



OPTIMIZACIÓN MULTI OBJETIVO DEL SISTEMA DE RIEGO MEDIANTE UN MARCO DE OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL

Attila Bibok¹, Paula Castellano²

¹Kisters North America, Roseville, CA, 95661, Estados Unidos

²Kisters Ibérica, Valladolid, 47014, España

²*paula.castellano@kisters.es*

RESUMEN

La operación y utilización de manera óptima, de las infraestructuras de transporte y distribución de agua existentes, son una preocupación creciente para los organismos gubernamentales de todo el mundo. Estos complejos sistemas hidráulicos tienen muchos objetivos que incluyen el suministro de agua de riego, la respuesta a demandas de agua doméstica, garantizar los caudales ecológicos, al mismo tiempo que maximizar los ingresos de la energía hidroeléctrica, laminar avenidas o minimizar los costes de bombeos. Los métodos directos de cálculo son ampliamente utilizados para problemas de optimización no lineal, porque no necesitan de las derivadas matemáticas, aunque el tiempo de ejecución puede ser extremadamente largo y la convergencia no está garantizada. Por el contrario, en este trabajo se ha utilizado una optimización no lineal usando un enfoque de continuidad, para encontrar estrategias de control óptimas para sistemas hidráulicos no lineales. Por último, el objetivo fue brindar plataformas web de visualización para lograr una mayor transparencia en los datos y una gestión más eficiente en la toma de decisiones.

Palabras clave

Sistema de riego, optimización en tiempo real (RTO), optimización multiobjetivo

1. INTRODUCCIÓN

La solución se basa en la adaptación y acceso de la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD – Valladolid, España) y otras partes implicadas, a una plataforma en la nube, que permite funcionalmente conseguir los objetivos propuestos y funcionar como el núcleo de la información y explotación. Esta investigación tiene el objetivo de resolver el problema de optimización en tiempo real del Sistema de explotación Órbigo – Barrios de Luna, de la CHD. Este sistema de agua altamente complejo posee múltiples regantes, plantas hidroeléctricas y objetivos basados en la conservación del flujo ecológico. La cuenca en cuestión muestra una alta estacionalidad en las precipitaciones y en la demanda de riego. El embalse de Barrios de Luna fue puesto en servicio en el año 1956 y tiene por objetivo principal regular las aguas del río Luna, que a partir de su confluencia con el río Omaña pasa

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

a denominarse Órbigo. La presa, de más de 80 metros de altura, fue construida aprovechando una profunda y estrecha garganta, habiéndose creado un embalse de 308 hm³, con los que se riegan más de 50.000 hectáreas dedicadas, fundamentalmente, al cultivo de maíz, remolacha y lúpulo.

Con el fin de maximizar la producción de energía hidroeléctrica, cumplimentar los caudales ecológicos necesarios y asegurar el abastecimiento de la demanda de riego para los cultivos, se utilizó un sistema de optimización multiobjetivo. Durante este proyecto piloto se priorizó utilizar los mismos datos de entrada que están disponibles para los operadores del sistema de explotación Órbigo, al tiempo que se optimizó y automatizó la actual estrategia de control y distribución del agua antes basada en un modelo estático en archivos xlsx. Esto permitiría un mayor ajuste y una implementación práctica simplificada y menos disruptiva de las prácticas actuales.

Se aplicó un enfoque continuo para resolver este problema de optimización no-lineal y encontrar la estrategia de control óptima [1]. Además, se utilizó una plataforma basada en la nube para ajustar los “hiperparámetros” y visualizar los resultados de la optimización. Para ello, se utilizaron dos años de datos operativos para la evaluación.

Los objetivos generales de esta prueba de concepto piloto fueron proporcionar a CHD un sistema para:

- a) Facilitar el proceso de intercambio de datos/información entre las partes interesadas.
- b) Generar una herramienta que permita un enfoque más avanzado y automático para la ayuda a la decisión en el sistema de riego del Río Luna.
- c) Calcular y visualizar las dotaciones de agua por parte de los operadores de CHD.

2. METODOLOGÍA

2.1 DATOS DEL MODELO

La disponibilidad de datos topológicos fue limitada en el proyecto de investigación, por lo tanto, se requirió una metodología robusta, fácil de adaptar y de actualizar posteriormente según la disponibilidad y la mejora en la calidad de los datos.

2.1.1 Topología

La topología del sistema se proporcionó en archivos “shapefile”, con pocos o ningún atributo. Las áreas de riego constan de múltiples canales paralelos y retornos. Esto introduciría una complejidad innecesaria a los modelos, por lo que fueron agregados en un solo canal, con un único caudal de retorno. El sistema cuenta con 9 embalses en el río principal, para los cuales se introdujeron elementos de almacenamiento en el modelo. Existen 5 plantas hidroeléctricas operativas en la cuenca modelada, donde 3 de ellas son alimentadas por el mismo canal. Su caudal y potencia de salida dependen de la demanda de riego suministrada hasta el canal.

2.1.2 Series de tiempo

Los datos de entrada para las ejecuciones de optimización provinieron de múltiples fuentes. Los datos de demanda de riego estaban disponibles desde 2010 en archivos xlsx. Sin embargo, los datos de caudal solo estaban disponibles desde 2018. Se desarrolló un script de

Python para realizar ETL en el conjunto de datos inicial, por lo que las series temporales de demanda resultaron equidistantes.

La temporada de riego comienza en mayo y termina en septiembre. Fuera de la temporada de riego, la gestión de nivel y caudal de los embalses no requiere la coordinación de las autoridades locales.

2.2 MÉTODOS

2.2.1 Modelo de balance de masa

Basándose en la calidad y cantidad de los datos numéricos y topológicos disponibles, se aplicó un modelo de balance de masa para calcular los flujos en los canales y arroyos. Sin embargo, RTO también es capaz de resolver un enrutamiento completamente hidráulico al utilizar un esquema semi-implícito de las ecuaciones 1D de Saint-Venant. Por lo tanto, el modelo de balance de masa se construyó más robusto de lo necesario, por lo que enrutamientos más avanzados se pueden aplicar con facilidad.

Se introdujeron condiciones de barrera del nivel y caudal en las entradas y salidas laterales para las demandas de riego. Las centrales hidroeléctricas y los flujos de retorno fueron modelados con estructuras de flujo controlado (Figura 1).



Figura 1. Trazado esquemático de los canales de riego gestionados.

2.2.2 Optimización multiobjetivo

El método de continuidad aplicado en este artículo se basa en la aproximación lineal de las ecuaciones de aguas poco profundas [1]. Una de las ventajas de este enfoque es que da como resultado un único óptimo global, que es reproducible. Otros métodos directos y algoritmos evolutivos sufren de falta de reproducibilidad debido a la naturaleza aleatoria en la búsqueda de la solución [3, 4]. Como pueden dar lugar a múltiples soluciones, se dificulta la interpretación de los resultados en la práctica [3]. Debido a estas consideraciones, optamos por aplicar el método de continuidad introducido en las ecuaciones de aguas poco profundas por Baayen et al. [1].

Por otro lado, fue fundamental priorizar los objetivos múltiples para imitar un mecanismo de toma de decisiones similar a la referencia proporcionada por las decisiones de los operadores. Un resumen de los objetivos priorizados se muestra en la Tabla 1. Cuanto menor es el número de prioridad, más importante resulta cumplirlo.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Tabla 1. Múltiples objetivos y su prioridad en la ejecución de la optimización.

Prioridad	Objetivo	Tipo	Total
1	Caudal ecológico	caudal aguas abajo	3
2	Irrigación	caudal aguas abajo/arriba	14
3	Hidroeléctricas	caudal aguas abajo/arriba	3
4	Reservorio	nivel aguas abajo/arriba	9

2.2.3 Marco en tiempo real

Algunos cauces con afluencia lateral tenían medidores instalados para el caudal y nivel, proporcionando datos casi en tiempo real. La incorporación de estas series temporales se realizó utilizando un marco de integración de modelos en tiempo real, el RTO de KISTERS [2]. El marco puede albergar un adaptador de modelo arbitrario, con muy pequeñas restricciones en la codificación. El adaptador en python carga los resultados de la ejecución de optimización en una plataforma en la nube para su visualización y revisión. Este marco de integración de modelo flexible permite la generación de informes, que se pueden utilizar para comunicar a las partes interesadas y enviar el plan de asignación de agua a todas las partes involucradas.

El portal web se configuró de manera que también permita la entrada manual de datos, para que los operadores puedan ingresar valores arbitrarios a los parámetros de entrada.

2.3 PLATAFORMA DE VISUALIZACIÓN

La plataforma web de visualización se configuró con los objetivos de:

- proporcionar las dotaciones de agua.
- proporcionar los resultados del modelo de los caudales de todos los ríos y canales.
- proporcionar los consumos.
- visualizar información de: planes hidrológicos, caudales del SAIH, variables meteorológicas.
- proporcionar funciones de notificación, alarmas e informes configurables.
- ingresar observaciones manuales de interés.

Se integraron los siguientes datos a la plataforma web:

2.3.1 Planes Hidrológicos

Se integraron los datos de los planes hidrológicos de 2015-2021. Los datos son caudales en m³/s para las estaciones de La Magdalena, Cebrones del Río y Azud de Sta. Marina (Figura 2).

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes



Figura 2. Visualización web de los datos de los planes hidrológicos.

2.3.2 SAIH

Son datos del SAIH, están a tiempo real y son 10 minutales. Los datos son caudales en m^3/s .

2.3.3 Peticiones de los regantes, caudales y otras variables de operación

Son datos de los resultados de la ejecución del modelo y las peticiones de caudal que realizan los regantes.

2.3.4 Consumos

A partir de las peticiones de los regantes se calcularon los datos de consumo y de consumo acumulado. Los datos son volúmenes en m^3 . Se cuenta con datos históricos desde el 2010.

2.3.5 Meteorológicos

Se encuentran incorporadas las estaciones y datos de las variables meteorológicas medidas por AEMET.

2.3.6 Capas GIS

Se incorporaron capas GIS de los canales y de las áreas de los regantes.

3. RESULTADOS

Los resultados de los dos últimos años muestran un importante potencial en el modelo para mejorar la gestión del agua. Esto podría resultar en una mejor utilización de la energía hidroeléctrica mientras se aseguran los caudales mínimos ecológicos. Como se puede ver en la Figura 3, el flujo optimizado de las plantas hidroeléctricas muestra una alta demanda, mientras se proporcionan los caudales ecológicos y el abastecimiento de las demandas de riego.

Los resultados demuestran que existen flujos en exceso no utilizados por los generadores de energía hidroeléctrica, ya que estas se encuentran en sus capacidades máximas. Siendo que el objetivo para el nivel del agua es mantener el nivel operativo, aún deja potencial para el mejoramiento.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

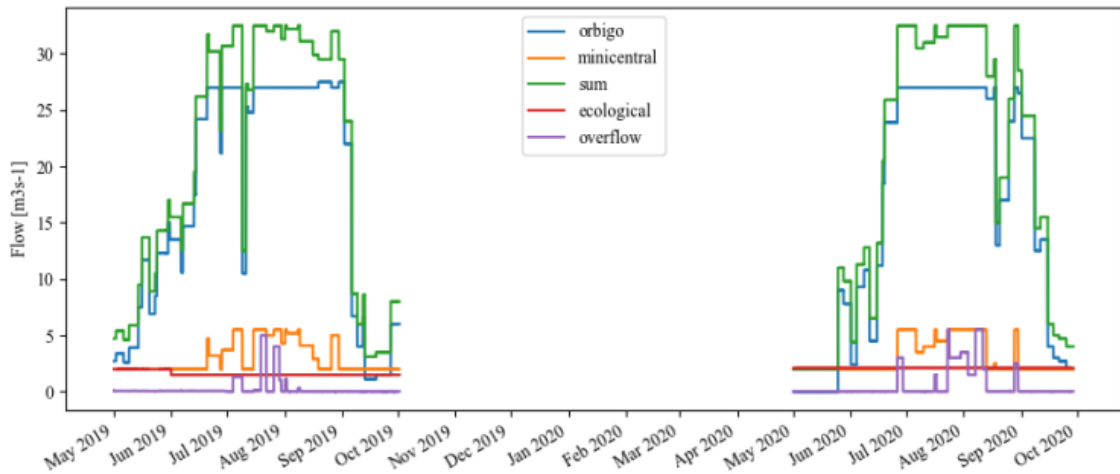


Figura 3. Caudales ecológicos y caudales de generación hidroeléctrica.

Además, la herramienta de visualización resultó ser intuitiva y fácil de utilizar permitiendo que el operador introduzca los datos del modelo en la aplicación de RTO (Figura 4) y lo ejecute para luego visualizar estos resultados junto a los demás (SAIH, planes hidrológicos, etc.).

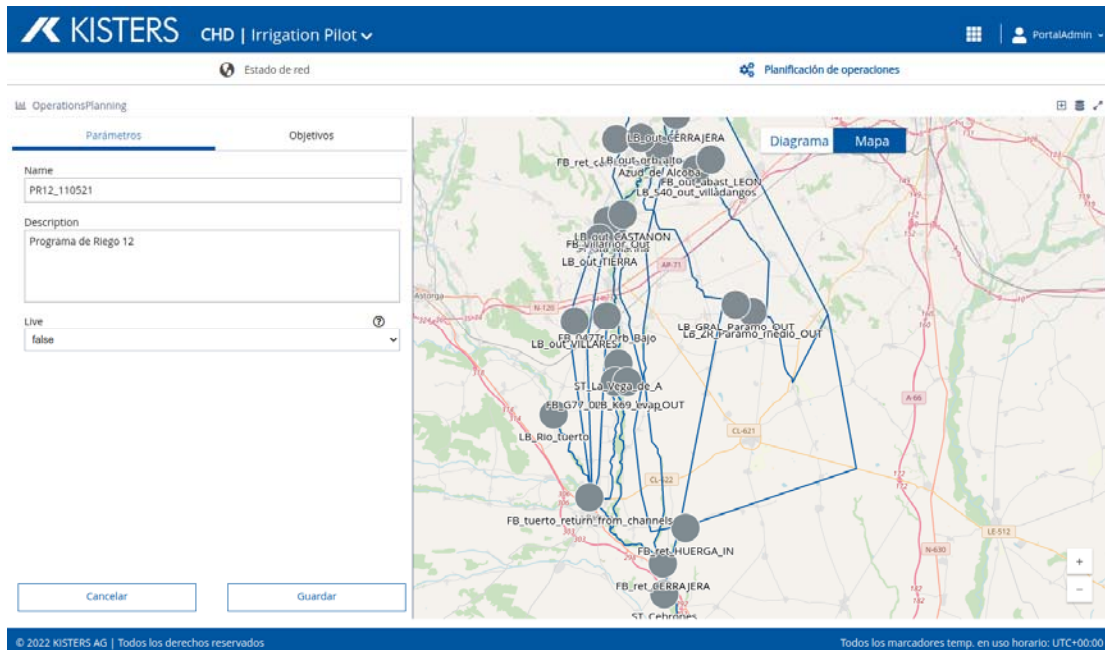


Figura 4. Visualización plataforma RTO para la ejecución del modelo.

4. CONCLUSIONES

Los resultados de la optimización muestran que la asignación de agua se puede automatizar y optimizar incluso en un intervalo de tiempo diario. El método de continuidad aplicado en este estudio resolvió el problema de optimización multiobjetivo. Los tiempos de ejecución

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

cortos dejan potencial en la introducción de modelos más detallados tanto en escala temporal como espacial.

Cada ejecución de optimización tardó alrededor de un minuto, incluidas todas las operaciones como obtener datos, ejecutar los scripts ETL y almacenar en caché las series temporales. Considerando un día como horizonte temporal de simulación, la velocidad de cálculo es adecuada. Por otro lado, para obtener una optimización horaria más detallada, se requiere tener los antecedentes en infraestructura hidráulica para incorporar al modelo generado.

Para utilizar mejor los datos de volumen de precipitación disponible, el volumen de almacenamiento de los embalses podría ser utilizado para aumentar el caudal antes de que el evento de lluvia se produzca, si los datos de pronósticos pueden predecir los eventos de precipitación excesivos que darán lugar a aluviones.

La plataforma web utilizada para la operación y visualización del modelo hidráulico y del Sistema de explotación Órbigo permite optimizar el flujo de trabajo dentro de la CHD. A su vez, se encuentra abierta a mejoras (incorporación de cámaras web, datos ráster, informes personalizados). Por otro lado, la plataforma web es de libre acceso para todos los regantes y personal de la CHD haciendo del flujo de información más transparente.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Confederación Hidrográfica del Duero, a Herminio Arias y Javier Rodríguez Ávalos, por su compromiso en el proyecto y por habernos brindado la oportunidad de trabajar con ellos. A KISTERS, quien nos proporcionó las herramientas para llevar a cabo el proyecto de innovación.

REFERENCIAS

- [1] J. H. Baayen, T. Piovesan, y J. VanderWees, “Continuation method for PDEconstrained global optimization: Analysis and application to the shallow water equations”, ArXiv e-prints: 1801.06507v6, Agosto 2019.
- [2] J. H. Baayen, J. Marecek, “Mixed-Integer Path-Stable Optimisation, with Applications in Model-Predictive Control of Water Systems”, ArXiv e-prints: arXiv:2001.08121, Enero 2020.
- [3] Jenq-Tzong Shiau, Fu-Chun Wu, “Pareto-optimal solutions for environmental flow schemes incorporating the intra-annual and interannual variability of the natural flow regime”, <https://doi.org/10.1029/2006WR005523>, 2007.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- [4] Alvarez-Vázquez, L.J., García-Chan, N., Martínez, A. et al., “Multi-objective Pareto-optimal control: an application to wastewater management”, *Comput Optim Appl* 46, <https://doi.org/10.1007/s10589-008-9190-9>, 2010, pp. 135–157.