O'Neill et al., 2014), la profundidad del frente de humedad (Silva et al., 2010) o el análisis de elementos de la red, como pueden ser los aspersores (Pardo et al., 2013). Sin embargo no se han desarrollado herramientas específicas que permitan gestionar el agua y la energía de la forma más eficiente (Merino et al., 1998), ya sea actuando en la gestión de la red de riego o en la regulación de la estación de bombeo.

### 3.2. ESTACIONES DE BOMBEO.

Cuando se trata de sistemas de riego, las estaciones de bombeo son instalaciones complejas cuyo principal fin es enviar agua desde un nivel energético inicial a otro superior, aumentando la cota, la velocidad, la presión o una combinación de ellas, para abastecer uno o varios puntos, que sin ella no sería posible.

En los campos de golf, la estación de bombeo está compuesta por la asociación en paralelo de varias bombas hidráulicas. Algunas de ellas pueden tener asociadas sistemas de control específicos, como pueden ser las bombas mantenedoras de presión, *bombas jockey*. Otras poseen variadores de frecuencia para el arranque y la parada progresiva, así como para llegar a obtener el punto óptimo de funcionamiento de forma individual o conjunta.

Las estaciones de bombeo funcionan por arranque y parada progresiva de algunas de las diferentes bombas que la componen, para así poder abarcar en un amplio rango de caudal y presión, utilizando la menor energía posible.

A su vez, la estación de bombeo forma parte de un conjunto mayor, el cabezal de riego, compuesto además por los sistemas de filtrado y fertilización. Éstos pueden tener sus propias bombas para realizar operaciones específicas (como la inyección de fertilizantes, lavados de filtros, etc.), operando los tres sistemas de forma

simultánea, pudiendo estar más o menos automatizada la interacción y funcionamiento en función de las diferentes inversiones realizadas. Además puede llevar asociados otros sistemas de control y protección electrónicos, eléctricos y/o electromecánicos.

Los sistemas más comunes de regulación y control de estaciones de bombeo de redes colectivas de riego a presión son la regulación manométrica y la regulación siguiendo la curva de demanda de la red de riego (Lamaddalena et al., 2000; Moreno et al., 2011).

La regulación manométrica consiste en suministrar el caudal demandado por la red de riego con una presión de cabecera constante, independientemente de los hidrantes que estén abiertos en cada escenario de demanda. Para conseguir esta regulación es necesario que en la estación de bombeo existan varias bombas en paralelo, con una o varias bombas activadas con un variador de frecuencia (Moreno et al., 2007c; Moreno et al., 2011).

La regulación de la curva de demanda precisa de la determinación de la curva del sistema a través de la generación de escenarios de demanda mediante la apertura aleatoria de hidrantes (*random daily demand curve*, RDDC) (Moreno et al., 2007b; Moreno et al., 2010), en donde para un mismo caudal descargado, la presión en cabecera dependerá de la localización y características de los hidrantes abiertos, así como un tratamiento estadístico de los resultados para garantizar las condiciones de suministro preestablecidas (Lamaddalena et al., 2000; Moreno et al., 2010), utilizando para ello software específico (Rossman, 1997; Rossman, 2001; Moreno et al., 2007a y Moreno et al., 2010).

Pulido-Calvo et al., 2003), Moradi-Jalal et al., 2003), Moradi-Jalal et al., 2004), y Moreno et al., 2009) desarrollaron algoritmos para la selección de bombas con la finalidad de reducir los costes energéticos. Planells et al., 2005) y Moreno et al., 2009) concluyeron que la mejor regulación es aquella que lleva variadores de frecuencia asociados a dos bombas trabajando conjuntamente, caso que todavía está por llegar a los campos de golf. Moreno et al., 2011) exponen que la mejor opción de regulación de estaciones de bombeo es aquella que, sabiendo los hidrantes que están abiertos en cada momento se garantiza la presión mínima de trabajo en el más desfavorable de ellos con la menor altura en el cabezal.

### 3.3. REDES DE RIEGO PRESURIZADAS.

Las redes de riego presurizadas pueden ser gestionadas a la demanda, por turnos, o en sistemas mixtos, poseyendo cada una de ellas sus ventajas e inconvenientes respecto a las otras, así como diferentes grados de eficiencia, pero todas tienen en común dos puntos: (1) que se pasa de un sistema tradicional, donde el uso del agua es ineficiente y el uso de la energía es alto; por ejemplo, el riego por gravedad en abancalamientos, o un sistema del uso del agua ineficiente y uso de la energía muy bajo, como el riego tradicional por gravedad en zonas de huerta a un sistema presurizado donde la eficiencia en el uso del agua es alta y disminuye ligeramente en el uso de la energía (Rodríguez-Díaz et al., 2009) y (2) que se debe tener en cuenta que las redes de riego presurizadas se diseñan para garantizar que la presión en los hidrantes de riego sea igual o superior a la presión mínima de diseño estipulada en la fase de proyecto y así asegurar el buen funcionamiento de la red de riego en parcela (Labye et al., 1988; CEMAGREF, 1990; Lamaddalena, 1997; Planells et al., 2001; Theocharis et al., 2006; Lejano, 2006; Planells et al., 2007; Calejo et al., 2008;).

Labye et al., 1988) establecieron cinco pasos a seguir para el diseño de redes de riego presurizadas: (1) optimizar la topología de la red (Brave et al., 1983; Awumah et al., 1989; Granados, 1990); (2) calcular el caudal de descarga en función de las características de la parcela (Planells et al., 2001); (3) determinar el flujo por cada tramo de la red (Clément et al., 1979; Pulido-Calvo et al., 2003); (4) calcular el diámetro óptimo de la red en base a criterios económicos (Labye et al., 1988; Lansey et al., 1989; Pérez et al., 1996; Diopram, 2003); y (5) analizar el rendimiento de la red de riego bajo diferentes escenarios de demandas (Rossman, 1997; Aliod et al., 1997; Rossman, 2001) para determinar las posibles carencias del conjunto red-estación de bombeo (Lamaddalena et al., 2000). A partir de estas premisas se puede optimizar de forma conjunta la disposición y dimensionado de la red de riego (Planells et al., 2007) y el bombeo.

Para la evaluación del rendimiento de las redes se hace uso de indicadores de calidad de servicio a partir de diferentes presiones, como pueden ser la presión máxima, la presión media, la presión mínima y la equidad de la presión (ratio entre la media de presiones en el primer cuartil y la media de presiones del cuarto cuartil) de los hidrantes abiertos en un momento dado (Rodríguez-Díaz et al., 2009), o usando más variables, tanto de la estación de bombeo (como puede ser la energía requerida y consumida, el caudal y la presión, entre otros) como de la zona regable (por ejemplo, superficie regada, cotas del terreno) (Abadía et al., 2008).

### 3.3.1. RIEGO A LA DEMANDA.

Los sistemas de riego presurizado a la demanda se caracterizan por disponer del agua, con un caudal y una presión requerida por el regante en el momento que así lo precise, sin importar el momento, la duración y la frecuencia de los riegos (Calejo et al., 2008). Para que el hidrante pueda disponer del caudal y la presión suficiente para actuar de la forma deseada es necesario que se tenga que diseñar y dimensionar el sistema de transporte, distribución y bombeo bajo un componente estadístico de simultaneidad en la demanda (Clément, 1966; Moreno et al., 2011) para poder satisfacer los requerimientos hídricos en un momento determinado. Calejo et al., (2008) han realizado simulaciones en este tipo de redes para analizar el rendimiento del sistema y los hidrantes, mediante el modelo ICARE (CTGREF, 1979; Bethery et al., 1981; Bethery, 1990) y el modelo AKLA (Lamaddalena, 1997; Lamaddalena et al., 2000), con resultados dispares según el modelo, el número de hidrantes abiertos y las presiones de trabajo.

El coste de inversión de este tipo de redes es normalmente superior al resto, ya que hay un sobredimensionamiento de las conducciones y estación de bombeo para poder garantizar el suministro a los hidrantes en momentos de altas necesidades conjuntas (Lamaddalena et al., 2000; Planells et al., 2001; Planells et al., 2005; Moreno et al., 2007a; Calejo et al., 2008; Daccache et al., 2010; Moreno et al., 2010). Además, la estación de bombeo puede sufrir numerosas y continuas fluctuaciones de presión y caudal a lo largo del periodo de riego, al estar expuesta la red a la apertura y cierre de hidrantes frecuentes (Calejo et al., 2008; Daccache et al., 2010; Moreno et al., 2010). Este hecho conlleva un aumento en el coste de la instalación, al precisar de equipos de mayor robustez electromecánica, y que a su vez implica que la eficiencia energética del conjunto de la estación sea variable (Rodríguez-Díaz et al., 2009) al encontrarse en determinados momentos en puntos donde la relación caudal-presión lejos del óptimo de diseño en la combinación de bombas de la estación.

A pesar que el riego a la demanda es una evolución en cuanto a la flexibilidad laboral del regante, implica un gasto superior de inversión y de energía, oscilando el aumento en 600-1.600 kWh·ha<sup>-1</sup> (IDAE, 2008; Blanco, 2009; Rodríguez-Díaz et al., 2009; Moreno et al., 2010) y puntos de ineficiencia energética más frecuentes al encontrarse más casos de estados de bajo y medio caudal (Córcoles, 2009; Moreno et al., 2010), además de poseer un gasto energético muy elevado por el sobredimensionamiento de la red para garantizar el suministro al hidrante más desfavorable en la época más desfavorable dentro de los márgenes estadísticos de posibles aperturas (Rodríguez-Díaz et al., 2009).

Los sistemas de riego a la demanda son más fácilmente automatizables desde el punto de vista del hidrante, permitiendo al operario gestionar la apertura y cierre de los hidrantes de forma remota, y la estación de bombeo realizar las variaciones oportunas para buscar, en caso de ser posible, los puntos de mayor eficiencia, conllevando un ahorro de hasta el 50 % en el consumo de agua en el sur y levante español (Rodríguez-Díaz et al., 2008 y Rodríguez-Díaz et al., 2009).

### 3.3.2. RIEGO POR TURNOS.

Se caracteriza por existir una agenda preestablecida por el gestor de la red, en la cual un determinado hidrante sólo recibirá agua cuando el gestor de la red así lo haya previsto, pudiendo variar la frecuencia de riego según las normas de la entidad suministradora. La gestión de una red por turnos implica crear sectores de riego. Hasta ahora se han realizado los sectores basándose en criterios clásicos como la homogeneidad de las áreas regables, o a pérdidas de carga para la agrupación (Jiménez-Bello et al., 2010), en zonas donde las cotas son muy variables se hace por criterio de elevación, mientras que en zonas llanas el criterio es la distancia a la estación de bombeo (Rodríguez-Díaz et al., 2009). Moreno et al., 2007c) y Jiménez-Bello et al., 2010) proponen la creación de sectores de riego basados en la mayor eficiencia de la estación de bombeo y la red de riego (Abadía et al., 2008), mediante el uso de variadores de frecuencia y secuenciación de puestas en marcha y paradas de las bombas, que permitan el ajuste de las curvas de funcionamiento a la máxima eficiencia, para así minimizar el coste energético.

Diversos autores han desarrollado diferentes métodos para optimizar la sectorización con el objetivo de optimizar hidráulica y energéticamente el conjunto red de riego-estación de bombeo (Moreno et al., 2010) con algoritmos Optien (Rodríguez-Díaz et al., 2009), algoritmos genéticos (Jiménez-Bello et al., 2010) y posteriormente correlacionar los diferentes nudos de la red con algoritmos k-media o métodos de regresión basados en redes neuronales artificiales (RNA) (Moreno et al., 2011).

Cuando se trata de automatizar una red en función de la presión requerida por el sistema, este tipo de redes son más sencillas de automatizar desde el punto de vista de la estación de bombeo, debido a que existe una agenda de riego preestablecida, por lo que durante la etapa de diseño se pueden saber las presiones de antemano para posteriormente establecer la sectorización óptima y posibilitar finalmente el control al gestor de la red (Moreno et al., 2011).



Desde el punto de vista energético, si la sectorización es la apropiada, la red gestionada por turnos es más eficiente, energéticamente hablando, frente al sistema a la demanda (Rodríguez-Díaz et al., 2007), al conocerse de antemano el estado de la red en cuanto a caudal y presión, por lo que se puede programar la estación de bombeo al punto de máxima eficiencia, aunque puede generar problemas ulteriores en la eficiencia de la estación de bombeo en caso de demandar un caudal no previsto por el gestor (Moreno et al., 2010).

#### 3.4. GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y ENERGÉTICOS.

Debido a que en los campos de golf el riego se realiza a través de redes de riego presurizadas por medio de una estación de bombeo, la gestión del agua de riego y la energía se debe de realizar de forma conjunta (IDAE, 2008; Rodríguez-Díaz et al., 2009), lo que implica que la decisión que se tome para uno de los recursos influirá en la gestión del otro.

Para poder gestionar de una forma eficiente el conjunto agua-energía es necesario, (1) conocer la situación real de la red de riego y de la estación de bombeo y el objetivo del estudio, por lo que se precisa de un estudio inicial pormenorizado con las características técnicas y constructivas del sistema; (2) modelar el sistema mediante software específico (Rossman, 1997; Rossman, 2001 y Moreno et al., 2010) que permitirá conocer el comportamiento de la conjunto; (3) generar de escenarios de trabajo con diferentes caudales, presiones, rendimientos y eficiencias hídricas y energéticas; (4) obtener la solución que más se acerque al objetivo inicial propuesto, siendo este sistema una aproximación a la establecida por García-Serra, 1988).

En el primer paso, la amplitud y fiabilidad del estudio inicial dependerá de la información técnica y contable suministrada por el responsable del campo de golf en la materia, caso que en algunos estudios ha sido difícil de obtener o mostrada poca colaboración al respecto (Rodríguez-Díaz et al., 2007), así como la concreción de objetivos que variarán según las necesidades propias del campo de golf.

En el segundo y tercer paso, en la actualidad hay numerosos estudios e investigaciones referentes a la gestión de recursos hídricos y energéticos en redes de riego para sistemas agrícolas en general, como son la reducción del consumo de agua, de energía y de los costes asociados (Moreno et al., 2007c; Abadía et al., 2008; Jiménez-Bello et al., 2010; Bagirov et al., 2013). Estas herramientas están basadas en la toma de decisiones en las inversiones de infraestructuras y la mejora de ratios económicos y eficiencia hídrica a corto y largo plazo (Khan et al., 2010). Otros

estudios se basan en la gestión de estaciones de bombeo por medio de maximizar la eficiencia energética y haciéndola coincidir con la carga y descarga de la red (Lamaddalena et al., 2013). Otra de las investigaciones es el desarrollo sostenible de redes presurizadas bajo criterios ambientales y económicos para reducir el impacto ambiental y los gases de efecto invernadero (Carrillo-Cobo et al., 2014) y la optimización de la programación del bombeo mediante un algoritmo basado en programación lineal. Mediante este sistema se pueden comparar diferentes tarifaciones eléctricas (Reca et al., 2014). Adicionalmente hay diversos estudios relacionados con el uso de software (Rossman, 1997; Rossman, 2001; Moreno et al., 2007a y Moreno et al., 2010), para el modelado de diversos tipos de redes de riego. Así se muestran diferentes ejemplos con casos con suministros intermitentes. Entre ellos el caso de mala administración y gestión de recursos, es decir, que haya suficiente agua en los abastecimientos, pero no se ofrece de forma continua a los usuarios (Cabrera-Béjar et al., 2012), para varios tipos de escenarios de demanda de agua y energía con presiones deficientes debidas a causas variadas (Gorev et al., 2013; Liu et al., 2013), para calibraciones y simulaciones bajo diferentes escenarios de demandas y variables (Méndez et al., 2013; Farina et al., 2014), o para estaciones de bombeo, con EPANET® (Bagirov et al., 2013) o MATLAB® (Moreno et al., 2007c; Moreno et al., 2010; Mirón et al., 2013). Todos estos estudios pueden ser fácilmente adaptados a las redes de riego en los campos de golf.

### 3.5. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL.

En la provincia de Alicante, se localizan 21 campos de golf, concentrados en 3 zonas, la norte, la central y la sur, más un campo en Villena. La Zona Norte corresponde a las comarcas de Marina Alta y Marina Baja, donde hay 8 campos de golf; en la Zona Central, correspondiente a las comarcas de L'Alacantí y Vinalopó, hay 4 campos de golf; y por último, la zona sur que corresponde a la Vega Baja del Segura, en donde hay 8 campos. El considerable número de este tipo de instalaciones y su repercusión económica y medioambiental en esta zona geográfica justifican la importancia de realizar una investigación relacionada con el uso del agua y la energía en instalaciones de riego campos de golf.

Ante la situación económica actual de disminución de demanda de número de usuarios, *green-fees*, los costes implícitos de mantenimiento (agua y energía) que conlleva el manejo del riego en un campo de golf influyen de manera notable en la rentabilidad de sus instalaciones. La relación entre los ingresos aportados por los *green-fees* y los costes de mantenimiento determinan el umbral de rentabilidad de la



instalación de riego. Por este motivo los propietarios y accionistas de los campos deben de ajustar al máximo el precio de *green-fees*, para competir con los campos de golf cercanos, lo que implica reducir al mínimo los costes. Cualquier acción que sirva para la reducción de costes de instalación y de mantenimiento es de suma importancia para este tipo de instalaciones de riego.

Dentro de las instalaciones de un campo de golf es la red principal de riego la que demanda mayores cantidades de agua y energía. Dependiendo de las condiciones agroclimáticas, del diseño de la instalación, del mantenimiento y uso intensivo, entre otras causas, estas instalaciones necesitan unos aportes hídricos y energéticos considerables, tanto en volumen como en frecuencia.

Existen una serie de herramientas software (Rossman, 1997; Rossman, 2001; Moreno et al., 2007a y Moreno et al., 2010) que pueden ayudar a modelar el uso de agua y energía de la instalación de riego de un campo de golf, que se han empleado con gran éxito en redes colectivas de riego presurizadas, pero no específicamente para este tipo de instalaciones, como anteriormente se ha descrito. Por tanto, en las circunstancias actuales, el optar por el uso eficiente de recursos hídricos y energéticos redonda en un beneficio económico que puede generar una ventaja competitiva frente a otros campos de golf.

El análisis y modelado de este estudio se plantea a tres niveles diferentes. Por un lado el modelado de la demanda de la red de riego, el cual dependerá de las condiciones agrometeorológicas y de manejo del sistema. En segundo lugar el modelado hidráulico de la red, dependiente de la topología y sectorización de la red, entre otros factores. Por último se considera el modelado de las estaciones de bombeo, que es función de la potencia de las bombas, de las curvas de consigna y la secuenciación de arranques y paradas.



4

## **Bibliografía a la Introducción**



- Abadía et al., 2008 Abadía, R., Rocamora, C., Ruiz, A., Puerto, H., 2008. Energy efficiency in irrigation distribution networks I. Theory of Biosystems Engineering 101, 21-27.
- Aliod et al., 1997 Aliod, R., Eizaguerri, A., Estrada, C., Perna, E., 1997. Dimensionado y análisis hidráulico de redes de distribución a presión en riego a la demanda. Aplicación del programa Gestar. Riegos y Drenajes XXI 92, 22-38.
- Awumah et al., 1989 Awumah, K., Bhatt, S.K., Goulter, I.C., 1989. An integer programming model for layout design of water distribution networks. Engineering optimization 15, 57-70.
- Bagirov et al., 2013 Bagirov, A.M., Barton, A.F., Mala-Jetmarova, H., Al Nuaimat, A., Ahmed, S.T., Sultanova, N., Yearwood, J., 2013. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. Mathematical and computer modeling 57(3), 873-886.
- Bethery, 1990 Bethery, J., 1990. Réseaux collectifs ramifiés sous pression, calcul el fonctionnrmrnt. Études Hydraulique Agricole n° 6. CEMAGREF.
- Bethery et al., 1981 Bethery, J., Meunier, M., Puech, C., 1981. Analyse des défaillances et étude du renforcement des réseaux d'irrigation par aspersion. Amélioration et modernisation des systèmes existants d'irrigation et drainage. XI Congrès de la CIID, Grenoble, vol. 1. ICID, New Delhi, 297-324.
- Blanco, 2009 Blanco, M., 2009. Análisis de la eficiencia energética en el uso del agua de riego. Tesis de graduación. Universidad de Córdoba, España.

- Brave et al., 1983      Brave, P.R., Lam, C.F., 1983. Optimal layout for branching distribution networks. *Transportation Engineering* 109, 534-547.
- Cabrera-Béjar et al., 2012      Cabrera-Bejar, J.A., Tzatchkov, V.G., 2012. Modeling water distribution networks with intermittent water supply. *Tecnología y ciencias del agua* 3(2), 5-25.
- Calejo et al., 2008      Calejo, M.J., Lamaddalena, N., Teixeira, J.L., Pereira, L.S., 2008. Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation modeling. *Agricultural Water Management* 95, 154-162.
- Carrillo-Cobo et al., 2014      Carrillo Cobo, M.T., Camacho Poyato, E., Montesinos, P., Rodríguez Díaz, J.A., 2014. New model for sustainable management of pressurized irrigation networks. Application to Bembezar MD irrigation district (Spain). *The Science of the Total Environment* 473-474, 1-8.
- CEMAGREF, 1990      CEMAGREF, 1990. Logiciel XERXES-RENFORS, Optimisation Économique des Réseaux Ramifiés Sous Pression. CEMAGREF. Groupement d'Aix-en-Provence.
- Clément, 1966      Clément, R., 1966. Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant a la demande. *La Houille Blanche*. N° 5.
- Clément et al., 1979      Clément, R., Galand, A., 1979. Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression. Eyrolles, París.
- Córcoles, 2009      Córcoles, J.I., 2009. Evaluación de la gestión del agua y la energía en el regadío mediante técnicas de benchmarking. Tesis doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha, España.

- CTGREF, 1979 CTGREF, 1979. Programme ICARE. Calcul des caractéristiques indices. Note technique 6, CTGREF Division Irrigation. Aix-en-Provence.
- Daccache et al., 2010 Daccache, A., Lamaddalena, N., Fratino, U., 2010. On-demand pressurized water distribution system impacts on sprinkler network design and performance. *Irrigation Science* 285, 331-339.
- Diopram, 2003 Diopram, 2003. Diseño óptimo de redes ramificadas 3.0. Manual de Usuario. Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- EEA, 2014 Agencia Europea de Medio Ambiente, 2014. El agua en la agricultura. [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu). Consultado en septiembre de 2014.
- Expósito et al., 2011 Expósito, F. Camacho, E., Rodríguez Díaz, J.A., 2011. Benchmarking del uso del agua y la energía en campos de golf. Estudio comparativo entre España e Inglaterra. XXIX Congreso Nacional de Riegos. Comunicación D-17.
- Farina et al., 2014 Farina, G., Creaco, E., Franchini, M., 2014. Using EPANET for modelling water distribution systems with users along the pipes. *Civil Engineering and Environmental Systems* 31(1), 36-50.
- FAO, 2006 Food and Agriculture Organization, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Estudio FAO Riego y Drenaje, Cuaderno 56. Roma, Italia.
- FENACORE, 2005 Federación Nacional de Comunidades de Regantes, 2005. Dossier de prensa 2005. España.

- García-Serra, 1988                      García-Serra, J., 1988. Estudio y mejora de las técnicas de calibración de modelos de redes hidráulicas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Golf Spain, 2014                         Golf Spain, 2014. Información sobre campos de golf. [www.golfspain.com](http://www.golfspain.com). Acceso en octubre de 2014.
- Gorev et al., 2013                         Gorev, N.B., Kodzhespoirova, I.F., 2013. Noniterative Implementation of Pressure-Dependent Demands Using the Hydraulic Analysis Engine of EPANET 2. *Water Resources Management* 27(10), 3623-3630.
- Granados, 1990                         Granados, A., 1990. Infraestructuras de regadíos. Redes colectivas de riegos a presión. 2ª edición. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica. Madrid.
- IDAE, 2008                                 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008. Protocolo de auditoría energética en Comunidades de Regantes. Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. España.
- INE, 2001                                    Instituto Nacional de Estadística, 2001. Estadística del agua 1999. España.
- Jiménez-Bello et al., 2010             Jiménez-Bello, M.A., Martínez Alzamora, F., Bou Soler, V., Bartoli Ayala, H.J., 2010. Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption. *Biosystems Engineering* 105, 429-438.
- Khan et al., 2010                         Khan, S., Mushtaq, S., Chen, C., 2010. A decision support tool for irrigation infrastructure investments. *Irrigation and Drainage* 59(4), 404-418.



- Labye et al., 1988      Labye, Y., Olson, M.A., Galand, A., Tsiourtis, N., 1988. Design an Optimization of Irrigation Distribution Networks. Irrigation and Drainage Paper Paper nº 44. FAO, Roma.
- Lamaddalena, 1997      Lamaddalena, N., 1997. Integrated dimulation model for design and performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. Ph.D. Thesis. Instituto Superior de Agronomia, Universidade Tecnica de Lisboa.
- Lamaddalena et al., 2000      Lamaddalena, N., Sagardoy, J.A., 2000. Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. Proc. FAO Irrigation and Drainage. Roma.
- Lamaddalena et al., 2013      Lamaddalena, N., Khila, S., 2013. Efficiency-driven pumping station regulation in on-demand irrigation systems. Irrigation Science 31(3), 395-410.
- Lansey et al., 1989      Lansey, K.E., Mays, L.W., 1989. Optimization model for water distribution system design. Hydraulic Engineering 115, 1401-1418.
- Lejano, 2006      Lejano, R.P., 2006. Optimizing the layout and design of branched pipeline water distribution systems. Irrigation Drainage Systems 20, 125-137.
- Liu et al., 2013      Liu, J., Yu, G.P., 2013. Iterative methodology of pressure-dependent demand based on EPANET for pressure-deficient water distribution analysis. Water Resources Planning and Management 139(1), 34-44.
- Méndez et al., 2013      Méndez, M., Araya, J.A., Sánchez, L.D., 2013. Automated parameter optimization of a water distribution system. Hydroinformatics 15(1), 71-85.
- Merino et al., 1998      Merino Merino, D., Ansorena Miner, J., 1998. Césped deportivo. Ediciones Mundi-Prensa.

- Mirón et al., 2013      Mirón, S.A., Alexandrescu, A., Luca, M., 2013. Optimal Pump Scheduling to Reduce the Operating Costs. Innovative manufacturing engineering. Book Series Applied Mechanics and Materials 371, 677-681.
- MMA, 1998      Ministerio de Medio Ambiente, 1998. Libro blanco del agua en España. Madrid, España.
- Moradi-Jalal et al., 2003      Moradi-Jalal, M., Mariño, M.A., Afshar, A., 2003. Optimal design and operation of irrigation pumping stations. Irrigation and Drainage Engineering 129(3), 149-154.
- Moradi-Jalal et al., 2004      Moradi-Jalal, M., Rodin, S.I., Mariño, M.A., 2004. Use of genetic algorithm in optimization of irrigation pumping stations. Irrigation and Drainage Engineering 130(5), 357-365.
- Morell, 2002      Morell, I., 2002. Algunos aspectos ambientales de los campos de golf. IV Congreso de Turismo, Universidad y Empresa. La diversificación y la desestacionalización del sector turístico. Valencia, España.
- Moreno et al., 2007a      Moreno, M.A., Pelayo, J., Córcoles, J.L., Planells, P., Carrión, P.A., Tarjuelo, J.M., 2007. Model for analysis of energy efficiency at pumping stations, Tenth Inter-Regional conference on Water and Environment (Envirowat 2007). Nueva Delhi.
- Moreno et al., 2007b      Moreno, M.A., Planells, P., Carrión, P.A., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., 2007. New methodology to evaluate flow rates in on-demand irrigation networks. Irrigation and Drainage Engineering 133(4), 298-306.
- Moreno et al., 2007c      Moreno, M.A., Carrión, P.A., Planells, P., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., 2007. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. Biosystems Engineering 98(4), 479-486.

- Moreno et al., 2009 Moreno, M.A., Planells, P., Córcoles, J.L., Tarjuelo, J.M. Carrión, P.A., 2009. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosystems Engineering* 102(1), 95-105.
- Moreno et al., 2010 Moreno, M.A., Córcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., Ortega, J.F., 2010. Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation Schedule. *Biosystems Engineering* 107, 349-363.
- Moreno et al., 2011 Moreno, M.A., Planells, P., Córcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., 2011. Regulación óptima de estaciones de bombeo mediante la medida de presión en nudos representativos de la red de riego. XXIX Congreso Nacional de Riegos. Comunicación C-09.
- O'Neill et al., 2014 O'Neill, A., Sen Gupta, B., Phillips, D.H., 2014. Distribution of arsenic and risk assessment of activities on a golf course fertilised with arsenic-containing *Ascophyllum nodosum* seaweed. *Science of the Total Environment* 482, 252-259.
- Pardo et al., 2013 Pardo, M.A., Manzano, J., Cabrera, E., Garcia-Serra, J., 2013. Energy audit of irrigation networks. *Biosystems Engineering* 115(1), 89-101.
- Pérez et al., 1996 Pérez, R., Andreu, M., Izquierdo, J., 1996. Diseño de redes de distribución. Curso de ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. 653-727.
- Planells et al., 2001 Planells, P., Tarjuelo, J.M., Ortega, J.F., Casanova, M.I., 2001. Design of water distribution networks for on-demand irrigation. *Irrigation Science*, 20, 189-201.

- Planells et al., 2005 Planells, P., Carrión, P.A., Ortega, J.F., Moreno, M.A., Tarjuelo, J.M., 2005. Pumping selection and regulation for water distribution networks. *Irrigation and Drainage Engineering* 131(3), 273-281.
- Planells et al., 2007 Planells, P., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., 2007. Optimization of irrigation water distribution networks, layout included. *Agricultural Water Management* 88, 110-118.
- Pulido-Calvo et al., 2003 Pulido-Calvo, I., Roldán, J., López-Luque, R., Gutiérrez-Estrada, J.C., 2003. Water delivery planning considering irrigation simultaneity. *Irrigation and Drainage Engineering* 129(4), 247-255.
- Reca et al., 2014 Reca, J., Garcia-Manzano, A., Martinez, J., 2014. Optimal Pumping Scheduling for Complex Irrigation Water Distribution Systems. *Water Resources Planning and Management* 140(5), 630-637.
- Rodríguez-Díaz et al., 2007 Rodríguez Díaz, J.A., Knox, J.W., Weatherhead, E.K., 2007. Competing demands for irrigation water: golf and agricultura in Spain. *Irrigation and Drainage* 56, 541-549.
- Rodríguez-Díaz et al., 2008 Rodriguez Díaz, J.A., Camacho Poyato, E., López Luque, R., Pérez Urrestarazu, L., 2008. Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts: an application in Spain. *Agricultural Systems* 96, 250-259.
- Rodríguez-Díaz et al., 2009 Rodríguez Díaz, J.A., López Luque, R. Carrillo Cobo, M.T., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., 2009. Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks. *Biosystems Engineering* 104, 552-561.

- Rossman, 1997                      Rossman, L.A., 1997. EPANET: User Manual. Risk Reduction Engineering Laboratory Office of Research and Development. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.
- Rossman, 2001                      Rossman, L.A., 2001. EPANET 2. Manual de Usuario. Traducción al español de Martínez Alzamora. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA.
- Sanz-Magallón, 2005              Sanz-Magallón, G., 2005. Aproximación al valor del agua utilizada en los campos de golf de las comarcas de Levante y Sureste. Estudios agrosociales y pesqueros 205, 99-123.
- Schouten, 2003                      Schouten, M., 2003. Development in the drought. The incompatibility of the Ebro Water Transfer with sustainable development in the southeast region of Spain. World Wildlife Fund. Spain.
- Silva et al., 2010                      Silva, D.D., de Oliveira, R.A., Melo, F.A.D., Pereira, O.G., Costa, L.C., 2010. Influence of irrigation depths the development and visual quality of the grass (*Paspalum notatum*). Acta Scientiarum-Technology 32(1), 43-48.
- Theocharis et al., 2006              Theocharis, M.E., Tzimopoulos, Ch.D., Yannopoulos, S.I., Sakellariou-Makrantonaki, M.A., 2006. Design of optimal irrigation networks. Irrigation Drainage 55, 21-32.
- Weatherhead et al., 2006              Weatherhead, E.K., Knox, J.W., de Vries, T.T., Ramsden, S., Gibbons, J., Arnell, N.W., Odoni, N., Hiscock, K., Sandhu, C., Saich, A., Conway, D., Warwick, C., Bharwani, S., Hossell, J., Clemence, B., 2006. Sustainable water resources: a framework for assessing adaptation options in the rural sector. Tyndall Centre Technical Report 44, Tyndal Centre for Climate Change Research.



5



**Publicaciones**



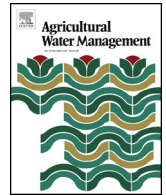




Contents lists available at [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

## Agricultural Water Management

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/agwat](http://www.elsevier.com/locate/agwat)



# Use of software to model the water and energy use of an irrigation pipe network on a golf course

J.F. García-González<sup>a,\*</sup>, M.A. Moreno<sup>b</sup>, J.M. Molina<sup>c</sup>, A. Madueño<sup>d</sup>, A. Ruiz-Canales<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Water and Energy for a Sustainable Agriculture, Engineering Department, Miguel Hernández University of Elche, Orihuela 03312, Spain

<sup>b</sup> Regional Center of Water Resources CREA, Albacete 02071, Spain

<sup>c</sup> Engineering and Agricultural Equipment Department, Technical University of Cartagena, Cartagena 30203, Spain

<sup>d</sup> University of Seville, Aerospace Engineering & Fluids Mechanical Department, Seville 41013, Spain

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Available online xxx

#### Keywords:

Pump  
Water scheduling  
Pump efficiency  
Energy efficiency  
Golf course

### ABSTRACT

Generally, most pressure irrigation systems require efficient management of water and energy, particularly in systems installed on golf courses. Golf courses have high water requirements throughout the year because the grass has to be maintained in optimum conditions for adequate play development and for aesthetic reasons. Thus, the duration and frequency of irrigation varies to obtain the optimum water supply. The primary objective of this paper is to study the improvement of irrigation management on a golf course by modelling the irrigation network and pumping station. The simulation results are related to the individual and simultaneous opening of sectors, the water and energy consumption, and the efficiency of the pumping station. Several water and energy consumption patterns have been obtained and quantified. These patterns are related to the opening of individual and simultaneous sectors in the golf course pipeline network. The results indicate that the water and energy consumption are increased with the simultaneous opening of sectors, but the efficiency and the irrigation time are decreased.

© 2014 Published by Elsevier B.V.

## 1. Introduction

Golf course irrigation systems are typical areas that demand water and energy for sports and other leisure purposes. In Spain, these systems are less important than agricultural systems (Rodríguez Díaz et al., 2007). Most advances in the research management of irrigation systems for golf courses are related to the maintenance of the grass, specifically regarding fertilization (O'Neill et al., 2014) and irrigation (Silva et al., 2010). However, not enough research has been completed about the specific tools for adequate water and energy management in golf course irrigation systems. These additional research topics can contribute to other advances that change the environmental perception and enhance public awareness about this sector.

Currently, several applied technologies can be further developed for water and energy management in golf courses irrigation systems. There is extensive research about water and energy consumption modelling in agricultural irrigation systems that can be

easily adapted to golf courses use. In this way, several alternatives for the reduction of water and energy consumption and the associated costs have been developed (Abadia et al., 2008; Moreno et al., 2007, 2009; Rodríguez Díaz et al., 2011; Jimenez-Bello et al., 2010; Bagirov et al., 2013). Some tools are related to the support of decision-making about investment in infrastructures (Khan et al., 2010), the management of pumping stations (Lamaddalena and Khila, 2013), the sustainability of the systems (Carrillo Cobo et al., 2014) and various other areas in energy management (Reca et al., 2014).

Furthermore, EPANET<sup>®</sup> (Rossman, 1999), is a public domain tool used for modelling the water distribution in pressurized irrigation networks, analysing the dynamic components (pressure, speed and pressure drop, among others) and the quality of the irrigation water. This model has been applied to many types of pipe networks (Cabrera-Bejar and Tzatchkov, 2012), water and energy demand scenarios (Mendez et al., 2013; Gorev and Kodzheshirova, 2013), calibrations and simulations (Mendez et al., 2013; Farina et al., 2014; Liu and Yu, 2013) and pumping stations (Bagirov et al., 2013). This last aspect of modelling the water and energy consumption in pumping stations (Arrouf and Ghabrou, 2007; Miron et al., 2013) has been additionally incorporated with alternative software like MATLAB<sup>®</sup> (matrix laboratory). Moreover, several applications for

\* Corresponding author at: Engineering Department, Miguel Hernández University of Elche, Orihuela 03312, Spain. Tel.: +34 966749639; fax: +34 966 74 97 18.  
E-mail address: [pogg.bigastro@gmail.com](mailto:pogg.bigastro@gmail.com) (J.F. García-González).

irrigation have been developed with this tool (Moreno et al., 2012). Again, there are currently no similar tools available specifically for golf course irrigation systems.

One of the main uses of these models and tools is the implementation in a SCADA (supervisory control and data acquisition) system. These devices are a system operating with coded signals over communication channels to control remote equipment (typically using one communication channel per remote station). The supervisory system may be combined with a data acquisition system by adding the use of coded signals over communication channels. This system combination may be used to acquire information concerning the status of the remote equipment for display or recording functions. With these devices, it is possible to remotely monitor, supervise and control the irrigation and pumping station systems on a golf course. The applications of the SCADA have been extended from only one sector to others, like in agriculture and sports. There are varied examples of SCADA use in the management of agriculture irrigation systems. Uses are related to decision making (Alminana et al., 2010), management of irrigation companies (Aguije et al., 2009), irrigation scheduling (Molina and Ruiz, 2010), optimal management of water resources (Sweigard, 2003; Gensler et al., 2009) and canal management (Figueiredo et al., 2013).

The objective of this paper is to study the employment of two software tools for the modelling of two systems in a golf course: the irrigation network and the pumping station. Firstly, the study addresses the adequate simultaneous opening of valves by commercial software based on the modelling of the pipeline network (mainly the distribution of the water levels, pressures and flows varying with demand conditions). Additionally, the optimal selection is developed, a selection that combines the pumps of the pumping station to minimize the energy consumption in the same golf course. In this case, the model calculates the efficiency of the pumping station of the golf course by considering the frequency of pumping station discharge during the irrigation season (Moreno et al., 2007). The use of these software tools is based on techniques applied previously in agricultural systems (Moreno et al., 2010; Rodríguez-Díaz et al., 2009; Planells et al., 2007). This methodology is partially based in EPANET<sup>®</sup>. Also presented are the implementation and results of water and energy demand and the consumption model of a pumping station based in MATLAB<sup>®</sup>. These techniques are adapted to an irrigation system in a case study of a golf course located in the Alicante province in the Valencian Community in Southeast Spain. Additionally, these tools can be integrated in a SCADA system used to automate and remotely control systems for irrigation network management. These technologies enable the real-time optimization of water and energy consumption (Molina et al., 2011).

## 2. Materials and methods

### 2.1. Study area

This study has been developed for a golf course located at the Alicante province in Southeast Spain. This golf course has been in operation since 1998. The annual average rainfall for the area is 237.06 mm and the annual average evapotranspiration ( $ET_0$ ) is 1042.65 mm; therefore, the annual contribution of water irrigation to the golf course is 805.59 mm (the data were acquired from a weather station located on the golf course). The irrigation water for the golf course comes from a wastewater treatment facility associated with the residential complex at the course. The golf course lakes are used as reservoirs.

The case study is of a golf course with 18 holes and a total area of 45 ha, including the driving range. The irrigated area is roughly 40 ha, depending on the playing area (the green, the ante green, the

tee, the fairway and the rough), the time of year, and the duration and frequency of irrigation.

The irrigation system is a mesh network of pipelines with diversions to mesh subnetworks of emerging sprinklers. The minimal working water pressure is  $3.5 \text{ kg cm}^{-2}$ . In this system, 1785 sprinklers of 30 varied models are used.

The pumping station consists of four pumps that supply a maximum water pressure of  $9 \text{ kg cm}^{-2}$ , with synchronized flows of 30, 110, 160 and  $220 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . The operational sequence and the number of working pumps depend on the water demand.

To activate the sprinklers, a weather station with remote control and radiofrequency is included in the system. The activation of the sprinklers depends on the evapotranspiration demands as monitored by a central irrigation programmer. This programmer controls the time for the start of irrigation in every sprinkler group. Sprinklers are interconnected in groups of two or three units. Every group of sprinklers is a sector that is automatically and simultaneously opened. There are three timers that control the beginning of the irrigation cycle for each sector. Every timer controls 17 sectors by means a of 24 V signal. One timer is used to command the sectors that control the irrigation in the tee and greens areas. The other timers are used to send the signal for the beginning of the irrigation process to the sectors controlling fairway irrigation. The programmer continuously measures the flow of the sprinklers. Depending on this flow, the pumps are activated. While the irrigation demand is increasing, the pumps are activating with the objective of maintaining the pressure of the hydraulic system at the constant value of  $7.5 \text{ kg cm}^{-2}$  (working pressure). When there is demand on the system, the pressure decreases under the working pressure. At this moment, the timer waits for 30 s to check if the initial pressure is reached. If, after the waiting period, the pressure in the network is not reached, the pumps are automatically started by the previously cited order. In this case, the inner pressure of the network is maintained. When the pressure of the network surpasses the working pressure, the pumps are turned off in the inverse order. Again, the working pressure is reached. With these pressure variations, there is obvious variation of the energy demand of the electric network. Additionally, an associated energy cost for the energy demand is included in this study.

Before irrigation starts, all groups of sprinklers (sectors) are kept closed by the computer that manages the irrigation. The role of pump #1, the jockey pump, is to pressurize the irrigation network. When a signal is sent to the pump to open a sector and the head pressure is less than  $7.2 \text{ kg cm}^{-2}$ , pump #2 is started. This second pump includes a variable frequency drive (VFD). The VFD device is installed to maintain the head pressure of  $7.5 \text{ kg cm}^{-2}$ . If this pump is not capable of maintaining a minimal head pressure of  $6.9 \text{ kg cm}^{-2}$ , then pump #3 is started at 100% capacity. Thanks to the VFD, the pressure of  $7.5 \text{ kg cm}^{-2}$  is reached in the irrigation system. If the system needs maximum flow, pump #3 and pump #4 start simultaneously.

Additional modelling data gathered pertains to the energy and water consumption. The administrative staff of the golf course has provided monthly energy and water data and the corresponding costs for the study period. Firstly, the monthly energy consumption and the total cost of each invoice during this period are obtained. Additionally, the monthly water requirements of the irrigation system of the golf course, obtained as the difference between evapotranspiration ( $ET_0$ ) and rainfall (P), are collected. These data are obtained from the weather station located on the golf course.

### 2.2. Energy analysis of the optimal point of the pumping station operation

The modelling of the pumping station was made with software, Model for Analysis of Energy Efficiency at Pumping Stations

(MAEEB®), from the Centro Regional de Estudios del Agua de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). This software is based in the MATLAB® software, a high level language and an interactive environment for numeric calculation, display and programming. Depending on the demand on the irrigation system, varied conditions of the supply to the pumps were simulated. The conditions of the pumping system are described in Section 2.1. From these data, the efficiency of the pumping station is obtained, depending on the flow ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ) and the pressure (m) conditions. The initial pump acts as jockey pump, which sustains a small flow to maintain the network pressure. The presented scenario of determined consumption is for maximum demand and minimal sectoring.

According to the methodology of Moreno et al. (2007), the obtained values of flow and pressure are used to obtain the average absorbed power. These observations take into account the frequency of discharge levels and the relationship between discharge and the pumping station efficiency. The values of absorbed power are transformed into cost values by using the data obtained for energy costs for the study period.

### 2.3. Hydraulic analysis of the optimal working point of the pipeline network

The employed software for the dynamic hydraulic analysis of the network is EPANET 2.0® (Rossman, 1999). The obtained hydraulic data in every node and pipe of the network (flow, pressure, velocities, head losses) were calculated from the topology of the network and several parameters of the sprinklers (discharge curve and service conditions) and pipes (inner diameter). The scenarios of the irrigation network before and after grouping sectors have been compared using the EPANET 2.0® software. After the comparison, the obtained values of demand at the beginning of the pipeline network (flow and pressure) in these scenarios were entered in the MAEEB® software. With these values, a new, three-dimensional graph of the efficiency of the pumping station is obtained. This step was manually performed with groups of similar sectors (tees with tees, greens with greens, etc.).

The first restraint for modelling is the lowest pressure for each sector (as described in Section 2.1). In this case study, modelling restraint occurs when the lowest pressure in the most unfavourable sprinkler is  $3.5 \text{ kg cm}^{-2}$ , independent of the head pressure and flow. With this restraint, the sprinklers that are in the operative range of the pumping station location have corrective measures (pressure regulation, valves and changes in the system) applied to the sectors that are out of range. These are included in the model. The function of the modelling software is to adapt the pressure and flow of the network nodes (obtained with EPANET 2.0®) to the high pressure and work flow of the pumping station ( $9 \text{ kg cm}^{-2}$  and  $220 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ).

The MAEEB® software calculates the suitable combination of operational pumps in the pumping station for maintaining the proper conditions of the pipeline network.

By the same method described in Section 2.2, the obtained flow and pressure values are employed to acquire the average absorbed power and corresponding cost values (Moreno et al., 2007).

## 3. Results and discussion

### 3.1. Water and energy costs and consumption

The modelling period occurred from February 2012 to January 2013. In Table 1, the monthly values of energy consumption (kW) for the study period are presented, in addition to the corresponding monthly energy consumption values. These data were obtained from the invoiced energy bills from the energy supply company. In the same table, the monthly cost of the energy ( $\text{€ kW}^{-1}$ ) is shown in the third column. The average value of these last data is used to calculate the final energy costs in the proposed scenarios for water and energy demand. During the previously cited period, the total electrical consumption was 146,509 kW, with an energy cost of 23,255.17 €.

Additionally, the percentage of the monthly energy cost is presented in Table 1. The contracted energy, noted as 'Energy', is the fixed, billable cost and corresponds to the supplier-contracted capacity for the billing period. The power consumption, noted as 'Power' in Table 1, is the power required by the electrical equipment. The power consumption is the main term for the energy cost value; additional terms are used to determine this value. In the term 'Taxes', the value added tax (VAT) for energy consumption is included. Finally, 'Others' is a term devoted to other costs, such as equipment rentals and tolls.

As presented in Table 1, the monthly energy cost per power unit varies along the period of study: the maximum cost per power unit for the period was reached during months with a low irrigation water consumption. Meanwhile, the minimum value of the monthly energy cost per unit power was obtained during the high consumption period. These deviations are due to the variations of cost distribution because, while the fixed costs (energy) are greater and variable costs (power) are lower, the costs per power unit are also more expensive. The corresponding tax increase is due to the variation of the value added tax (VAT), from 18% to 21%, on energy produced in Spain during September 2013.

The highest value of energy consumption was produced during July, with 23,709 kW at a cost of 3251.89 €; the lowest value of consumption was during February, with 3434 kW consumed at a cost of 985.25 €. These values are determined by the weather station monitoring results and by the grass irrigation scheduling for the

**Table 1**  
Consumption, costs and distribution of energy costs during the study period.

Period	Consumption [kW]	Invoicing [€]	Costs [€ kW <sup>-1</sup> ]	Distribution of invoiced costs			
				Energy	Power	Taxes	Others
Feb '12	3,434	985.25	0.287	29.10%	48.72%	19.23%	2.94%
Mar '12	6,643	1,368.81	0.206	23.86%	54.75%	19.27%	2.12%
Apr '12	11,541	1,878.84	0.163	19.15%	60.00%	19.30%	1.54%
May '12	19,809	2,812.28	0.142	14.87%	64.48%	19.31%	1.34%
Jun '12	12,225	1,793.62	0.147	14.41%	65.09%	19.32%	1.18%
Jul '12	23,709	3,251.89	0.137	11.43%	68.35%	19.33%	0.89%
Aug '12	23,618	3,119.87	0.132	10.71%	68.65%	19.33%	1.30%
Sep '12	20,475	2,790.79	0.136	13.37%	63.86%	21.32%	1.46%
Oct '12	9,147	1,622.82	0.177	20.75%	55.47%	21.27%	2.50%
Nov '12	4,714	1,190.24	0.252	27.55%	46.85%	21.21%	4.39%
Dec '12	6,404	1,429.11	0.223	28.97%	47.28%	21.25%	2.50%
Jan '13	4,790	1,011.65	0.211	23.82%	52.81%	21.27%	2.09%
Total	146,509	23,255.17					



**Table 2**  
Rainfall (P), evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) and water needs during the study period.

Period	P [mm]	ET <sub>0</sub> [mm]	Water needs [mm]
Feb '12	3.81	58.29	54.48
Mar '12	20.33	83.45	63.12
Apr '12	9.91	109.09	99.18
May '12	0.00	131.79	131.79
Jun '12	3.31	140.44	137.13
Jul '12	0.26	137.86	137.60
Aug '12	1.27	124.64	123.37
Sep '12	40.65	103.23	62.58
Oct '12	26.68	74.20	47.52
Nov '12	57.40	42.13	-15.27
Dec '12	1.78	41.48	39.70
Jan '13	11.70	43.56	31.86
Total	177.10	1090.16	913.06

golf course, as described in the next paragraph. The annual average energy consumption price was 0.159 € kW<sup>-1</sup>, and the highest price was 0.287 € kW<sup>-1</sup> (corresponding to February 2012). The lowest consumption price was 0.132 € kW<sup>-1</sup> (corresponding to August 2012).

The monthly rainfall quantity (P) and the evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) during the studied period are presented in Table 2. The total annual rainfall was 177.10 mm, and the accumulated evapotranspiration was 1090.16 mm. Monthly water requirements, 'water needs,' are also included in Table 2. These values are obtained as the difference between the previous parameters described in Section 2.1. The total water needs for the golf course were 913.06 mm m<sup>-2</sup> (Table 1).

### 3.2. Efficiency of the pumping station

Based on Section 2.2, the efficiency curve of the pumping station with a three-dimensional surface graph is presented (Fig. 1). The modelling software, MAEEB<sup>®</sup>, was used to produce a graph of the technical data for the four pumps in the pumping station (Table 3). The software was also used to illustrate the relationship between pressure, flow and the hydraulic efficiency of the entire pumping station system. The maximum values of the three-dimensional surface correspond to maximum efficiencies of every pump in the pumping station.

As observed, the curve shows three convex zones, each corresponding to the maximum efficiencies determined by the synchronicity of pumps #2, #3 and #4. Pump #1 is excluded of this curve because this pump is used for maintaining the irrigation network pressure. The maximum efficiency value of the pumping station is 76.87%, obtained at a pressure value of 8.3 kg cm<sup>-2</sup> and a flow of 78 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> by pump #2. Moreover, in Fig. 1, there are two additional relative maximum values: one corresponds to the combination of pumps #2 and #3, and the second corresponds to the combination of pumps #2, #3 and #4.

### 3.3. Sequencing the opening of sectors

The main objective of irrigation scheduling on the golf course is to maximizing golfer playtime. To this end, irrigation is typically

**Table 3**  
Technical characteristics of the pumps.

Pump number	1	2	3	4
Q <sub>nominal</sub> [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]	17	90	85.9	90
H <sub>nominal</sub> [m]	90	89.9	104	65.3
P <sub>nominal</sub> [kW]	7.5	30	37	22
Another data of interest	Jockey pump	Variable frequency drive	Starter	Starter

**Table 4**  
Pump station in the state of individual opening of sectors.

Sector	Flow [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]	Pressure [kg cm <sup>-2</sup> ]	Efficiency [%]	Power EB [kW]
10.1	30.96	3.17	36.73	7.29
10.2	30.33	3.76	43.17	7.21
13.1	25.71	3.51	35.75	6.89
13.2	31.49	3.77	43.99	7.35
15.1	55.70	4.71	64.65	11.05
Total	174.19			

performed overnight. Therefore, while water needs increase, the effective daily irrigation amount decreases. During the summer, irrigation must be performed simultaneously in several sectors to minimize the irrigation time. The period for the greatest lawn water needs coincides with the minor night period (8–9 h). This implies that several sectors (groups of sprinklers) need to be opened simultaneously.

To simultaneously open several sectors, the following assumptions must be made: the highest head pressure is 7.5 kg cm<sup>-2</sup>, the lowest pressure value in the more unfavourable sprinkler of the sector must be 3.5 kg cm<sup>-2</sup> and the maximum flow through the main pipe is 220 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Using these restrictions, a modelling of the irrigation pipeline network of the golf course has been developed using EPANET 2.0<sup>®</sup>. With this software, several scenarios were manually generated for energy and water consumption in the irrigation pipeline network model. To determine the energy efficiency in the pumping station with the previously generated scenarios in the pipeline network, MAEEB<sup>®</sup> was also used.

Various generated scenarios depend on the opening (individual or grouped) of the sectors. In all the scenarios, the energy efficiency of the pumping station was calculated. Additionally, the values of flow, pressure and pumping head were obtained in the corresponding scenario.

Tables 4 and 6 present various results of individual sector openings. The results of the simultaneous grouping of several sectors are presented in Tables 5 and 7. In this case, the tee areas (the areas at the beginning of a hole from which the player takes the first stroke) of the holes, 10, 13 and 15, are analyzed. Five sectors are evaluated and the simultaneous irrigation results of the five sectors are shown in Table 5. For this scenario, several tees are simultaneously irrigated.

With this grouping (Table 5), water consumption has been increased by 7.19% (12.52 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>), but the irrigation time is reduced by 80%. Additionally the global efficiency reached a value of 66.72%. In the case of the individual opening of sectors (Table 4), the efficiency is varying from 35.75% to 64.65%. These data should be evaluated more thoroughly, both quantitatively and qualitatively, to identify energy and economic values that provide definitive results regarding the viability of a future, large-scale implementation.

On the other hand, there are sector groupings that cause decreased efficiency of the pumping station. These results are presented in Table 6 (the separated irrigation results) and Table 7 (the grouped irrigation results). In this case, water consumption is increased in 2.94% (3.43 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>), but irrigation time is reduced to 50%. The efficiency of the pumping station is decreased to

**Table 5**  
Pump station in the state of joint opening of sectors (10.1, 10.2, 13.1, 13.2 & 15.1).

Flow [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]	Pressure [kg cm <sup>-2</sup> ]	Efficiency [%]	Power EB [kW]
186.71	5.23	66.72	39.87

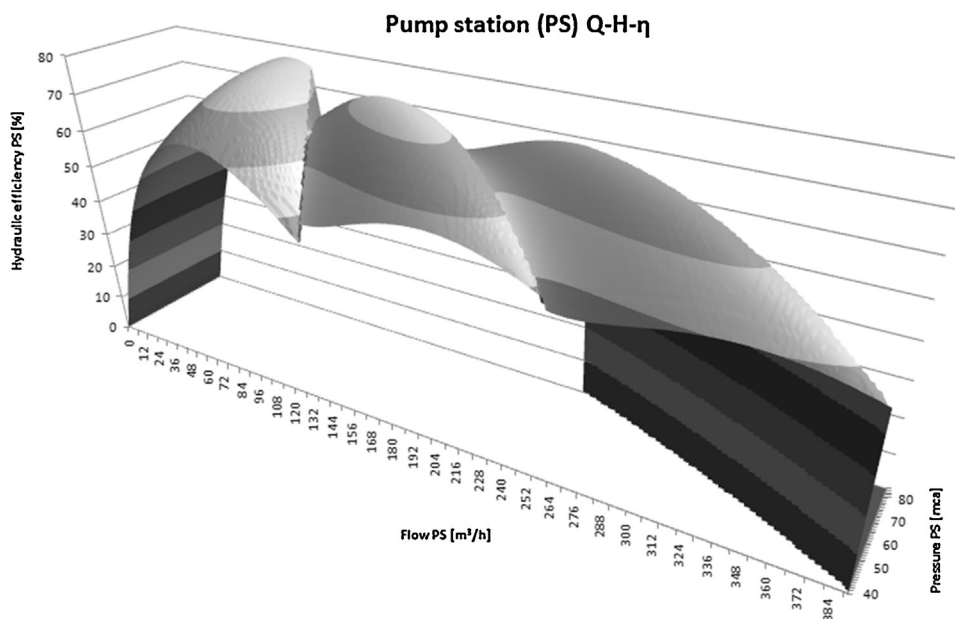


Fig. 1. Efficiency of the pumping station depending on the conditions of flow and pressure.

**Table 6**  
Pumping station in the state of individual opening of sectors.

Sector	Flow [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]	Pressure [kg cm <sup>-2</sup> ]	Efficiency [%]	Power EB [kW]
6.1	60.37	6.26	71.55	14.40
7.1	56.19	5.63	68.27	12.63
Total	116.56			

67.33%; meanwhile, for separated irrigation, the efficiency varies from 71.55% to 68.27%.

The drive flow near the pumping station has the highest flow during the simultaneous irrigation of sectors. In this case, the minimal pressure increases in 4 sectors over 3.5 kg cm<sup>-2</sup>. For this reason, a highest value of the discharge of the sprinklers will be obtained.

With these data, combined with the simulation of a 6-min irrigation time per sector, two scenarios were explored. For the individual sectors, the total time to irrigate the 5 sectors is 30 min. The total applied water volume is 17,414 m<sup>3</sup>. For simultaneous irrigation, the irrigation time is 6 min and total volume is 18,671 m<sup>3</sup>. With this simultaneous opening, it is possible to save 24 min of irrigation time; although, 1257 m<sup>3</sup> or 7.22% more water is used.

During the computer modelling process, several results indicate that more irrigation time decreases the pumping station efficiency. The results of this modelling can be observed in sectors 6.1 and 7.1 (Tables 6 and 7).

As observed, the simultaneous sector opening includes cutting the irrigation time in half, increasing the water volume applied (0.343 m<sup>3</sup>, +2.94%) and decreasing the pumping station efficiency, as related to the case of individual opening and irrigating for 6 min per sector. These observations can be extended to different irrigation times and groups.

**Table 7**  
Pump station in the state of joint opening of sectors (6.1 & 7.1).

Demand [m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> ]	Pressure [kg cm <sup>-2</sup> ]	Efficiency [%]	Power EB [kW]
119.99	7.05	67.33	34.22

#### 4. Conclusions

The proposed tools for modelling the water and energy consumption of the pumping station (MAEEB<sup>®</sup> and EPANET<sup>®</sup>) have been demonstrated to be adequate for determining the behaviour of an irrigation pipelines network. Primary results indicate that water and energy consumption are both increased with the simultaneous opening of sectors, but the efficiency and the irrigation time are decreased. This sector alternative can extend the life of the pumps and preserve their operation, an increment of water and energy consumption in a golf course. Based on the presented software, new proposals for alternative grouping of sectors have to be researched.

As a result of the clusters of subnets, reducing the total run time decreases the power consumption, especially when dealing with 'Power' at checkout. In contrast, when reorganizing the sub-networks and depending on the most adverse sprinkler in the subnetwork, the remaining sprinklers will apply more water that theoretically calculated, so consumption increases slightly.

Economic saving is obtained with the reduction of the irrigation time. An economic evaluation regarding increasing the volume of water consumption needs further development.

A small increase in water consumption allows for a considerable reduction of the irrigation times by grouping the irrigation sectors together. In this case, there is not a stable grouping pattern, based on efficiency.

Because of the complexity and variability of the Spanish electrical pricing policy, it is very difficult to establish an economical profitability for the middle- and long-term periods. For short-time periods, this profitability can be obtained with the reduction of the irrigation times; in some cases, 50% profitability can be reached.

There is not a fixed pattern for the pumping station operation. For this reason, it is necessary to obtain new modelling for simultaneous opening instructions, depending on the sectors to obtain a final, highly efficient model.

#### Acknowledgements

Authors are grateful to the received collaboration from Teleanatura EBT, S.L. in the data gathering and technical support.

## References

- Abadia, R., Rocamora, C., Ruiz, A., Puerto, H., 2008. Energy efficiency in irrigation distribution networks. I: Theory. *Biosyst. Eng.* 101 (1), 21–27.
- Aquije, P., Huaman, D., Boada, J., Tentaya, M., Chauca, A.M., 2009. Automated control system of irrigation for SMEs in real time. In: 2009 International Conference on Electrical Communications and Computers, pp. 35–40.
- Alminana, M., Escudero, L.F., Landete, M., Monge, J.F., Rabasa, A., Sanchez-Soriano, J., 2010. WISCHE: a DSS for water irrigation scheduling. *OMEGA Int. J. Manag. Sci.* 38 (6), 492–500.
- Arrouf, M., Ghabrou, S., 2007. Modelling and simulation of a pumping system fed by photovoltaic generator within the Matlab/Simulink programming environment. *Desalination* 209 (1–3), 23–30.
- Bagirov, A.M., Barton, A.F., Mala-Jetmarova, H., Al Nuaimat, A., Ahmed, S.T., Sultanova, N., Yearwood, J., 2013. An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling. *Math. Comput. Model.* 57 (3–4), 873–886.
- Cabrera-Bejar, J.A., Tzatchkov, V.G., 2012. Modeling water distribution networks with intermittent water supply. *Tecnol. Cienc. Agua* 3 (2), 5–25.
- Carrillo Cobo, M.T., Camacho Poyato, E., Montesinos, P., Rodriguez Diaz, J.A., 2014. New model for sustainable management of pressurized irrigation networks. Application to Bembezar MD irrigation district (Spain). *Sci. Total Environ.* 473–474, 1–8.
- Farina, G., Creaco, E., Franchini, M., 2014. Using EPANET for modelling water distribution systems with users along the pipes. *Civil Eng. Environ. Syst.* 31 (1), 36–50.
- Figueiredo, J., Botto, M.A., Rijo, M., 2013. SCADA system with predictive controller applied to irrigation canals. *Control Eng. Pract.* 21 (6), 870–886.
- Gensler, D., Oad, R., Kinzli, K.D., 2009. Irrigation system modernization: case study of the Middle Rio Grande Valley. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 135 (2), 169–176.
- Gorev, N.B., Kodzhespirova, I.F., 2013. Noniterative implementation of pressure-dependent demands using the hydraulic analysis engine of EPANET 2. *Water Resour. Manag.* 27 (10), 3623–3630.
- Jimenez-Bello, M.A., Alzamora, F.M., Soler, V.B., Ayala, H.J.B., 2010. Methodology for grouping intakes of pressurized irrigation networks into sectors to minimize energy consumption. *Biosyst. Eng.* 105 (4), 429–438.
- Khan, S., Mushtaq, S., Chen, C., 2010. A decision support tool for irrigation infrastructure investments. *Irrig. Drain.* 59 (4), 404–418.
- Lamaddalena, N., Khila, S., 2013. Efficiency-driven pumping station regulation in on-demand irrigation systems. *Irrig. Sci.* 31 (3), 395–410.
- Liu, J., Yu, G.P., 2013. Iterative methodology of pressure-dependent demand based on EPANET for pressure-deficient water distribution analysis. *J. Water Resour. Plan. Manag. ASCE* 139 (1), 34–44.
- Mendez, M., Araya, J.A., Sanchez, L.D., 2013. Automated parameter optimization of a water distribution system. *J. Hydroinf.* 15 (1), 71–85.
- Miron, S.A., Alexandrescu, A., Luca, M., 2013. Optimal Pump Scheduling to Reduce the Operating Costs. *Innovative Manufacturing Engineering. Book Series Applied Mechanics and Materials*, vol. 371., pp. 677–681.
- Molina, J.M., Ruiz, A., 2010. Development of a SCADA system for irrigation programming and educational use in agriculture. In: *Edulearn 10: International conference on education and new learning technologies*.
- Molina, J.M., Ruiz-Canales, A., Jiménez, M., Soto, F., Fernández-Pacheco, D.G., 2011. SCADA platform combined with a scale model of trickle irrigation system for agricultural engineering education. *Comp. Appl. Eng. Educ.*, <http://dx.doi.org/10.1002/cae.20571>.
- Moreno, M.A., Carrión, P.A., Planells, P., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., 2007. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosyst. Eng.* 98 (4), 479–486.
- Moreno, M.A., Planells, P., Córcoles, J.L., Tarjuelo, J.M., Carrión, P.A., 2009. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosyst. Eng.* 102 (1), 95–105.
- Moreno, M.A., Córcoles, J.L., Tarjuelo, J.M., Ortega, J.F., 2010. Energy efficiency of pressurized irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. *Biosyst. Eng.* 107 (4), 349–363.
- Moreno, M.A., Medina, D., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., 2012. Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. *Agric. Water Manag.* 107, 112–121.
- O'Neill, A., Sen Gupta, B., Phillips, D.H., 2014. Distribution of arsenic and risk assessment of activities on a golf course fertilised with arsenic-containing *Ascophyllum nodosum* seaweed. *Sci. Total Environ.* 482, 252–259.
- Planells, P., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M., 2007. Optimization of irrigation water distribution networks, layout included. *Agric. Water Manag.* 88, 110–118.
- Reca, J., Garcia-Manzano, A., Martinez, J., 2014. Optimal pumping scheduling for complex irrigation water distribution systems. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 140 (5), 630–637.
- Rodriguez Diaz, J.A., Knox, J.W., Weatherhead, E.K., 2007. Competing demands for irrigation water: golf and agriculture in Spain. *Irrig. Drain.* 56, 541–549.
- Rodriguez-Diaz, J.A., López Luque, R., Carrillo Cobo, M.T., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., 2009. Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurized irrigation networks. *Biosyst. Eng.* 104, 552–561.
- Rodriguez Diaz, J.A., Camacho Poyato, E., Blanco Pérez, M., 2011. Evaluation of water and energy use in pressurized irrigation networks in southern Spain. *J. Irrig. Drain. Eng.* 137 (10), 644–650.
- Rossman, L.A., 1999. Computer models/EPANET. In: Mays, L. (Ed.), *Water Distribution Systems Handbook*. McGraw-Hill companies, Inc., New York, NY (Chapter 12).
- Silva, D.D., de Oliveira, R.A., Melo, F.A.D., Pereira, O.G., Costa, L.C., 2010. Influence of irrigation depths the development and visual quality of the grass (*Paspalum notatum*). *Acta Sci.-Technol.* 32 (1), 43–48.
- Sweigard, J., 2003. Irrigation District Automates for Resource Management. *Water & Wastewater Instrumentation Symposium. Book Series Technical Papers of ISA*, vol. 448., pp. 22–26.

6

**Comunicaciones a Congresos**





## **Empleo de herramientas software de optimización del uso del agua para la automatización y el telecontrol de la red de riego de un campo de golf**

J.F. García-González<sup>1</sup>, M.A. Moreno<sup>2</sup>, J.M. Molina<sup>3</sup>, A. Madueño<sup>4</sup>, M. Ferrández-Villena<sup>1</sup> y A. Ruiz-Canales<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Crtra. De Beniel, km 3,2, 03312 Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. Departamento de Ingeniería. EPSO. Agua y Energía para una Agricultura Sostenible (AEAS).

<sup>2</sup>Crtra. De las Peñas, km 3,2, 02071, Albacete. Universidad de Castilla-La Mancha. Centro Regional de Estudios del Agua (CREA).

<sup>3</sup>Campus Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia). Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de Investigación en Ingeniería Agromótica y del Mar. ETSIA.

<sup>4</sup>Crtra. De Utrera, km 1, 41013 Sevilla. Universidad de Sevilla. Grupo de Investigación AGR-126 Mecanización y Tecnología Rural. ETSIA.

**Palabras Clave:** irrigación, EPANET, eficiencia, ahorro de agua.

### **Resumen**

**Las necesidades hídricas de un campo de golf a lo largo del año son elevadas debido a que hay que mantener el césped en condiciones óptimas para el correcto desarrollo del juego, junto al nivel estético del mismo. Dichas necesidades hídricas varían en función de la época del año y de la zona del campo, por lo que se varía la duración y frecuencia de los riegos para conseguir el aporte óptimo.**

**Un campo de golf tipo, de 18 hoyos, tiene una extensión media de 50 ha, en donde el número de aspersores ronda los 1.500, por lo que se hace necesaria una correcta sincronización en la apertura/cierre de los mismos, para conseguir una optimización del riego.**

**El objetivo del estudio es el desarrollo de una metodología de trabajo y la obtención de una secuenciación en la apertura/cierre de aspersores en donde el consumo de agua esté optimizado, empleando programas informáticos (EPANET®) para generar los modelos de las diversas demandas hídricas que se dan a lo largo del año. Para ello se trabaja con un caso de estudio de un campo de golf del sur de la Comunidad Valenciana. Adicionalmente se describen los elementos de automatización y telecontrol asociados a estas herramientas para la apertura y cierre de electroválvulas según la demanda generada por el modelo. Finalmente se muestran algunos resultados de las simulaciones realizadas y los ahorros potenciales de consumo de agua conseguidos al emplear esta herramienta.**

### **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

En toda instalación de riego es importante una correcta gestión de los recursos hídricos (Rodríguez-Díaz et al., 2011), para optimizar el uso de un bien escaso y preciado, haciéndose más importante dicha gestión en los campos de golf, en donde suponen una importante partida económica, además de que su optimización en cuanto a dosis y frecuencia permitirá un correcto desarrollo del juego.

En España hay más de 420 campos de golf en funcionamiento actualmente, 21 de los cuales están en la provincia de Alicante. De ellos, hay 8 situados en la zona sur (Vega Baja del Segura), 4 en el centro (L'Alacantí y Baix Vinalopó), 8 en el norte (Marina Alta y Marina Baixa) y 1 en el interior (Alt Vinalopó), no pudiéndose hablar de condiciones agrometeorológicas homogéneas, sobre todo entre la zona sur y centro con la zona de interior y norte.

El campo objeto de estudio se encuentra en la zona central de la provincia y necesita unos aportes de agua del orden de  $800 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ . Esta cantidad, en una zona deficitaria como ésta, hace que sea necesario optimizar el uso del agua para reducir los costes y maximizar el beneficio.

La presente comunicación tiene como objetivo la descripción de los fundamentos y la metodología de trabajo empleados para establecer el punto óptimo de funcionamiento de un sistema de riego basadas en técnicas aplicadas previamente en instalaciones agrícolas (Moreno et al., 2010; Rodríguez-Díaz et al., 2009; Planells et al, 2007). Estas técnicas se adaptaron a la instalación de riego de un campo de golf en la provincia de Alicante.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se está realizando en un campo de golf de la provincia de Alicante en funcionamiento desde 1998, que presenta una pluviometría media anual de 237,06 mm, y una evapotranspiración (ET) media anual de 1.042,65 mm. Ambos valores se obtuvieron a partir de los datos registrados por la propia estación meteorológica de la instalación deportiva. Los aportes de agua anuales en forma de riego vienen siendo de 805,59 mm.

El campo posee 18 hoyos, más zona de prácticas, con una extensión total de 45 ha, de las cuales están siendo regadas hasta 40 ha, ya que dependiendo de la época del año y la zona de juego de cada hoyo (*green*, *antegreen*, *tee*, *fairway* y *rough*) varía la duración y frecuencia de riego.

Desde el punto de vista de la topología, se trata de una red mallada con derivaciones a subredes malladas de aspersores emergentes, con una presión mínima de trabajo de  $3,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ . La instalación incluye un total de 1785 aspersores de 30 modelos diferentes.

La estación de bombeo se compone de 4 bombas, que suministran una presión máxima de  $7,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ , con unos caudales sincronizados de 30, 110, 160 y  $220 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ .

El software empleado para el análisis de la red es EPANET 2.0<sup>®</sup> (Rossman, 2001), donde, a partir de la topología de la red y ciertas características de los aspersores (curva de descarga y cota) y de la red (diámetros interiores) resultan datos de la distribución del agua por la red (caudales, presiones, velocidades, pérdidas de carga).

La primera consigna que se utiliza es que la presión mínima en el aspersor más desfavorable de cada subsector sea de  $3,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ , independientemente de la presión y caudal en cabecera, para conocer cuales están dentro del rango operativo de la estación de bombeo, y posteriormente se aplican medidas correctoras en el modelo a los subsectores que quedan fuera de rango, para intentar, en la medida de lo posible, adecuar la instalación ya existente a la presión y caudal de trabajo máximo de la estación de bombeo,  $7,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  y  $220 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observan los resultados la primera consigna, en donde se obtienen resultados fuera del rango operativo de la estación de bombeo (García-González et al., 2013), pero que son necesarios a la hora de evaluar las medidas correctoras. Se distinguen 4 tipos de puntos:

Presión de consigna menor de  $7,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  (círculos): el subsector se encuentra dentro de las consigna de presión y caudal de la estación de bombeo.

Presión de consigna entre  $7,5$  y  $12,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  (cuadrados): el sector se encuentra fuera de rango (de presión y caudal), pero realizando cambios en los diámetros de las

conducciones que unen la red mallada primaria con el subsector mallado de aspersores se puede conseguir que queden dentro del rango.

Presión de consigna entre 12,5 y 25 kg·cm<sup>-2</sup> (rombos): el sector se encuentra fuera de rango, y los cambios necesarios serían referentes a la topología de la red.

Presión de consigna mayor de 25 kg·cm<sup>-2</sup> (triángulos): el sector se encuentra fuera de rango, y se precisan grandes modificaciones, cuya solución puede ser más compleja que las anteriores.

Los subsectores con los que se ha continuado trabajando son los de presiones de consigna entre 7,5 y 12,5 kg·cm<sup>-2</sup>, ya que es la solución, a priori, más sencilla y económicamente factible de alcanzar, que es cambiar la conducción que une la red mallada primaria con la red mallada de aspersores.

En la Tabla 1 se observan los cambios de presión y caudal en cabecera y en los aspersores de un subsector, en este caso el *tee* del hoyo 11, tras pasar de un diámetro nominal de 63 mm a 75 mm. Puede observarse como la presión en la estación de bombeo disminuye, el caudal aumenta, mientras que en los aspersores la presión y el caudal aumentan, resultados lógicos tras el aumento de la sección interna de la conducción.

Agronómicamente, realizar este cambio en las conducciones permite optimizar el uso del agua al aplicar la dosis correcta de riego, permitiendo un correcto desarrollo fisiológico de las cespitosas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se ha podido observar, el uso de software específico para el modelado de redes, en este caso EPANET 2.0<sup>®</sup>, permite auditar de forma sencilla las condiciones de las redes de riego de los campos de golf, y dar un uso más eficiente y optimizado al agua de riego.

Integrar estos resultados con otros referidos a la eficiencia energética y la viabilidad económica de los cambios permitirá mejorar la eficiencia y optimización global de la actividad.

Adicionalmente estas herramientas pueden ser integradas en sistemas de automatización y telecontrol del manejo de la red de riego (SCADA), esto permitiría una optimización del consumo de agua en tiempo real (Molina et al, 2011).

## Referencias

- García-González, J.F., Moreno, M.A., Molina, J.M., Ruiz-Canales, A. 2013. Empleo de herramientas software para el modelado de la demanda, análisis dinámico y curvas de bombeo en la red principal de riego de un campo de golf. Aplicación a un caso de estudio en la provincia de Alicante. XXXI Congreso Nacional de Riegos. Orihuela.
- Molina, J.M., Ruiz-Canales, A., Jiménez, M., Soto, F., Fernández-Pacheco, D. G. 2011. SCADA platform combined with a scale model of trickle irrigation system for agricultural engineering education. Computer Applications in Engineering Education. DOI: 10.1002/cae.20571.
- Moreno, M.A., Córcoles J.I.; Tarjuelo J.M; Ortega, J.F. 2010. Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. Biosystems Engineering 107 (4): 349–363.
- Planells, P.; Ortega, J.F.; Tarjuelo, J.M. 2007. Optimization of irrigation water distribution networks, layout included. Agricultural Water Management 88: 110–118.

Rodríguez-Díaz, J.A.; López Luque, R.; Carrillo Cobo M.T.; Montesinos, P.; Camacho Poyato, E. 2009. Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks. *Biosystems Engineering* 104: 552–561.

Rodríguez-Díaz, J.A.; Weatherhead E.K.; García Morillo, J.; Knox, J.W. 2011. Benchmarking irrigation water use in golf courses – a case study in Spain. *Irrig. and Drain.* 60: 381–392.

Rossman. 2001. EPANET 2. Manual de usuario. Traducción al español de Martínez Alzamora. United States Environmental Protection Agency. EEUU.

HOYO 11. SECTOR 1. TEE.				HOYO 11. SECTOR 1. TEE.			
Conducción		PE 63 mm PN-10		Conducción		PE 75 mm PN-10	
Estado del Bombeo				Estado del Bombeo			
ID Nudo	Cota m	Demanda m <sup>3</sup> /h	Presión kg·cm <sup>-2</sup>	ID Nudo	Cota m	Demanda m <sup>3</sup> /h	Presión kg·cm <sup>-2</sup>
BOMBEO	11,75	79,99	7,50	BOMBEO	11,75	84,59	7,25
Estado de los Nudos de la Red				Estado de los Nudos de la Red			
ID Nudo	Cota m	Demanda m <sup>3</sup> /h	Presión kg·cm <sup>-2</sup>	ID Nudo	Cota m	Demanda m <sup>3</sup> /h	Presión kg·cm <sup>-2</sup>
Nudo 11R1.1	8,60	4,69	3,14	Nudo 11R1.1	8,60	4,95	3,50
Nudo 11T1.1	9,10	6,36	3,27	Nudo 11T1.1	9,10	6,72	3,65
Nudo 11T1.2	9,10	7,23	3,40	Nudo 11T1.2	9,10	7,65	3,80
Nudo 11T2.1	9,10	5,09	3,70	Nudo 11T2.1	9,10	5,38	4,14
Nudo 11T2.2	9,10	7,16	4,15	Nudo 11T2.2	9,10	7,57	4,64
Nudo 11T2.3	8,60	6,24	3,15	Nudo 11T2.3	8,60	6,60	3,52
Nudo 11T3.1	9,10	4,73	3,19	Nudo 11T3.1	9,10	5,00	3,57
Nudo 11T3.2	9,10	4,34	3,17	Nudo 11T3.2	9,10	4,59	3,54
Nudo 11T3.3	9,10	6,30	3,21	Nudo 11T3.3	9,10	6,67	3,59
Nudo 11T4.1	9,10	3,43	4,62	Nudo 11T4.1	9,10	3,63	5,17
Nudo 11T4.2	9,10	5,29	3,74	Nudo 11T4.2	9,10	5,60	4,18
Nudo 11T4.3	9,10	4,97	3,30	Nudo 11T4.3	9,10	5,26	3,69
Nudo 11T5.1	9,10	4,71	3,17	Nudo 11T5.1	9,10	4,98	3,54
Nudo 11T5.2	9,10	4,71	3,17	Nudo 11T5.2	9,10	4,98	3,55
Nudo 11T5.3	9,10	4,74	3,21	Nudo 11T5.3	9,10	5,01	3,59

Tabla 1 – Caudales y presiones en estación de bombeo y subsector de riego antes (izquierda) y después (derecha) del cambio de diámetro de la conducción.

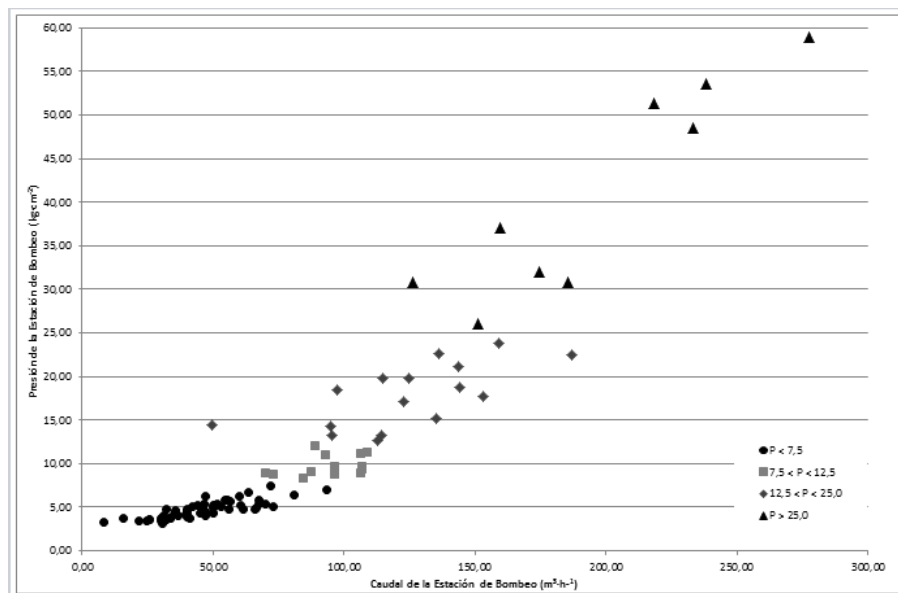


Fig. 1 – Presión y caudal de la estación de bombeo para que el aspersor más desfavorable del subsector tenga 3,5 kg·cm<sup>-2</sup>.

## **Empleo de herramientas software de optimización del uso de la energía para la automatización y el telecontrol de la red de riego de un campo de golf**

J.F. García-González<sup>1</sup>, M.A. Moreno<sup>2</sup>, J.M. Molina<sup>3</sup>, A. Madueño<sup>4</sup>, M. Ferrández-Villena y A. Ruiz-Canales<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Crtra. De Beniel, km 3,2, 03312 Orihuela (Alicante). Universidad Miguel Hernández de Elche. Departamento de Ingeniería. EPSO. Agua y Energía para una Agricultura Sostenible (AEAS).

<sup>2</sup>Crtra. De las Peñas, km 3,2, 02071, Albacete. Universidad de Castilla-La Mancha. Centro Regional de Estudios del Agua (CREA).

<sup>3</sup>Campus Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia). Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de Investigación en Ingeniería Agromótica y del Mar. ETSIA.

<sup>4</sup>Crtra. De Utrera, km 1, 41013 Sevilla. Universidad de Sevilla. Grupo de Investigación AGR-126 Mecanización y Tecnología Rural. ETSIA.

**Palabras Clave:** irrigación, eficiencia, ahorro de energía, estación de bombeo, Matlab®.

### **Resumen**

Para el riego óptimo de un campo de golf es necesario bombear una elevada cantidad de agua a una elevada presión en unos cortos espacios de tiempo, por lo que para cumplir dichas premisas se necesita de una estación de bombeo con una elevada potencia, capaz de cumplir con dichos requisitos. Dicha potencia demanda una considerable cantidad de energía eléctrica, por lo que hacer trabajar a la estación de bombeo lo más próximo de su punto óptimo repercutirá en un ahorro económico a final de la campaña.

Se trabaja con un caso de estudio de un campo de golf en la provincia de Alicante. La estación de bombeo está compuesta por cuatro bombas, una de ellas con variador de frecuencia, que hacen circular un caudal máximo de  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , a una presión de consigna en cabecera de  $7,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

El objetivo del estudio es desarrollar una metodología de trabajo y la obtención de una secuenciación en la puesta en funcionamiento de las bombas en donde el consumo de energía esté optimizado en función de la demanda de la red. Para ello se emplea un software basado en un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación (Matlab®). Se obtiene el rendimiento óptimo de la estación de bombeo y se generan los modelos de las diversas demandas energéticas que se dan a lo largo del año.

Adicionalmente se describen los elementos de automatización y telecontrol asociados a estas herramientas para el control óptimo del consumo energético de las bombas. Finalmente se muestran algunos resultados de las simulaciones realizadas y los ahorros potenciales de consumo de energía conseguidos al emplear esta herramienta.

### **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

Las instalaciones de riego de los campos de golf son un ejemplo típico de demanda de agua y energía para usos recreativos. Aunque su importancia en España respecto al consumo de agua y energía es inferior al de las instalaciones agrícolas (Rodríguez Díaz et al., 2007) este tipo de instalaciones se han extendido considerablemente. En las zonas con déficit hídrico existe la percepción de que este tipo



de instalaciones causan un impacto medioambiental mayor que las instalaciones de riego agrícolas.

Existe amplia literatura científica sobre la modelización del consumo de agua y energía en instalaciones de riego agrícolas pero es escasa para las instalaciones de riego en campos de golf. Destacan alternativas para reducir los consumos de energía y sus costes asociados (Abadía et al, 2008a; Moreno et al. 2007, 2009; Rodríguez Díaz et al. 2011, Jimenez-Bello et al., 2010). Se incluyen también en esta línea metodologías para auditorías del uso del agua y la energía mediante indicadores. Estas metodologías se han desarrollado y se ha probado su efectividad en la agricultura de regadío (Abadía et al. 2008b). Adicionalmente hay una gran concienciación en este sector con el ahorro potencial en el mantenimiento y costes energéticos mediante un uso eficiente de los recursos energéticos (Energy Management Agency, 2012). Las mejoras en eficiencia energética en instalaciones de riego en campos de golf pueden contribuir a su sostenibilidad medioambiental y mejorar la percepción pública que se tiene de este sector.

Esta comunicación presenta la metodología y algunos resultados del empleo de un modelo de demanda del consumo de energía de una estación de bombeo para un caso de estudio de un campo de golf en la provincia de Alicante. Esta metodología se ha empleado en instalaciones de riego agrícola y se presenta su adaptación a un caso de estudio de instalación de riego de un campo de golf.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

El estudio se está realizando en un campo de golf de la provincia de Alicante, que presenta una pluviometría media anual de 237,06 mm, una evapotranspiración (ET) media anual de 1.042,65 mm y riego de 805,59 mm anuales.

La estación de bombeo dispone de cuatro bombas con caudales máximos aportados respectivos de 30, 110, 160 y 220 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> que se ponen en marcha en ese orden en función de la demanda. Se dispone de una estación meteorológica que tiene control remoto con radiofrecuencia para activar los aspersores en función de la evapotranspiración mediante un programador de riego central que controla la hora de comienzo de riego de cada grupo de aspersores. Los aspersores están interconectados en grupos de tres y de dos, siendo cada grupo un sector que se abre simultáneamente de manera automática. Hay tres temporizadores que indican el inicio de riego de los distintos sectores. Cada temporizador controla 17 sectores mediante una señal de 24 V. Uno de los temporizadores se utiliza para comandar los sectores que controlan el riego de los *tees* y *greens* y los otros dos se utilizan para enviar la señal de inicio del riego a los sectores que controlan el riego de las calles. El programador mide continuamente el caudal de los aspersores. En función de ese caudal se van activando las estaciones y en consecuencia el grupo de bombeo. Conforme va aumentando la demanda de riego se activan las bombas con el objetivo de mantener constante la presión en el sistema hidráulico a 7,5 kg·cm<sup>-2</sup> (presión de consigna). Cuando hay demanda, la presión disminuye por debajo de la de consigna y el temporizador cuenta treinta segundos por si se vuelve a la presión inicial. Si pasado ese tiempo la presión en la red no se recupera se van encendiendo automáticamente las bombas siguiendo el orden numérico que llevan, para mantener esa presión en el interior de la red. Al aumentar la presión por encima de la de consigna, van apagándose las bombas a la inversa de como se hayan ido encendiendo, alcanzando de nuevo la presión de consigna.

El modelado de la estación de bombeo se realizó con el software Model for Analysis of Energy Efficiency at Pumping Stations (MAEEB<sup>®</sup>), del Centro Regional de

Estudios del Agua de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Este software está basado a su vez en lenguaje Matlab®. Se trata de un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Se simuló las condiciones de encendido y apagado según la demanda de la red descrita previamente. Se determinó la curva de caudal-rendimiento para la estación de bombeo completa y una presión de consigna de  $7,5 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$  (Fig 1). En esta curva se muestran los valores de la envolvente de los rendimientos de tres bombas para un demanda acumulada determinada de las cuatro instaladas (la inicial actúa de bomba jockey, con un pequeño caudal para mantener la presión en la red) con una potencia total contratada de 379,4kW. Se muestran en el diagrama los valores máximos de la envolvente correspondiente a los rendimientos máximos de cada una de las bombas relacionados con los caudales de cada una de ellas para un escenario de consumo determinado (máxima demanda y sectorización mínima).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han conseguido reducciones potenciales de presión y caudal en la estación de bombeo relacionadas con cambios de diámetros en la red de tuberías y sectorización. Estos cambios conllevan un ahorro energético y de costes. Adicionalmente el modelo permite activar una mejor secuencia de las bombas que minimice el consumo energético.

La simulación planteada en el modelo ha conseguido reducciones potenciales de energía de un 1,06% anual respecto a los costes energéticos totales. Esto se traduce en un ahorro de energía de  $1.839 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{año}^{-1}$ .

Mediante este tipo de herramientas es posible controlar el consumo energético de la red. Adicionalmente se pueden implementar estas herramientas en el sistema de control y adquisición de datos (SCADA) de la propia red para plantear escenarios de funcionamiento y aplicar medidas correctoras (Molina et al, 2011). Esta herramienta se puede integrar en el sistema de control de la red permitiendo hacer modificaciones en tiempo real mediante la combinación de sensores, el sistema SCADA y actuadores en la red de riego.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se ha podido observar, el uso de software específico para el modelado de estaciones de bombeo, en este caso MAEEB®, permite establecer modelos de consumo energético de las estaciones de bombeo de los campos de golf, y dar un uso más eficiente y optimizado de la energía. La metodología empleada en redes agrícolas se adapta perfectamente a las redes en campos de golf.

Habría que realizar un número mayor de simulaciones hasta alcanzar el máximo que permitiera trabajar a las bombas dentro del rango. Consistiría en la generación de más escenarios de consumo y determinar la envolvente de todos ellos. Adicionalmente habría que comparar los datos simulados con los datos de la propia estación de bombeo en un proceso de calibración.

Integrar estos resultados con otros referidos a la eficiencia hídrica y la viabilidad económica de los cambios permitirá mejorar la eficiencia y optimización global de la actividad.

Adicionalmente el modelo permite activar la mejor secuencia de las bombas que minimice el consumo energético. La utilización de métodos de optimización junto con modelos hidráulicos permite un ahorro energético ( $1,06\%$  y  $1.839 \text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{año}^{-1}$ ) además de la mejora de las condiciones de funcionamiento de la red.

Esta herramienta se puede integrar en el sistema de control de la red permitiendo hacer modificaciones en tiempo real mediante la combinación de sensores, sistema SCADA y actuadores en la red de riego.

### Referencias

- Abadia, R., Rocamora, C., Ruiz, A., Puerto, H. (2008a). Energy efficiency in irrigation distribution networks I: Theory. *Biosystems Eng.*, 101(1), 21–27.
- Abadía, R., Rocamora, M.C., Ruiz, A. (2008b), Protocolo de auditoría energética en Comunidades de Regantes. IDAE, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.
- Energy Management Agency. (2012). Guía de gestión energética en zonas verdes y campos de golf. Comunidad de Madrid. Spain.
- Jimenez-Bello, MA., Alzamora, FM, Soler, VB, Ayala, HJB. 2010. Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption. *Biosystems Eng.*, 105 (4): 429-438.
- Molina, J.M., Ruiz-Canales, A., Jiménez, M., Soto, F., Fernández-Pacheco, D. G. 2011. SCADA platform combined with a scale model of trickle irrigation system for agricultural engineering education. *Computer Applications in Engineering Education*. DOI: 10.1002/cae.20571.
- Moreno, M. A., Carrión, P. A., Planells, P., Ortega, J. F., and Tarjuelo, J. M. 2007. Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosystems Eng.*, 98(4), 479–486.
- Moreno, M. A., Planells, P., Córcoles, J. L., Tarjuelo, J. M., and Carrión, P. A. 2009. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosystems Eng.*, 102(1), 95–105.
- Rodríguez Díaz, JA; Knox, JW; Weatherhead, EK. 2007. Competing demands for irrigation water: golf and agriculture in Spain. *Irrigation and Drainage* 56: 541–549.
- Rodríguez Díaz, J. A., Camacho Poyato, E., Blanco Pérez, M. (2011). Evaluation of water and energy use in pressurized irrigation networks in southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(10), 644-650.

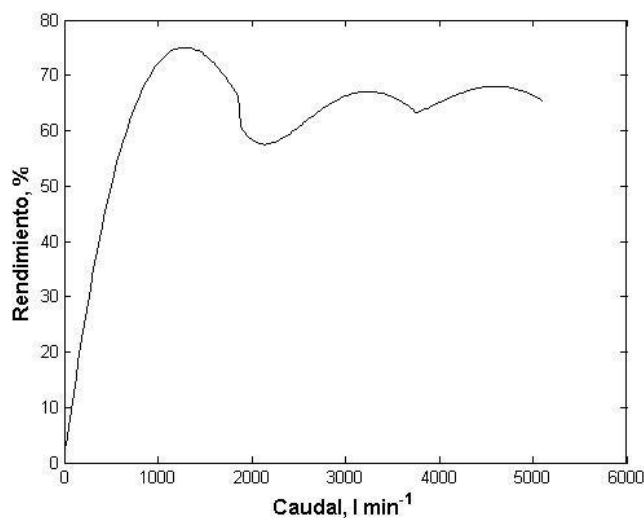


Figura 1 – Curva caudal-rendimiento de la estación de bombeo de la red a partir del modelado. Se muestra el escenario de máxima demanda de la red.



# EMPLEO DE HERRAMIENTAS SOFTWARE PARA EL MODELADO DE LA DEMANDA, ANÁLISIS DINÁMICO Y CURVAS DE BOMBEO EN LA RED PRINCIPAL DE RIEGO DE UN CAMPO DE GOLF. APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO EN LA PROVINCIA DE ALICANTE

García-González, J.F.<sup>1</sup>; Moreno, M.A.<sup>2</sup>; Molina, J.M.<sup>3</sup>; Ruiz-Canales, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Investigador. Agua y Energía para una Agricultura Sostenible (AEAS). Departamento de Ingeniería. Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Universidad Miguel Hernández, Crtra. de Beniel, km 3,2, 03312 Orihuela (Alicante). acanales@umh.es.

<sup>2</sup> Investigador. Centro Regional de Estudios del Agua (CREA). Universidad de Castilla-La Mancha. Universidad de Castilla La Mancha, Ctra. de las Peñas, km 3,2, 02071, Albacete. MiguelAngel.Moreno@uclm.es.

<sup>3</sup> Investigador. Grupo de Investigación en Ingeniería Agromótica y del Mar. Universidad Politécnica de Cartagena (Murcia). josem.molina@upct.es.

## 1- Introducción y Objetivos

Desde hace más de 20 años, el número de campos de golf en España se ha visto incrementado de forma considerable (Rodríguez-Díaz et al., 2007). Dentro de las instalaciones de un campo de golf es la red principal de riego la que demanda mayores cantidades de agua y energía. Dependiendo de las condiciones agroclimáticas, del diseño de la instalación, del mantenimiento y uso intensivo, entre otras causas, estas instalaciones necesitan unos aportes hídricos y energéticos considerables, tanto en volumen como en frecuencia (Rodríguez-Díaz et al., 2011).

Ante la situación económica actual de disminución de demanda de número de usuarios (*green fees*), los costes implícitos de mantenimiento (agua y energía) que conlleva el manejo del riego en un campo de golf influyen de manera notable en la rentabilidad de sus instalaciones. La relación entre los ingresos aportados por los *green fees* y los costes de mantenimiento determinan el umbral de rentabilidad de la instalación de riego. Por este motivo los propietarios y accionistas de los campos deben de ajustar al máximo el precio de *green fees*, para competir con los campos de golf cercanos, lo que implica reducir al mínimo los costes. Cualquier acción que sirva para la reducción de costes de instalación y de mantenimiento es de suma importancia para este tipo de instalaciones de riego.

Una serie de herramientas que pueden ayudar a optimizar los consumos de agua y energía de la instalación de riego de un campo de golf son las relacionadas con el software para el modelado de la red de riego. Estas herramientas se han empleado con gran éxito en redes colectivas de riego presurizadas (Moreno et al., 2010; Rodríguez-Díaz et al., 2009; Planells et al., 2007). El modelado se plantea a tres niveles diferentes. Por un lado el modelado de la demanda de la red de riego. En este caso dependerá de las condiciones agrometeorológicas y de manejo. En segundo lugar el modelado hidráulico de la red. Para este modelado se incluye la topología, sectorización, entre otros. Por último hay que considerar el modelado de las estaciones de bombeo. Dependerá de las potencias de las bombas, de la secuencia de arranques y de las curvas de consigna, etc. Mediante estas herramientas se pueden plantear diferentes escenarios de consumo y manejo y optimizar los consumos de agua y energía. Adicionalmente estas herramientas pueden ser integradas en

el sistema de automatización y telecontrol del manejo de la red de riego (SCADA). Esto permitiría una optimización del consumo de agua y energía en tiempo real (Molina et al, 2011).

Esta comunicación presenta algunos aspectos de los modelos (demanda, red y estación de bombeo) de un caso de estudio de un campo de golf en la provincia de Alicante. Mediante diversas herramientas de software del mercado se han planteado varios escenarios de consumo. Con este modelado es posible plantear condiciones de manejo que optimicen el consumo de agua y energía (Jiménez-Bello et al, 2010).

## 2- Materiales y Métodos

En este apartado se va a describir la metodología propuesta, así como un ejemplo de aplicación en una red de riego de un campo de golf de la provincia de Alicante.

### 2.1. Caso de estudio

El campo de golf objeto de estudio tiene una superficie total de 45 hectáreas, siendo aproximadamente 40 hectáreas el área de riego, así como la red de riego. Se trata de un campo de 18 hoyos construido en 1996 y puesto en funcionamiento en 1998. Se muestra en la Fig. 1 la red de distribución de tuberías, así como la altimetría media de la red. Apenas se alcanzan los 15 metros de desnivel en toda la red de riego. En negro se distinguen la red principal y las redes secundarias malladas. El sistema de riego se halla constituido por una red en forma de anillo con derivaciones en disposición y forma de red mallada donde se ubican los aspersores. La red parte de un cabezal de riego, donde se encuentra el sistema de bombeo y el controlador central de los programadores de riego. El agua es aspirada directamente de un lago e impulsada a la red de distribución. La procedencia es de aguas residuales depuradas.

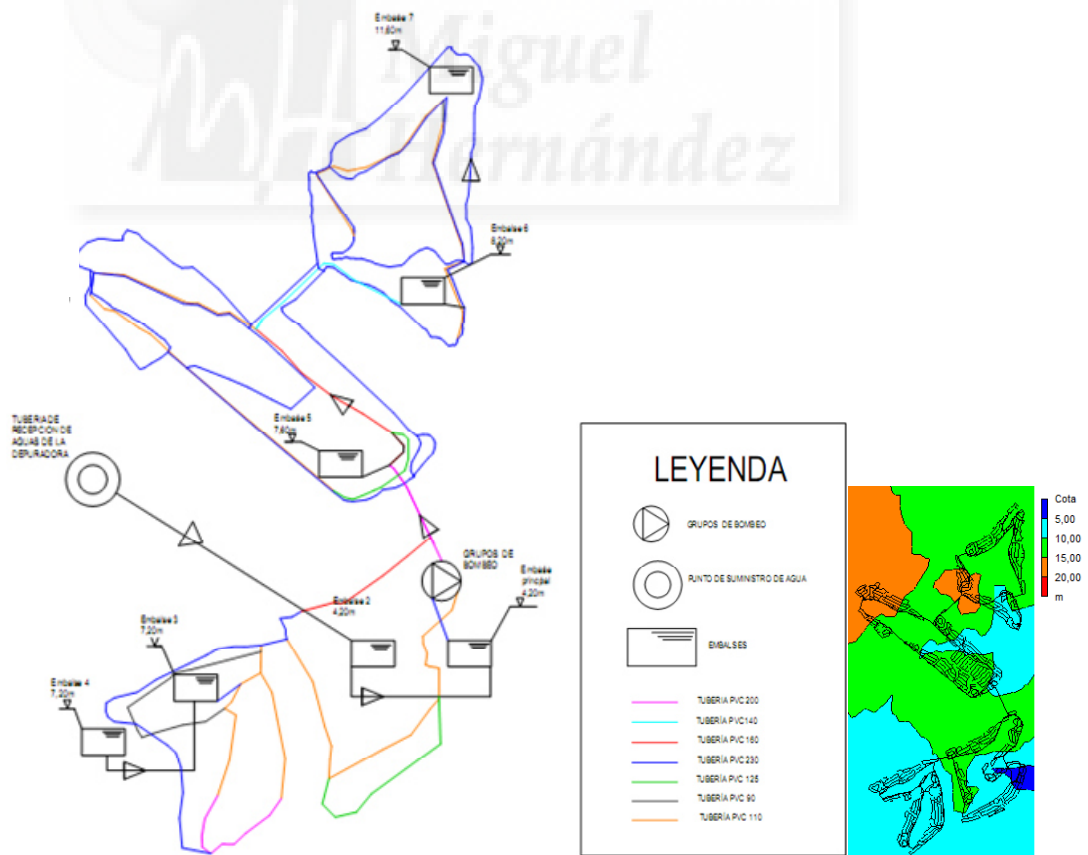


Figura 1. Esquema de la red principal de distribución de riego con diámetros (izquierda) y altimetría media de la red del campo de golf objeto de estudio (derecha).

El campo se encuentra en una zona de clima seco. Los datos climatológicos indican que la precipitación acumulada media anual es de 237,06 mm, y la temperatura media anual de 16,94 °C. La temperatura máxima media anual es de 25,6 °C y la mínima media anual de 14,41 °C. Se caracteriza por tener pocas lluvias y temperaturas suaves en invierno. La evapotranspiración de referencia media anual es de alrededor de 1.042,65 mm anuales.

El tipo de suelo predominante es franco-arcillo-arenoso, con un 18% de arena, un 44% de limo y un 38% de arcilla. En la zona de los *greens* y de los *tees* el suelo es tipo USGA (United States Golf Association).

El cabezal de riego incluye cuatro grupos de bombeo, con una potencia total contratada de 379,4kW y una caudal total de  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , suministrando una presión en la red de  $7,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ . La red de riego está formada por tuberías de PVC y PE. El control de riego se realiza mediante telecontrol con cable de comunicaciones. Se dispone de una estación meteorológica que tiene control remoto con radiofrecuencia. Los aspersores están interconectados en grupos de tres y de dos, siendo cada grupo un sector o estación que se abre simultáneamente de manera automática. El programador de riego mediante PC controla esas estaciones midiendo continuamente el caudal de los aspersores. En función de ese caudal se van activando las estaciones y en consecuencia el grupo de bombeo. Conforme va aumentando la demanda de riego se activan las bombas con el objetivo de mantener constante la presión en el sistema hidráulico,  $7,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ . El sistema se encuentra constituido por un programador central que controla la hora de comienzo de riego de cada sector. Está formado por tres temporizadores que indican el inicio de riego de los distintos sectores, cada temporizador controla 17 sectores mediante una señal de 24 V. Uno de los temporizadores se utiliza para comandar los sectores que controlan el riego de los *tees* y *greens* y los otros dos se utilizan para enviar la señal de inicio del riego a los sectores que controlan el riego de las calles. Existen un total de 51 sectores (también denominados estaciones o satélites). La red está programada para que haya una presión constante de consigna de  $7,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ , independientemente de que haya demanda o no. Cuando hay demanda la presión disminuye por debajo de  $7,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ , el temporizador cuenta treinta segundos por si se vuelve a la presión inicial. En caso de que pasado ese tiempo la presión en la red no se recupere se van encendiendo automáticamente las bombas siguiendo el orden numérico que llevan, de tal forma que vuelven a mantener esa presión en el interior de la red. Si la presión aumenta por encima de  $7,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ , van apagándose las bombas a la inversa de como se hayan ido encendiendo, buscando de nuevo la presión inicial. Dispone de cuatro bombas con caudales máximos aportados respectivos de 30, 110, 160 y  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  que se ponen en marcha en ese orden en función de la demanda.

Respecto a las variedades de césped implantados en el campo de golf se pueden clasificar en cuatro tipos. Para los *tees* y los *roughs* se siembra Bermuda (*Cynodon Dactylon* x *Cynodon Transvaalensis*). Este tipo de césped es muy denso y de hoja fina. Logra una superficie suave y homogénea, de color verde oscuro con un crecimiento agresivo y cobertura dominante. Es muy habitual que en invierno pierda su color verde intenso, particularmente en climas con heladas. Si se quiere mantener el verde se recurre a la resiembra otoñal con *Ray Grass*. En los *greenes* se siembra *Agrostis Stolonifera* L93. Para esta variedad es recomendable realizar pinchados con púas varias veces al año con los consiguientes recebados de arena para conseguir *greenes* rápidos y de calidad. Gracias a sus estolones y rizomas cortos, forma una alfombra densa y fina, con un color verde azulado que se mantiene todo el año. En los *antegreen* se usa *Paspalum Vaginatium*. Es una grama que se conoce también por grama de agua o grama blanca. Es muy tolerante al

calor y la sequía, soporta muy bien la compactación del terreno y el encharcamiento. Tiene un crecimiento muy agresivo en forma de rizomas y estolones pudiendo cerrar totalmente un césped en días. La superficie de las distintas variedades de céspedes son 1,1 hectáreas para el *green*, 0,7 hectáreas para el *antegreen*, 0,7 hectáreas para los *tees*, 14,8 hectáreas para las calles y 25,2 hectáreas de los *roughs*. Respecto a los *roughs* cabe señalar que no todos están plantados ni se riegan, por lo que la superficie de riego es menor a la suma de estos datos. Se estima que la superficie regada de los *roughs* es aproximadamente de 23 hectáreas. Por último señalar que la totalidad de los lagos tienen una superficie de 4,3 hectáreas.

## 2.2. Metodología propuesta

Para llevar a cabo el modelado de la red inicialmente se ha planteado un único modelo de demanda evaporativa (necesidades de riego del césped en el mes de máxima demanda, en su caso el mes de julio).

Posteriormente se plantean las condiciones de manejo o funcionamiento de la red que determinarán igualmente la demanda. En concreto se ha simulado la apertura y cierre de sectores (cada tres aspersores) según la secuencia descrita en el apartado 2.1. Para ello se ha simulado la red de riego mediante un software de análisis dinámico de redes de riego. El modelado de la red de riego se ha realizado con el programa informático EPANET 2.0.<sup>®</sup> (Rossman, 2001), a partir de las condiciones topológicas de la red (plano de distribución de cotas, hidrantes y tuberías, longitudes y diámetros de las conducciones, curvas de demanda de los aspersores, sectorización, entre otros).

Se ha propuesto un modelo de apertura aleatoria por subsectores (malla de aspersores que funcionan simultáneamente). Se ha considerado en este modelo una presión de consigna de 75 m.c.a. Adicionalmente se consideró una presión mínima del aspersor de 35 mca. La idea es generar un elevado número de escenarios de demanda utilizando la metodología de las curvas aleatorias de demanda diaria (Moreno et al. 2007). Aunque se han generado diferentes escenarios que cumplen con estas condiciones, solamente se presenta en esta comunicación uno de los escenarios representativos.

Se tuvo en cuenta también el modelado de la estación de bombeo y para ello se eligió un software diferente. El modelado de la estación de bombeo se realizó con el software Model for Analysis of Energy Efficiency at Pumping Stations (MAEEB), del Centro Regional de Estudios del Agua de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). Este software está basado a su vez en el software Matlab<sup>®</sup>. Se trata de un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Para el modelado se simularon las condiciones de encendido y apagado según la demanda de la red descrita en el apartado 2.1. Con esta simulación se determinó la curva de caudal-rendimiento para la estación de bombeo completa y una presión de consigna de 75 m.c.a. Asimismo se ha obtenido la curva caudal-presión de para distintas presiones de consigna de la red. Mediante esta metodología se pretenden establecer algunas medidas de ahorro de costes y energético en la instalación.

## 3- Resultados,

Los caudales demandados simulados del modelo se encuentran dentro de un rango adecuado según las condiciones de partida. En la tabla 1 se muestra el resultado de la simulación de uno de los hoyos del campo (hoyo 19), incluyendo el estado de los nudos de la red. Para el hoyo indicado, se obtiene con la simulación y las condiciones establecidas un caudal máximo de  $5,36 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , un caudal mínimo de  $4,18 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  y un caudal medio de  $4,82 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . La desviación estándar es de  $0,27 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Asimismo la presión media de los nudos es de 25,85 m.c.a, la máxima de 35,68 m.c.a., la mínima de 23,26 m.c.a. y la desviación típica de 3,34 m.c.a. En el resto de hoyos se ha procedido de la misma manera.

Tabla 1. Resultados de la simulación en el hoyo 19 del campo de golf estudiado.

APERTURA DEL TEE DE PRÁCTICAS Y ESTADO DE LOS NUDOS DE LA RED									
ID Nudo INICIAL	Cota (m)	Caudal deman. (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Altura (m)	Presión (m)	ID Nudo	Cota (m)	Caudal deman. (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	Altura (m)	Presión (m)
19E1.1	10,80	4,61	46,48	35,68	19E4.2	10,80	4,70	34,29	23,49
19E1.2	10,80	5,31	40,86	30,06	19E5.1	10,80	4,70	34,31	23,51
19E1.3	10,80	5,03	37,73	26,93	19E5.2	10,80	4,68	34,17	23,37
19E2.1	10,80	4,84	35,79	24,99	19E5.3	10,80	4,18	34,06	23,26
19E2.2	10,80	4,74	34,76	23,96	19E6.1	10,80	5,06	38,08	27,28
19E3.1	10,80	5,36	41,35	30,55	19E6.2	10,80	4,86	36,00	25,20
19E3.2	10,80	5,06	38,03	27,23	19E6.3	10,80	4,74	34,77	23,97
19E3.3	10,80	4,86	35,98	25,18	19E7.1	10,80	4,69	34,22	23,42
19E4.1	10,80	4,75	34,81	24,01	19E7.2	10,80	4,67	34,06	23,26

En las figuras 2 y 3 se muestran los resultados de las simulaciones y con códigos de colores los caudales circulantes y presiones alcanzadas en las tuberías. Una vez estudiada la distribución de caudales y presiones se aprecia que es posible establecer una nueva sectorización. Específicamente para el caso de *tees*, *antegreens* y *greens* es posible agruparlos en un único sector. Esta agrupación conlleva una simplificación de la instalación y un consiguiente ahorro de costes y energético. Aunque no se ha cuantificado totalmente, la simulación efectuada estima un ahorro entre un 5 y un 10% de los costes de instalación.

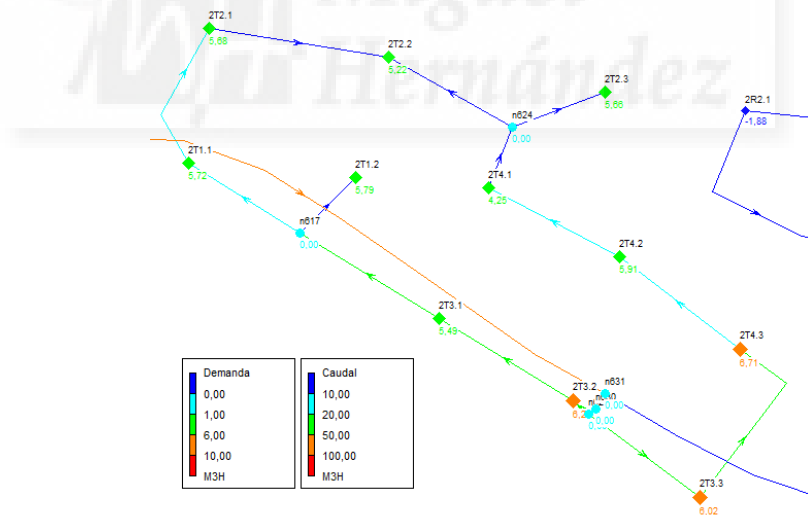


Figura 2. Detalle del resultado de la simulación de la red principal de tuberías del campo de golf en la zona con mayor cota.

Otra de las medidas potenciales que se pueden establecer a raíz de la simulación es el cambio de diámetros nominales para reducir las presiones de funcionamiento. La reducción de presiones de funcionamiento de la instalación conlleva una reducción de la presión de bombeo y una consiguiente disminución del consumo energético. En algunas de las conducciones estudiadas de la red hay sectores que se encuentran con una presión en la estación de bombeo comprendida entre 75 y 100 mca. Actualmente, la conducción entre la red primaria y los sectores es de PE 63 PN-10 (diámetro interno 55,4 mm), por lo que



umentando a PE 75 (diámetro interno 66,0 mm) o PE 90 (diámetro interno 79.2 mm) se puede conseguir una reducción de presión y caudal en la estación de bombeo.

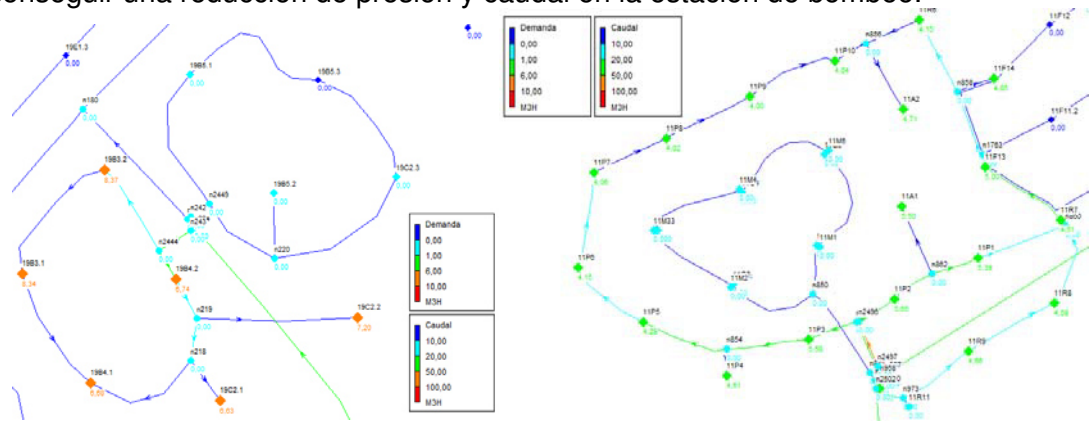


Figura 3. Detalle del resultado de la simulación de la red secundaria de tuberías del campo de golf.

Una modificación adicional de la red que permitiría una reducción de consumo energético sería el mallado de algunas de las redes secundarias. Añadiendo una conducción para hacer una red mallada más eficiente permitiría alcanzar valores de presión y caudal inferiores.

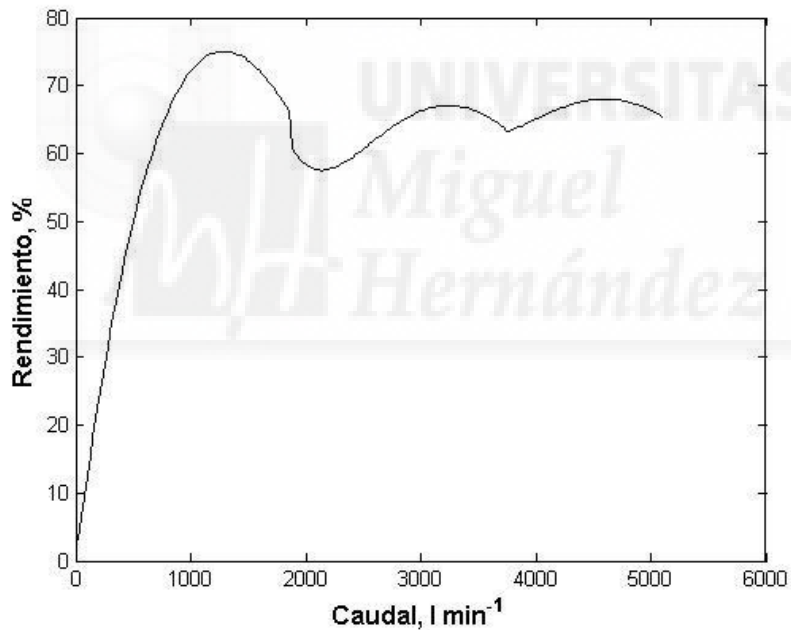


Figura 4. Curva caudal-rendimiento de la estación de bombeo de la red a partir del modelado.

Respecto a la modelización de la estación de bombeo, en las Fig. 4 y 5 se muestran las curvas de caudal-rendimiento y caudal-presión, respectivamente. Estas curvas se han obtenido a partir de la simulación de la red de riego con las condiciones citadas en el apartado 2.1.

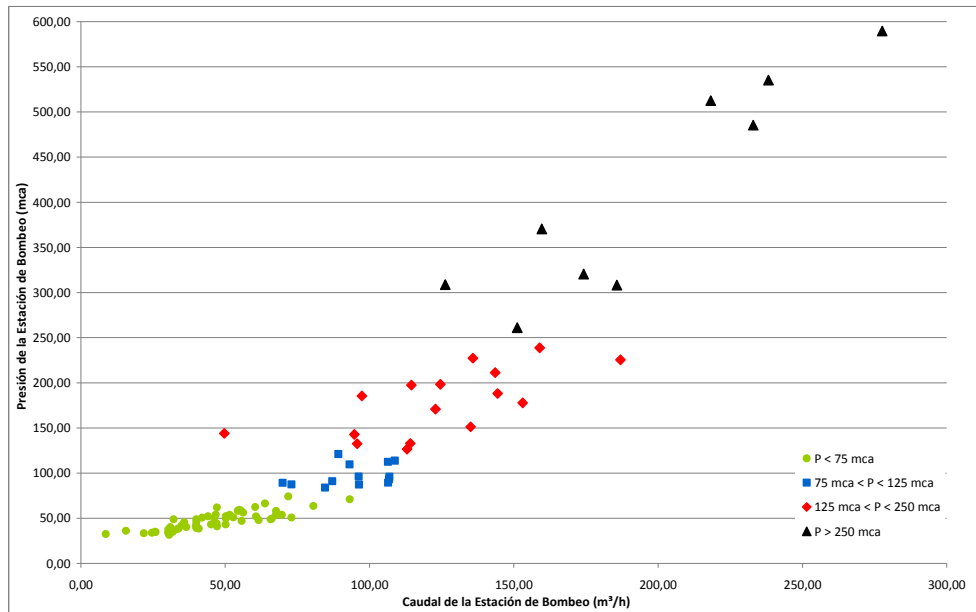


Figura 5. Curva caudal-presión de la estación de bombeo de la red a partir del modelado.

#### 4- Discusión y Conclusiones.

La siguiente fase del proceso consistiría en la generación de más escenarios de consumo y determinar la envolvente de todos ellos. Adicionalmente habría que comparar los datos simulados con los datos de la propia red en un proceso de calibración. Mediante este tipo de herramientas es posible controlar el consumo hídrico y energético de la red. Adicionalmente se pueden implementar estas herramientas en el sistema de control y adquisición de datos (SCADA) de la propia red para plantear escenarios de funcionamiento y aplicar medidas correctoras.

Tras la simulación de la red y las medidas correctoras propuestas se consiguen ahorros potenciales de costes de instalación y mantenimiento en *tees*, *antegreens* y *greens*. Estos ahorros están relacionados con la sectorización de la red.

Igualmente, mediante la simulación, se pueden conseguir reducciones potenciales de presión y caudal en la estación de bombeo relacionados con cambios de diámetros en la red de tuberías. Estos cambios conllevan un ahorro energético y de costes.

Las modificaciones de la disposición de las mallas de la red permiten disminuir los caudales y presiones distribuidos en la red.

Adicionalmente el modelo permite activar la mejor secuencia de las bombas que minimice el consumo energético.

Esta herramienta se puede integrar en el sistema de control de la red permitiendo hacer modificaciones en tiempo real mediante la combinación de sensores, sistema SCADA y actuadores en la red de riego.

#### 5.- Bibliografía

Jimenez-Bello, MA; Martinez Alzamora, F.; Bou Soler, V.; Bartoli Ayala, H. J. 2010. Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption. Biosystems Engineering Volume: 105 (4): 429-438.

Matlab. [www.matpic.com](http://www.matpic.com)

Molina, J.M., Ruiz-Canales, A., Jiménez, M., Soto, F., Fernández-Pacheco, D. G. 2011. SCADA platform combined with a scale model of trickle irrigation system for

agricultural engineering education. *Computer Applications in Engineering Education*. DOI: 10.1002/cae.20571

Moreno, M.A., Córcoles J.I.; Tarjuelo J.M; Ortega, J.F. 2010. Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. *Biosystems Engineering* 107 (4): 349–363.

Moreno M. A., Planells P., Ortega J.F., Tarjuelo J.M. 2007. New methodology to evaluate flow rates in on-demand irrigation networks. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering* .vol.133,Nº4, 298-306.

Planells, P.; Ortega, J.F.; Tarjuelo, J.M. 2007. Optimization of irrigation water distribution networks, layout included. *Agricultural Water Management* 88: 110–118.

Rodríguez-Díaz, JA; Knox, JW; Weatherhead, EK. 2007. Competing demands for irrigation water: Golf and agriculture in Spain. Volume: 56 (5): 541-549.

Rodríguez-Díaz, J.A.; López Luque, R.; Carrillo Cobo M.T.; Montesinos, P.; Camacho Poyato, E. 2009. Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks. *Biosystems Engineering* 104: 552–561.

Rodríguez-Díaz, J.A.; Weatherhead E.K.; García Morillo, J.; Knox, J.W. 2011. Benchmarking irrigation water use in golf courses – a case study in Spain. *Irrig. and Drain.* 60: 381–392.

Rossman. 2001. EPANET 2. Manual de usuario. Traducción al español de Martínez Alzamora. United States Environmental Protection Agency. EEUU.





7

## **Conclusiones de la investigación**



Las metodologías usadas para diferentes tipos de redes de riego y estaciones de bombeo agrícola se pueden adaptar para su uso en los sistemas de riego de los campos de golf, permitiendo analizar y modelizar el comportamiento y la eficiencia hidráulica y energética del sistema, y, de esta forma mejorar la gestión del riego.

Los datos obtenidos con la apertura individual y simultánea de sectores de riego para evaluar el consumo eléctrico, hídrico y la eficiencia de la estación de bombeo han dado resultados dispares según el caso analizado, pero teniendo en común que el tiempo de riego disminuye, repercutiendo en el menor mantenimiento de la estación de bombeo.

Entre las futuras líneas de trabajo, a corto plazo se encuentra la introducción de esta metodología en el sistema de gestión de agua y energía de la red de riego del campo de golf de estudio, y un análisis económico sobre la rentabilidad de las medidas propuestas por la metodología descrita, que sirva como apoyo para la viabilidad del proyecto.

A medio plazo se trataría de trasladar la metodología a otros campos de golf, incluyendo el uso de sistemas de información geográfica (SIG) asociados a los sistemas de control automático del riego en función de la demanda evapotranspirativa, el estado de la red y el coste asociado al consumo energético en cada momento; y uso de metaheurística para implementar el software y los algoritmos desarrollados en el SCADA de control de la red de riego.