

## **DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF STRATEGIES AND TOOLS FOR SIZING PRESSURIZED IRRIGATION NETWORKS ORGANIZED ON-ROTATION, IN GESTAR2014 SOFTWARE**

García Asin, Susana

Universidad de Zaragoza

In irrigation on-rotation systems occur lower flows than in irrigation on-demand systems, and therefore it may result in lower cost of pipes. In addition, the cost of energy in terms of established electricity rates can be optimized by using new remote control and management systems, an efficient operation of the pumping equipment and distribution of irrigation time in irrigation on-rotation systems.

In this paper we describe strategies develop, implement and tools to improve the sizing of pipes in pressurized irrigation on-rotation systems (for plot main lines and for pipes of the general distribution network). The algorithm solves when the total head is given by a pumping system (total head unknown) or if it is fixed (total head known).

These tools have been incorporated to GESTAR2014, software of hydraulic analysis and sizing for pressurized irrigation networks.

As example and case study, the methodology and the developed algorithm is applied to a general distribution network with pumping system. The obtained results are compared with results of sizing on-demand.

**Keywords:** *Irrigation; Rotation; Sizing*

## **DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS Y HERRAMIENTAS EN GESTAR2014 PARA EL DIMENSIONADO DE REDES DE RIEGO PRESURIZADAS A TURNOS**

Estableciendo una organización de riego a turnos, se producen caudales menores que los que se dan en los sistemas de riego a la demanda y por lo tanto puede resultar una inversión en tuberías menor. Asimismo, con la ayuda de los nuevos sistemas de telecontrol y de gestión, se puede conseguir en los riegos planificados, un funcionamiento eficiente de los equipos de impulsión y un reparto del tiempo de riego que optimice el coste de la energía en función de las tarifas eléctricas establecidas.

En este trabajo se desarrollan, implementan y describen estrategias y herramientas que mejoran el dimensionado de las conducciones en sistemas de riego a presión operando a turnos (tanto para conducciones principales de parcela que alimentan sectores, como para conducciones de redes de distribución general) con altura de cabecera conocida y desconocida.

Estas herramientas se han incorporado en la aplicación de análisis y diseño hidráulico para redes de riego presurizadas GESTAR2014.

Como ejemplo y caso de estudio, se aplica el algoritmo y la metodología de diseño y análisis a una red distribución general, con altura de cabecera desconocida (red con bombeo en cabecera) y se compara los resultados los obtenidos con un dimensionado a la demanda.

**Palabras clave:** *Riego; Turnos; Dimensionado*

Correspondencia: susana.García@unizar.es

## 1. Introducción

Si bien en los sistemas de distribución colectiva de agua a presión para usos de riego la disponibilidad permanente del suministro ha favorecido la explotación de los mismos en condiciones de demanda aleatoria, la explotación de estos sistemas con funcionamiento organizado, está cobrando creciente interés técnico y económico debido a la necesidad de ahorro energético, de economía en las inversiones y de eficiencia de uso de los recursos hídricos. Esta posibilidad se ve potenciada por las facilidades que aportan las nuevas tecnologías (sistemas de gestión, telecontrol...) para la gestión y la planificación del riego.

Por otra parte, los procesos de riego en parcela, de tipo agronómico o jardinería, se realizan mediante secuencias organizadas o turnos.

A la hora de economizar en la fase de diseño, la ventaja de estos sistemas radica en que los caudales circulantes por las tuberías son menores y por tanto puede existir una disminución en el coste total (Alduan y Monserrat, 2008). El agrupamiento de las tomas de riego en sectores que operen en turnos de riego establecidos, evita el sobredimensionado de la red y de los equipos de bombeo (Arviza, Martínez y Llopis, 2003) (IDAE. 2008). También es frecuente encontrar sistemas de riego a turnos en pequeñas redes destinadas a producciones familiares en zonas rurales de baja tecnificación, donde además la escasa magnitud de los caudales disponibles en cabecera, o la falta de automatismos de regulación y/o organización social, así lo aconseja.

Hasta ahora, las grandes redes colectivas de riego a presión en el contexto de sistemas de producción para comercialización de los productos, han sido diseñadas para un funcionamiento a la demanda, teniendo en cuenta caudales punta de diseño obtenidos a partir de la primera fórmula de Clément (Clément, 1966). Estableciendo una organización de riego a turnos, se producen caudales menores que los que se dan en los sistemas de riego a la demanda. La organización del riego, permite establecer unos caudales de diseño no estadísticos, y con una buena planificación, fijarlos para un funcionamiento eficiente de los equipos de impulsión y un reparto del tiempo de riego que optimice el coste de la energía en función de las tarifas eléctricas establecidas.

La mejora y la automatización de los métodos de dimensionado de tuberías en redes de distribución a presión con funcionamiento a turnos, permite obtener combinaciones de diámetros más económicas con funcionamientos fiables, e instalaciones viables y de calidad.

Dado que el dimensionado de las conducciones principales dentro de una parcela, atiende a los mismos criterios de optimización que se aplican a redes de distribución general a turnos, puesto que los sectores dentro de la parcela, obedecen a un funcionamiento organizado, estos métodos son aplicables a la proyección de riegos en parcela.

Ante estos antecedentes, se ha desarrollado una serie de algoritmos para el dimensionado de conducciones de sistemas con riego organizado a turnos, aplicable a las conducciones de distribución general y a conducciones principales de parcela que alimentan sectores. Estos desarrollos se han incorporado como un nuevo módulo en la aplicación GESTAR2014.

Como ejemplo de uso de las estrategias y herramientas y caso de estudio, se aplicará el algoritmo y la metodología de diseño y análisis completa, a una red distribución general, con altura de cabecera desconocida (red con bombeo en cabecera) formada por 94 hidrantes que suministran agua a 596 Ha. Con el objeto de comprobar los costes relativos, se presentarán los resultados del dimensionado del mismo caso de estudio, diseñado para un funcionamiento a la demanda.

## 2. Metodología. Diseño conceptual del método

### 2.1. Establecimiento de los turnos de riego

#### Caudal Nominal de la red a Turnos (Q<sub>Nt</sub>) y Caudales de Diseño (Q<sub>d</sub>).

Para el diseño de redes de riego con funcionamiento a turnos, tomaremos como caudales de diseño, los caudales acumulados. Es decir, el caudal de diseño de un tramo, corresponderá a la suma de los caudales instalados aguas abajo.

Cada tramo, tendrá tantos caudales de diseño como turnos en los que intervenga, y cada uno de estos caudales de diseño será igual a la suma de las dotaciones de los hidrantes (o nodos de consumo en general) aguas abajo, considerándose todos los hidrantes del turno en cuestión, abiertos.

Denominamos Caudal Nominal de la red a turnos (Q<sub>Nt</sub>), el mayor de los caudales de diseño del primer tramo o tubería principal de la red.

El ahorro de diseñar una red con funcionamiento a turnos, frente a un dimensionado a la demanda, viene dado por la reducción de caudales en la cabecera, y en los ramales si la agrupación en turnos se ha realizado siguiendo criterios de reparto de caudales.

Debido a la tendencia de precios crecientes exponencialmente de los grandes diámetros, la mayor parte del ahorro al diseñar una red con funcionamiento a turnos, viene dado por la reducción de caudal en las conducciones comunes a gran parte de la red, más aún en redes cuya tubería principal es de gran longitud. Por lo tanto, establecer un reparto de turnos que consiga reducir el caudal de diseño en una parte significativa de la red, respecto al que obtendríamos con un diseño de caudales probabilístico para redes con funcionamiento a la demanda, será uno de los objetivos de la estrategia de establecimiento de los turnos de riego.

Para conseguir que el Q<sub>Nt</sub> sea menor que el Q<sub>d</sub> con funcionamiento a la demanda, se actuará sobre las dotaciones de los hidrantes, tiempos de riego y la duración y número de turnos.

#### Relación Dotación-Número de turnos.

Las dotaciones se establecen de manera que pueda suministrarse el volumen necesario diario de la parcela, en el mes de máximas necesidades, dentro de la JER.

Cuando se ajustan las dotaciones en un riego a la demanda, los criterios y valores pueden ser diferentes. El tiempo disponible efectivo para el riego del hidrante suele ser mayor para riegos a la demanda. En el caso de redes con funcionamiento a turnos, el tiempo efectivo de riego del hidrante, es el tiempo de duración del turno de riego, puesto que fuera de él, no es posible abrir. Introduciremos el término Jornada Efectiva de Riego del Turno (JER<sub>t</sub>), igual a la duración del turno.

$$\sum_{t=1}^n JER_t \leq JER \quad (1)$$

El número de turnos de la red, se fijará de manera que la duración total de todos los turnos, no sobrepase el tiempo establecido como JER de la red.

Las dotaciones determinan los tiempos necesarios de riego de los hidrantes. Los tiempos de riego de los hidrantes, condicionan la duración del turno y a su vez, el número de turnos posibles dentro de un JER establecido.

La dotación influye directamente en la duración de los turnos y en el número de turnos posibles. Y el número de turnos que queramos diseñar, puede condicionar un aumento de

dotación para que sea posible regar en el tiempo límite, creándose una dependencia de estos factores bidireccional: la dotación influye en el número de turnos, y si deseamos aumentar el número de turnos, esto puede condicionar un cambio en las dotaciones.

Denominaremos Dotación Teórica ( $D_t$ ) a la dotación mínima necesaria para suministrar el volumen que cubre las necesidades de los cultivos en la superficie instalada en el hidrante en un día del mes de máximas necesidades, en un tiempo de riego establecido, menor que el JERt. Para calcular la  $D_t$  de cada hidrante, se aplica la expresión (1).

$$D_{t_i} = \frac{Q_{fc} \cdot Sup_i \cdot 24hrs}{T_i} \quad (2)$$

Siendo:

$D_t$  Dotación teórica (l/s) necesaria para suministrar el volumen necesario en un día en la parcela en el mes de máximas necesidades, con el tiempo de riego establecido.

$i$  Hidrante

$T$  Tiempo establecido de riego del hidrante (hrs)

$Q_{fc}$  Caudal ficticio continuo de la zona (l/s ha y día)

$Sup$  Superficie (ha)

La  $D_t$  puede dejarse como dotación definitiva, tarando el hidrante al detalle. O bien puede “normalizarse”, ajustando la dotación a valores más usados y prácticos. Esta dotación corregida, la denominaremos Dotación Normalizada (DN)

Además de los criterios agronómicos, a la hora de “normalizar” las dotaciones, se debe considerar también otro tipo de factores como:

- El tipo de amueblamiento en parcela. Si se va a instalar riego por goteo, los sectores o posturas de riego, tendrán un caudal máximo tolerable.
- Dotación mínima-máxima del proyecto. Por cuestiones económicas, de calidad, normativas y seguridad, en ocasiones, se establece un tamaño mínimo o/y de tamaño máximo de hidrante.
- Tamaño de los hidrantes: Caudales normalizados de los hidrantes (en el caso de no tarar los hidrantes a valores particulares).

En el caso de corregir la dotación, el Tnec de riego deja de ser el establecido inicialmente, y deberá ser recalculado, aplicando la expresión anterior fijando como dotación la DN. Si los nuevos tiempos de riego de los hidrantes son menores después de la corrección, se dará cierto grado de libertad a la hora de abrir el hidrante dentro de la JERt, flexibilizando el uso de la red, o bien se puede barajar la posibilidad de aplicar un turno más.

#### Asignación de Turnos

El proceso de dimensionado de la red con riego organizado requiere previamente la asignación de turnos. Los turnos o agrupaciones de hidrantes que van a regar al mismo tiempo no son fijados de manera aleatoria, deben agruparse por algún criterio o la combinación de varios.

Las propiedades de los hidrantes a tener en cuenta a la hora de distribuir los hidrantes en los diferentes turnos de riego son por ejemplo, la cota, la dotación, el tiempo necesario de riego etc...así como otros topológicos y operacionales derivados de la casuística y uso particular de cada red.

Una vez dispuestos los números de turnos y su  $JERt$ , se procede al reparto o agrupación de los hidrantes. Los criterios y estrategias propuestas para realizar este reparto son:

- Tanteo usando uno o varios criterios propuestos.
- Caudal de diseño en cabecera (dotaciones de los hidrantes): Los hidrantes se agrupan en los diferentes turnos sumando en cabecera un caudal inferior al obtenido con la fórmula de Clément y lo más homogéneo posible para todos los turnos
- No acumulación de caudal en ramales finales: En los ramales, se asignarán los turnos de manera que no coincidan en el mismo turno hidrantes contiguos en el ramal, para no sobrecargarlo
- Tiempos necesarios de riego. Puede interesar agrupar a todos los hidrantes con  $Tnec$  mayores en un turno de duración adaptado a esta, o bien puede interesar no agrupar los hidrantes de mayor  $Tnec$  en el mismo turno, para dejar cierta holgura y no alcanzar el  $QNt$  durante todas las horas de duración del turno.
- Cota (en el caso de que exista la posibilidad de hacer pisos de bombeo): si hay zonas con una cota claramente diferenciada, y el sistema de alimentación de la red es por bombeo directo, el establecimiento de turnos de riego con diferentes alturas nominales de impulsión es una estrategia que abarataría tanto los costes en tuberías si los caudales son menores que a la demanda, como los costes energéticos al adaptar el bombeo a las necesidades de presión de cada turno evitando excesos de energía en los hidrantes que necesitan menos presión.

La asignación de turnos influye en el coste de la red resultante. Para una cierta asignación de turnos hay un coste mínimo, pero podría existir otra asignación distinta que condujera a un coste más económico. La inclusión de la definición de turnos como variable de decisión dentro del proceso de optimización, es un aspecto en que hay pocas contribuciones y que supone una complejidad más allá del alcance de los objetivos de este trabajo. En cualquier caso señalar, que la contrapartida de una red operando a turnos, en que así mismo, los turnos estén optimizados para un mínimo coste, supondrá una excesiva rigidez a la hora de permitir cambios de explotación futuros.

## 2.2. Dimensionado de la red con funcionamiento a turnos

### Descripción del algoritmo implementado para el dimensionado de redes con altura de cabecera conocida, con funcionamiento a turnos

El proceso comienza dimensionando cada uno de los turnos, como una red de riego independiente, con un caudal de diseño de cada tramo igual a la suma de las dotaciones asignadas aguas abajo en las tomas abiertas en cada turno, utilizando para ello el Método de Dimensionado de la Serie Económica Mejorada (González y Aliod, 2003).

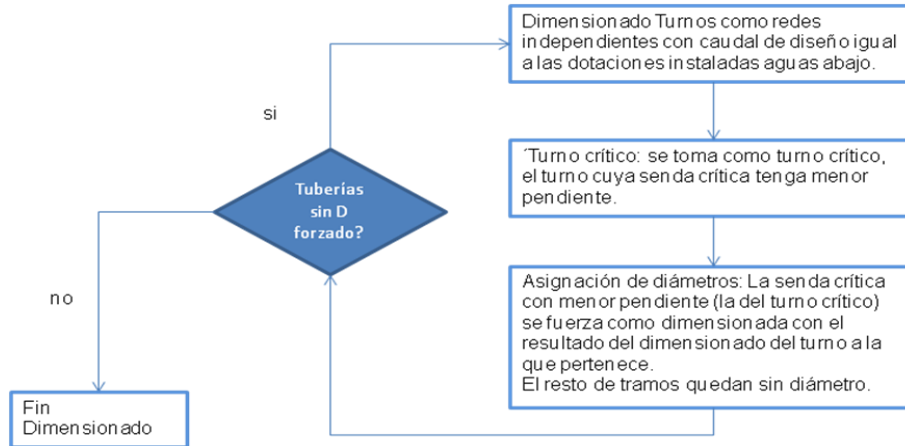
De estos dimensionados se obtienen tantas soluciones para cada tramo como turnos en los que el tramo en cuestión interviene.

A continuación se selecciona el turno crítico, definido como el turno cuya senda crítica sea la de menor pendiente. La senda crítica de menor pendiente de todos los turnos, pasa a considerarse la senda prioritaria. Para esta senda prioritaria, se toma como solución los resultados del dimensionado del turno crítico. En el resto de conducciones, quedan sin asignar los diámetros, entrando como incógnitas en las siguientes optimizaciones turno a turno.

Sucesivamente, se dimensionan de nuevo todos los turnos, forzando los diámetros de los tramos en común con el trayecto de la senda prioritaria anterior, permitiendo así ajustar los diámetros, dado que los trayectos en común tendrán diámetros mayores que los necesarios

para alcanzar la presión requerida en los trayectos críticos de segundo orden. El proceso se repite hasta que todas las conducciones han sido fijadas (Figura 1).

**Figura 1. Descripción del algoritmo implementado para el dimensionado de redes con funcionamiento a turnos y altura de cabecera conocida**



De esta manera se obtiene un dimensionado que garantiza el buen funcionamiento de los sectores de riego dentro de una parcela, o de los hidrantes en una red a turnos, alcanzando como mínimo, la presión requerida en el trayecto más crítico y reduciendo, en la medida de posible el resto de diámetros, para ajustar la presión en los turnos o sectores no prioritarios, aprovechando los “excesos de diámetro” instalados aguas arriba de un tramo necesarios para alimentar otros turnos, economizando la instalación.

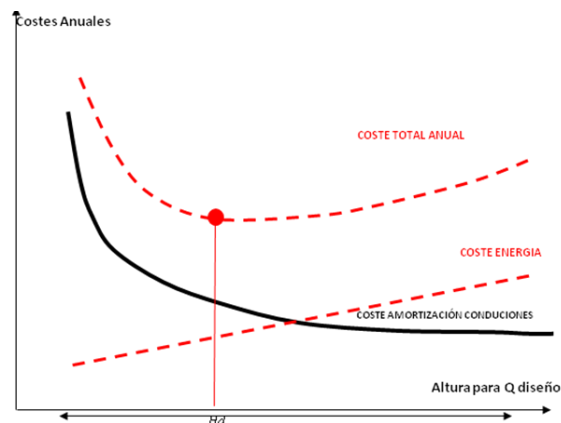
Descripción del algoritmo implementado para el dimensionado de redes con altura de cabecera conocida, con funcionamiento a turnos

El mismo proceso de dimensionado para altura cabecera conocida, puede resolver también los sistemas con altura de cabecera desconocida (bombeo en cabecera con la altura de impulsión grado de libertad a resolver), recurriendo a un proceso iterativo que realiza un barrido de posibles diseños con altura de impulsión distintas y que obtiene del mínimo de la función de COSTE TOTAL ANUAL. (Figura 2)

El COSTE TOTAL ANUAL en función de la H de impulsión, es la suma de Coste Amortización de Conducciones Anual y el Coste Energía Anual.

En la formulación del diseño óptimo de redes con bombeo directo contemplando el coste energético existe una relación inversa entre el coste de la energía consumida en la campaña de riego y los diámetros de la red elegidos.

**Figura 2. Mínimo en la función Coste Total Anual en función de H de impulsión**



Para encontrar una solución óptima, se ha desarrollado e implementado un algoritmo que evalúa la función de COSTE TOTAL ANUAL, dentro de un rango de alturas de impulsión viables hasta detectar un valor mínimo.(Figura 3).

En primer lugar, se estima una  $H$  mínima necesaria en cabecera asignando. Se calcula el valor mínimo que debe adoptar la presión en cabecera para obtener presiones superiores al valor de consigna en los nodos, considerando que en las tuberías del trayecto se presenta una pendiente hidráulica de referencia mínima (p.e 0.0015). Esta  $H$ , será la altura de partida del barrido.

A continuación se procede a un dimensionado de la red a turnos con altura de cabecera conocida.

Una vez dimensionada la red, se computa el Coste Amortización Conducciones Anual y el Coste Energía Anual para la  $H$  de cabecera impuesta.

El Coste Amortización Conducciones Anual es igual al pago anual de un préstamo basándose en pagos constantes y en una tasa de interés constante, siendo el valor actual, el coste de las conducciones.

El Coste Energía Anual se compone de dos términos, uno que contabiliza el consumo energético y otro la potencia contratada.

El término de Coste Energético Anual, se estima con la formulación simplificada (3) para cada uno de los turnos, teniendo en cuenta el Volumen particular de cada turno, el total será la suma del Coste Energético Anual (4) de todos los turnos.

$$CES_t = \frac{\rho g \cdot V_t}{\eta} \cdot H_i \quad (3)$$

$$\text{Coste Energético Anual} = \sum CES_t \cdot p \quad (4)$$

Siendo:

$CES_t$	Consumo Energético Anual del turno
$\rho$	Densidad
$g$	Gravedad
$V_t$	Volumen anual elevado en el turno.
$H_i$	Altura de impulsión evaluada
$\eta$	Rendimiento estación de bombeo
$p$	Precio energía ponderado en volumen

Para cada turno, se aplica la expresión (5), obteniendo la potencia nominal en función de su QNt.

$$P_t = \frac{\rho g Q_{Nt} H_i}{\eta} \quad (5)$$

Siendo:

$P_t$	Potencia nominal del turno
$Q_{Nt}$	Caudal nominal del turno
$H_i$	Altura de impulsión evaluada
$\eta$	Rendimiento estación de bombeo

El Coste Potencia Contratada Anual se calcula en base a la Potencia nominal máxima de los turnos de la red.

$$\text{Coste Anual Potencia Contratada} = P_{\max} \times \text{Precio ponderado} \times 12$$

$$\text{Coste Energía Anual} = \text{Coste Energético Anual} + \text{Coste Potencia Contratada Anual}$$

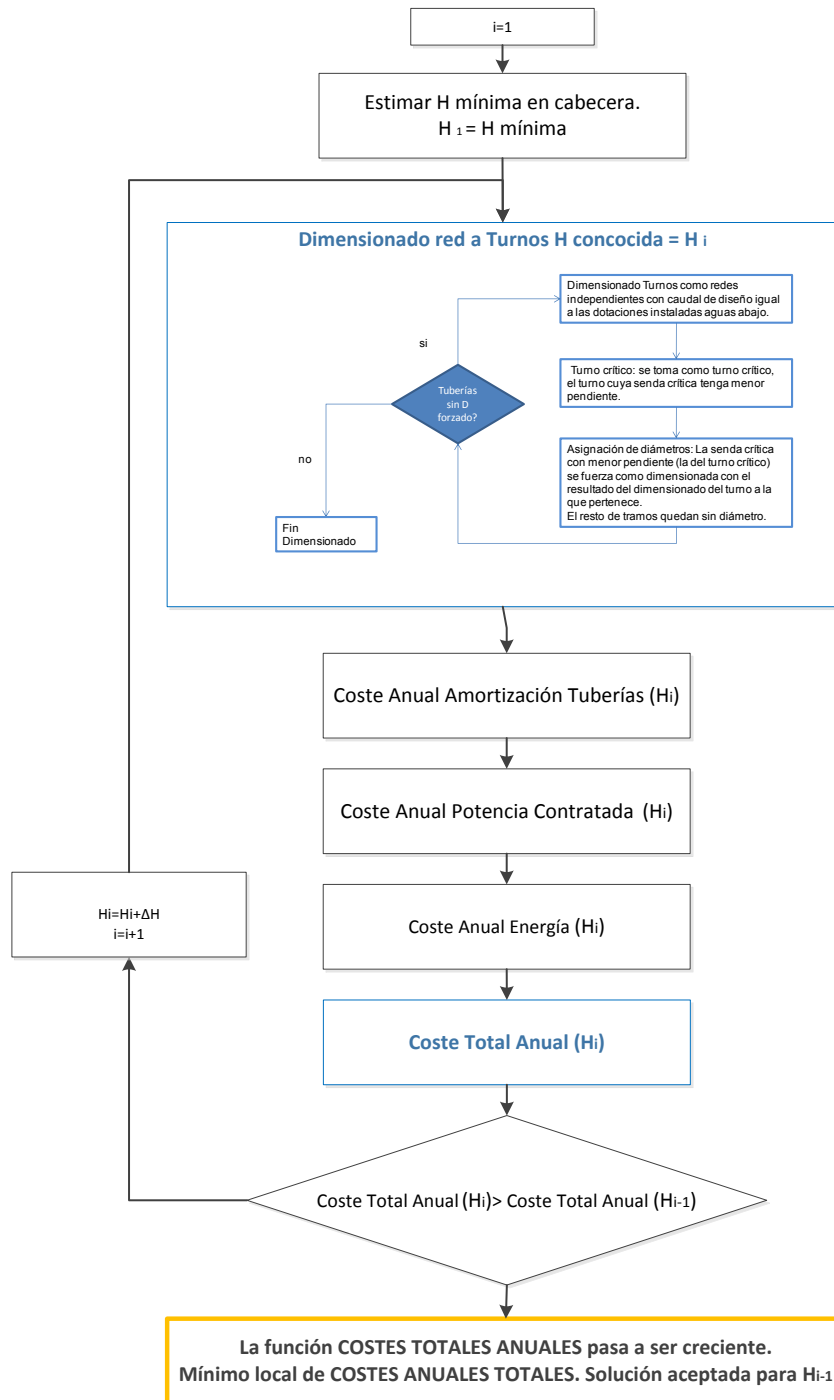
La suma de ambos términos nos dará el COSTE TOTAL ANUAL para esta combinación de diámetros y esta  $H$ .

Se vuelve a dimensionar la red, pero imponiendo una altura en cabecera conocida igual a la anterior más un incremento (valor que pueda ser sensible a cambio de resultado), se obtiene el COSTE TOTAL ANUAL para este valor de altura en cabecera incrementado.

Se compara el COSTE TOTAL ANUAL anterior con el obtenido después de incrementar la altura en cabecera, y si el nuevo COSTE TOTAL ANUAL es mayor, significa un cambio de tendencia en la función (pasa a ser creciente) Entre las dos  $H$ , se encuentra un mínimo local. Consideraremos como resultado óptimo, la combinación de diámetros obtenidos antes del incremento de la altura en cabecera que produce el cambio de tendencia. Y como  $H$  de impulsión nominal, la altura sin el incremento que se impuso como altura conocida.



**Figura 3. Resultados**



### 2.3. Validación del dimensionado: Planificación y simulación de los turnos

Una vez dimensionada la red, es importante la verificación de las condiciones de diseño mediante la simulación de turnos y de herramientas de planificación que permitan analizar el comportamiento hidráulico y energético del sistema.

La verificación de presiones en condiciones de diseño en el caso de la red dimensionada con riego a turnos, pasa por simular cada uno de los turnos, y comparar las presiones alcanzadas con las establecidas como consigna.

El objetivo de esta fase, es validar la solución obtenida y proceder a su reajuste local si el proyectista lo considera conveniente. La simulación del comportamiento de cada turno muestra el estado hidráulico-energético completo del sistema en cuanto a presiones alcanzadas en los hidrantes, velocidades en conducciones, caudales circulantes, potencias consumidas para todos los turnos en un momento determinado, y para una evolución temporal del sistema a lo largo del tiempo ( planificación de campañas, niveles en balsas, consumo de energía total, etc..).

En la etapa de simulación, puede cuantificarse el efecto de diversos cambios en la construcción de la red, como sería reducción de algún diámetro y la magnitud de las repercusión en la presión obtenida en algunas tomas, que puede ser admisible, permitiendo un posterior ajuste de la red.

También resulta relevante estudiar la flexibilidad de la red en su explotación, analizando el impacto de incluir riegos de hidrantes fuera de turno en un momento dado, de cambiar la asignación de turnos, aumentar las dotaciones, etc

### **3. Desarrollo e Implementación del Método**

La solución detallada para el dimensionado a turnos, se ha implementado desarrollado e integrado en el software existente GESTAR2014.

GESTAR2014 es una herramienta de referencia para la ingeniería hidráulica de redes de riego a presión, desarrollado por el Grupo de Investigación Gestar, del Área de Mecánica de Fluidos, Escuela Politécnica Superior (Huesca), Universidad de Zaragoza.

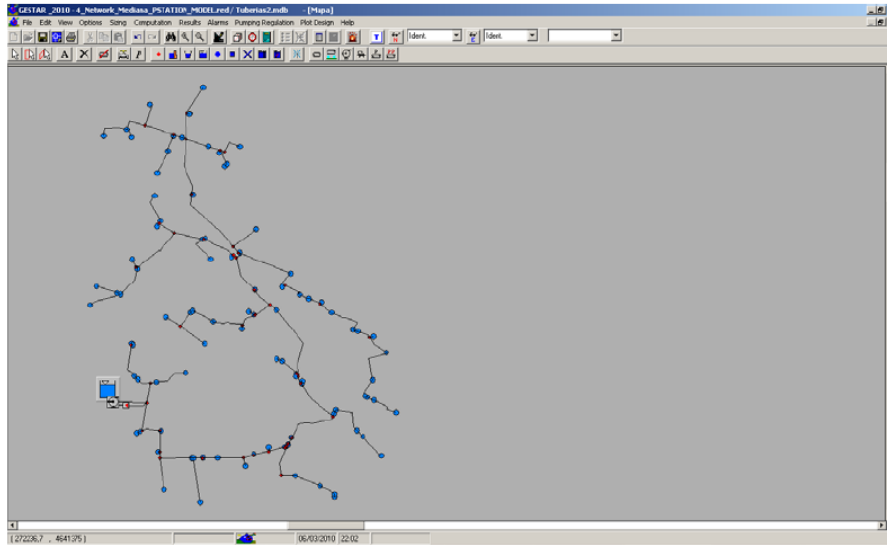
Además del algoritmo de dimensionado a turnos, se han implementado e integrado en GESTAR2014 soluciones adaptadas a este proceso, incorporando nuevas herramientas de definición de turnos: especificación del número de turno, duración y definición de caudales.

### **4. Caso de estudio**

El caso de estudio corresponde al dimensionado a turnos de una red de riego de distribución general, previamente dimensionada para un funcionamiento a la demanda. Para validar el algoritmo se procede a dimensionar la red operando a la demanda y funcionando a turnos, para comprobar a continuación los costes relativos y el buen funcionamiento hidráulico del sistema.

La red "MedianaWorkingCase" (Figura 4) consta de 95 hidrantes, y abastece a una superficie de 595,8 ha. La dotación anual es de 7.482 m<sup>3</sup>/ha. Se alimenta de un bombeo directo con cota y las presiones de consigna en los hidrantes se calculan a partir de 45 mca antes del hidrante, más la diferencia de cota máxima dentro de la parcela (parcelas con cobertura por aspersión). Los materiales a emplear en el dimensionado son PRFV y PVC molecular. El Caudal Ficticio Continuo de la zona se considera 0.75 l/s ha y día, y la Jornada Efectiva de Riego, 15 h.

**Figura 4. Modelización de la red en GESTAR2014**



La topología y datos previos han sido modelizados al detalle en la aplicación GESTAR2014

Otros datos para el dimensionado:

- Vmin 0.5 m/s V max 2.5 m/s
- Amortización en 25 años al 4 % interés
- LE % pérdidas de carga 5% Margen Seguridad timbraje 10 mca
- Rend. global bombeo 70%. Precio Base kwh 0,0609 €. Precio Base kw 0,0748 €

## 5. Resultados

### 5.1. Caudales de diseño

*Red a la demanda:*

Fórmula de Clément. Garantías de suministro: hasta 4 nodos aguas abajo, caudal acumulado, entre 5 y 14 nodos, garantía de 99%, a partir de 15 nodos garantía de 95%.

Como resultado se obtiene un caudal en cabecera de 0,850 m<sup>3</sup>/s . S. D. 50% ( Q instalado 1,726 m<sup>3</sup>/s)

*Red a turnos:*

Al tratarse de una JER reducida (15 h) y dotación anual elevada (7.482 m<sup>3</sup>/ha) se establece 2 turnos (JERt de 7.5 h)

Se calculan Dotaciones Teóricas para un tiempo de riego de 7h (dejando un margen de media hora)

La dotación calculada se ajusta a caudales estándar, obteniendo Dotaciones Normalizadas. Los tiempos de riego serán en función de la nueva dotación, quedando no homogéneos.

Para agrupar los hidrantes en los dos turnos equilibrando caudales en cabecera, se han clasificado por tamaño y distribuido el grupo de hidrantes del mismo tamaño entre los dos turnos de manera equitativa

Se han supervisado los ramales con más hidrantes, redistribuyendo y alternando los hidrantes dentro del ramal para no acumular excesos de caudal en uno de los turnos.

Turno 1: 0,836 m<sup>3</sup>/s ; Turno 2 :0,83 m<sup>3</sup>/s. (Q instalado 1,666 m<sup>3</sup>/s)

## 5.2. Dimensionado

Con un funcionamiento a turnos, y dimensionando las conducciones con la herramienta implementada en GESTAR2014 en el caso de estudio “MedianaWorking Case”, se consigue un ahorro de 3% en la inversión de tuberías. y un 5% en el coste energético del bombeo, traduciéndose en un coste menor anual total del 4%. (Tabla 1)

Para la tubería principal de cabecera, en ambos dimensionados, se obtiene el mismo diámetro, PRFV-16DN 700 . En el comienzo de la red no varían los resultados del diseño a turnos o la demanda. Al tratarse de una red con una JER reducida, típica de las redes con bombeo directo, con probabilidades de apertura de los hidrantes altas, imposibilita el reparto de caudales más fraccionado en turnos. Esto hace, que no se reduzca sensiblemente el caudal en cabecera respecto del obtenido a la demanda. Aún así, la organización lógica del riego en los ramales y la efectividad del método de diseño implementado, evita acumulación de caudales y optimiza los diámetros, resultando un sistema tanto en inversión como en consumo energético más económico.

**Tabla 1. Resultados**

	<b>Demanda</b>	<b>Turnos</b>	<b>Ahorro</b>
H (m)	80,45	76,17	
Q diseño(m <sup>3</sup> /s)	0,85	0,83	
Q instalado(m <sup>3</sup> /s)	1,726	1,66	
Coste Conducciones €	1.429.041,63	1.391.548,73	3%
Coste Amortización Anual€	91.475,76	89.075,77	3%
Coste Energía Anual €	90.224,67	85.380,31	5%
<b>COSTE TOTAL ANUAL€</b>	<b>181.700,43</b>	<b>174.456,08</b>	<b>4%</b>

Los ahorros en inversión pueden alcanzar hasta el 20% en redes con jornadas efectivas de riego superiores y probabilidades de apertura de hidrantes mayores, como en el caso de estudio “WorkedExample” desarrollado como trabajo previo a este informe (García Asín, Ruiz, Aliod, Paño, Seral y Faci, 2011).

## 6. Conclusiones

Se ha implementado y validado un algoritmo que permite superar las simplificaciones y limitaciones que otras estrategias de diseño a turnos adolecen. El algoritmo, es general y flexible, permitiendo considerar diferentes criterios de diseño, por lo que aumenta la operabilidad y eficacia en la optimización de diámetros en cualquier tipo de red que sirva caudales determinados por turnos preestablecidos, ya sea en el interior de una parcela, como en la red de distribución general.

Las redes con Jornadas Efectivas de Riego extensas (redes alimentadas desde balsa generalmente) permiten el establecimiento de más número de turnos, fraccionando el caudal instalado resultando diseños con menor inversión en tuberías que los obtenidos para redes con funcionamiento a la demanda para el mismo servicio. Este efecto será más significativo en los casos en los que el caudal de diseño para funcionamiento a la demanda,

ofrezca garantías de suministro elevadas, superando en gran medida el caudal continuo de la red.

En el caso de redes con Jornadas Efectivas de Riego reducidas (redes alimentadas por bombeo directo), difícilmente si las probabilidades de apertura de los hidrantes son altas será posible reducir el caudal de diseño obtenido para un diseño de riego a la demanda, por la no disponibilidad de tiempo para distribuir los volúmenes en caudales más bajos. Las diferencias en la inversión serán menores, y vendrán dadas mayormente por el reparto lógico de los turnos en los ramales y por el efecto de aprovechamiento de diámetros mayores aguas arriba en los nodos no críticos propio del algoritmo desarrollado.

La optimización de las pérdidas de carga hace que las alturas de impulsión resultantes sean más favorables, repercutiendo también en la reducción de consumos energéticos.

Gracias al control de quien y cuando se riega, se garantiza el uso de los equipos de bombeo a rendimientos adecuados y en los periodos más baratos, permitiendo optimizar no solo el consumo, sino también el coste energético.

Si las necesidades de presión entre los turnos son diferenciadas, puede obtenerse un ahorro añadido importante adaptando las consignas de impulsión de la estación de bombeo y así evitar excesos de consumo de energía en los turnos menos exigentes. De ahí la importancia de las nuevas herramientas de análisis hidráulico y control de la estación de bombeo y de la red de manera conjunta.

Como investigación futura y continuación del presente trabajo de investigación se está adaptando el algoritmo actual para que solucione el dimensionado óptimo con funcionamiento a turnos con altura de cabecera desconocida variable de en cada turno.

El funcionamiento organizado en turnos de las redes de riego compromete la adaptabilidad de la capacidad de transporte y de uso de la red ante cambios futuros, pero garantizan el funcionamiento al cien por cien, bajo las condiciones de diseño. El caudal circulante en una red funcionando a turnos no se alejará de su caudal de diseño (cercano al caudal continuo de la red), evitando picos de caudal producidos por la aleatoriedad de la demanda.

## 7. Referencias

- Alduan A & Monserrat J. (2008). Estudio comparativo entre la organización a la demanda y por turnos en redes de riego a presión. XXVI Congreso Nacional de Riegos Huesca.
- Arvizu J; Martínez F; Llopis E (2003). Propuesta de una metodología para la distribución óptima de tomas en sectores en redes de riego a presión con organización por turnos. XXI Congreso Nacional De Riegos Mérida.
- Clément, R. (1996). Calcul des débits Dans les réseaux d'irrigation fonctionnant a la demande. La Houille Blanche, n.5.
- IDAE. (2008). Protocolo de auditoría energética para las comunidades de regantes. Ministerio de Industria.
- García Asín, S; Aliod R; Paño J; Seral, P. (2010) .Nuevas herramientas implementadas en Gestar2010 para el diseño y análisis de redes de distribución en parcela. Actas del XXVIII Congreso Nacional de Riegos León.
- García Asín, S; Ruiz Cebollada, R; Aliod R; Paño J ; Seral, P; Faci, E (2011) .Nueva herramientas implementada en Gestar2010 para el dimensionado de tuberías principales en redes de distribución en parcela y redes de distribución general a turnos. Actas del XXIX Congreso Nacional de Riegos Córdoba.
- González, C. & Aliod, R. (2003). Mejoras en el método de la serie económica para el dimensionado de redes ramificadas. Actas del XXI Congreso Nacional de Riegos. Mérida (Badajoz).

Labye, Y; Olson, MA; Galand, A; Tsiourtis, N; (1988). Design and optimization of irrigation distribution networks. FAO Irrigation and Drainage paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Manuales de uso:

Diopcal, descripción y uso de la aplicación. Grupo de Investigación y Desarrollo de Modelos Hidráulicos. Departamento de Ingeniería Hidráulica. Universidad Politécnica de Valencia.

Manual GESTAR2014. Grupo de Investigación GESTAR. Área de Mecánica de Fluidos. Escuela Politécnica Superior Huesca. Universidad de Zaragoza. [www.gestarcad.com](http://www.gestarcad.com).