

ANALYZING THE ENERGETIC POTENTIAL OF NON PRESSURIZED HYDRAULIC NETWORKS

Zubelzu Mínguez, Sergio ¹; Sánchez, Raúl ²; Juana, Luis ²; Rodríguez, Leonor ²

¹ Universidad Complutense de Madrid, ² Universidad Politécnica de Madrid

In this paper the results of analyzing the potential energetic use of fluids under non pressurized regime conditions will be exposed. Different situations under uniform or variate regime conditions are studied. For both regime situations, a sensitive analysis of the main design variables (geometric, longitudinal slope or materials) on the energetic potential has been conducted. The achieved results shows the availability, or the capability to create, a certain hydraulic energy directly usable or transformable in mechanical, electric or thermal energy.

Keywords: Hydraulic; non-pressurized pipelines; energetic use

ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE CONDUCCIONES HIDRÁULICAS NO FORZADAS

En el presente trabajo se exponen los resultados teóricos del estudio de un posible aprovechamiento de la energía contenida en conducciones hidráulicas bajo condiciones de régimen no forzado. Se analizan diferentes situaciones del fluido tanto bajo el régimen uniforme como en régimen variado. Para ambos tipos de regímenes se analizan las implicaciones que tiene el manejo de las principales variables de diseño (características geométricas, pendiente longitudinal y materiales empleados) en cuanto a la generación y aprovechamiento energético de la energía contenida en el fluido. Los resultados muestran la disponibilidad, o la posibilidad de generación, de un remanente de energía de carácter hidráulico susceptible de ser aprovechada directamente o mediante su transformación en energía mecánica, eléctrica o térmica.

Palabras clave: Hidráulica; conducciones no forzadas; aprovechamiento energético

1. Introducción

Los sistemas de transporte de agua en régimen libre requieren de un preciso análisis del estado energético del fluido en cada punto de la red. La dependencia del estado energético y por tanto del comportamiento hidráulico del mismo respecto de las características topográficas impone condicionantes relevantes al diseño de este tipo de sistemas. Denominando H al nivel energético del fluido, con las simplificaciones oportunas y aceptando la nulidad del sumando referido a la presión de la ecuación de la energía, puede definirse este valor a partir del nivel de energía específico (H_0) y la cota absoluta (z) en los términos expuestos en la ecuación 1 (Losada, 2000).

$$H = H_0 + z = (y + u^2/2g) + z \quad (1)$$

Donde y representa el calado del fluido en la conducción, u la velocidad, g la aceleración de la gravedad y z la cota de la rasante de la conducción.

En términos generales el diseño de este tipo de redes viene condicionado por la existencia de unas condiciones energéticas tales que la velocidad del fluido se mantenga dentro de unos límites acordes con la capacidad de las obras y los materiales para el adecuado funcionamiento hidráulico de la instalación. Aceptando la existencia de condiciones de régimen uniforme, de entre los componentes de la ecuación 1, el calado es una variable de diseño hidráulico cuya influencia se ejerce de manera directa y a través de las variables de las que depende la velocidad.

Si el estudio de la energía específica constituye el núcleo del diseño hidráulico de las conducciones en régimen libre, el sumando topográfico determina en gran medida el diseño de las obras de dichos sistemas. Esta influencia se ejerce igualmente de manera indirecta y como condicionante a la velocidad, de nuevo aceptando la existencia de régimen uniforme (en cierta medida en condiciones de régimen gradualmente variado la topografía también ejerce influencia). Tal es el caso que en determinados sistemas en régimen libre (conducciones de saneamiento o determinadas redes de riego), una vez fijados los límites permitidos para la velocidad del fluido y una sección para la conducción, la pendiente longitudinal constituye la principal variable de diseño junto con la geometría concreta de las conducciones. Este hecho viene a determinar el trazado de las conducciones y en determinadas ocasiones ejerce influencias determinantes de las soluciones a adoptar en obras con las que debe coordinarse (viales y urbanizaciones en las que el saneamiento condiciona en muchas ocasiones la rasante de los viales y con ello los movimientos de tierra).

El efecto de la pendiente sobre la velocidad del fluido en régimen uniforme puede analizarse a través de la ecuación de Manning expuesta en la ecuación 2 (White, 2003).

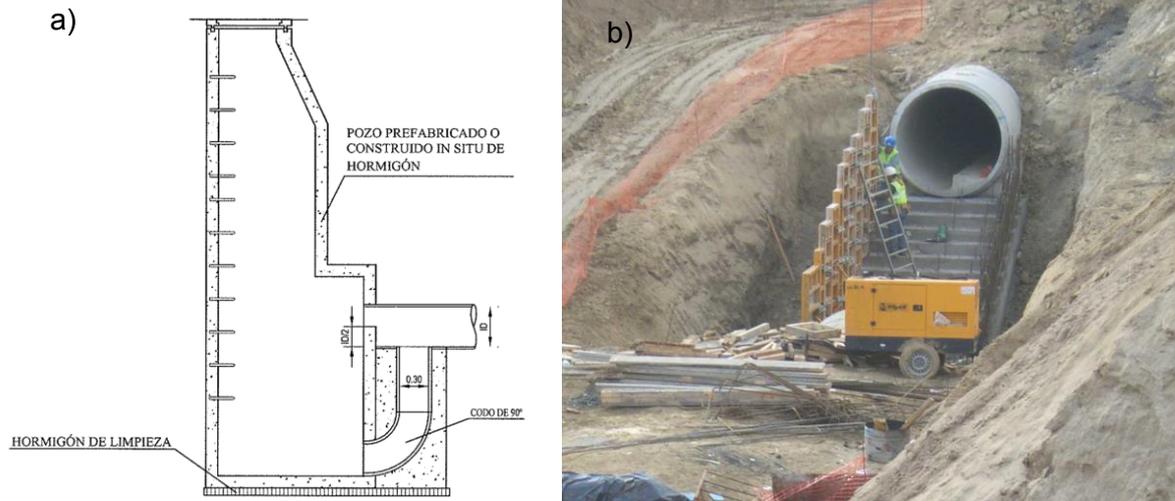
$$u = n^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (2)$$

Donde n representa el coeficiente de Manning, R el radio hidráulico e I la pendiente longitudinal. Los dos primeros dependen del material y la geometría de la sección, respectivamente, mientras que la pendiente depende del diseño longitudinal de la red y de manera específica de las cotas.

La existencia de una velocidad mínima queda garantizada mediante una pendiente longitudinal mínima en la mayoría de las ocasiones. Por el contrario, el control de la velocidad máxima requiere en ocasiones de la ejecución de obras sustitutorias encaminadas a la rotura de la carga como pozos, resaltos o cambios de sección, entre otros.

La figura 1 incluye algunos detalles de algunas obras encaminadas a romper la carga de las conducciones en régimen libre de cara a garantizar el correcto funcionamiento hidráulico de los sistemas.

Figura 1: (a) Detalle constructivo pozo de resalto (Canal de Isabel II, 2006); (b) ejecución de rápido para la ruptura de la carga.



Menos frecuentes, en especial en los sistemas de saneamiento, son otras soluciones vinculadas a la interrupción del flujo uniforme en las conducciones tales como compuertas, o aliviaderos que permitirían la ruptura de la carga a consecuencia de la aparición de fenómenos de resalto hidráulico.

En cualquiera de los casos, la existencia de límites superiores a la velocidad en las conducciones en régimen libre requiere de la sustracción de energía del fluido en determinados puntos de las redes. Tal sustracción se produce sin que exista aprovechamiento de la energía eliminada al fluido desaprovechando de este modo el excedente de energía.

De esta forma, el objetivo principal de la presente comunicación consiste en analizar la energía disponible en determinadas situaciones de conducciones en régimen libre. Adicionalmente se estudiará también la cantidad de energía potencialmente aprovechable y se discutirán las principales alternativas de aprovechamiento del sobrante de energía.

2. Metodología

El análisis de las alternativas de aprovechamiento energético en las conducciones se centra en dos situaciones parte de la necesidad de controlar la velocidad de circulación del fluido en determinadas puntos de la red. Se van a analizar por tanto los parámetros de diseño hidráulico bajo los que se dispondría de un exceso de energía en el fluido. En un segundo paso se analizarán algunas de las posibles soluciones para disipar dicha energía y su potencial aprovechamiento.

El planteamiento teórico del primero de los pasos anteriores requiere definir el régimen del fluido, necesidad para que en el presente trabajo se aceptará la existencia de un régimen uniforme bajo cuya influencia las ecuaciones (1) y (2) permiten caracterizar tanto el nivel energético como la velocidad del flujo y, consecuencia directa de la segunda, el caudal puede determinarse en los términos establecidos en la ecuación 3 (Losada, 2000).

$$Q = w \cdot u = w \cdot n^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (3)$$

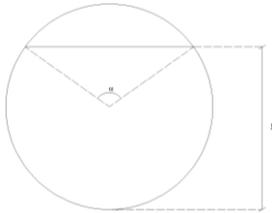
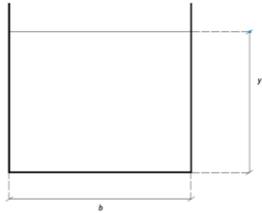
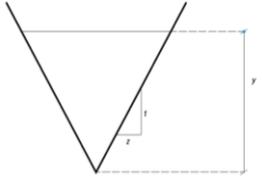
De esta forma, Se supone una sección constante de la conducción entre dos puntos de la misma entre los que puede aceptarse la existencia de régimen uniforme, aceptando igualmente que no existe variación de caudal ($\Delta Q = 0$) ni de calado ($\Delta y = 0$) entre ellos. Bajo estas circunstancias cualquier variación energética en el fluido ha de ser necesariamente producida por una variación en la cota de la rasante ($\Delta H = \Delta z$) a la vista de la ecuación 1. Con ello, dada una velocidad máxima (u_{max}), debe existir un valor máximo de pendiente longitudinal (I), y por tanto de variación de cota (Δz), tal que dicha velocidad no sea superada. En consecuencia cualquier variación de cota mayor que la que conduce a la velocidad máxima produce un excedente energético en el fluido.

Dicho valor máximo de variación de cota puede determinarse a partir de las ecuaciones de la energía y de Manning en los términos siguientes, quedando el valor máximo expuesto en la ecuación 4.

$$u_{max} \leq n^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} = n^{-1} \cdot R^{2/3} \cdot (\Delta z/L)^{1/2} \rightarrow \Delta H = \Delta z \leq (u_{max} \cdot n)^2 \cdot R^{-4/3} \cdot L \quad (4)$$

La solución final depende por tanto de la geometría de la conducción a través del radio hidráulico (R) y del material de la misma mediante el coeficiente de Manning (n). Por ello, la ecuación 4 puede particularizarse las secciones que con más frecuencia se emplean en las conducciones en régimen libre: circular (ecuación 5), rectangular (ecuación 6) y triangular (ecuación 7), todas ellas incluidas en la tabla 1.

Tabla 1. Secciones más frecuentemente empleadas en conducciones en régimen libre y variación de cota máxima permitida (Δz) para una velocidad máxima fijada (u_{max})

Δz	Geometría
$\Delta H = \Delta z \leq (u_{max} \cdot n)^2 \cdot [D \cdot (\alpha - \sin \alpha) / 4 \cdot \alpha]^{-4/3} \cdot L \quad (5)$	
$\Delta H = \Delta z \leq (u_{max} \cdot n)^2 \cdot [b \cdot y / (b + 2 \cdot y)]^{-4/3} \cdot L \quad (6)$	
$\Delta H = \Delta z \leq (u_{max} \cdot n)^2 \cdot [z \cdot y / 2(1 + z^2)^{1/2}]^{-4/3} \cdot L \quad (7)$	

Una vez determinado el exceso de energía consecuencia de una variación de la cota que conduce a un exceso de energía puede conocerse su capacidad para ser aprovechada. Si se acepta que el exceso de cota es regulado mediante algunas de las soluciones actuales (pozos de registro, de resalto, rápidos...) la alternativa de su aprovechamiento mediante turbinado permite un análisis de la capacidad para generar energía y de la potencia instalada.

La potencia instalada en estas circunstancias vendría determinada por la ecuación 8 (Mataix, 1977).

$$P = \gamma \cdot Q \cdot \eta \cdot \Delta H_N \quad (8)$$

Donde γ representa el peso específico del fluido, Q , el caudal, η el rendimiento y ΔH_N la altura neta aprovechable, que procede de restar a la altura bruta ΔH_N las pérdidas de carga longitudinales (hf_L) y las puntuales (hf_P) tal y como queda reflejado en la ecuación 9.

$$\Delta H_N = \Delta H_N - hf = \Delta H_N - (hf_L + hf_P) \quad (9)$$

Las pérdidas de carga pueden aproximarse con cierta precisión mediante expresiones empíricas como la de Hazen-Williams (ecuación 10), mientras que las pérdidas de carga de los elementos puntuales (generalmente rejillas, estrechamientos, codos y válvulas) pueden bien suponerse como una fracción de las pérdidas longitudinales o bien calcularse mediante las ecuaciones, 11, 12, 13 y 14, respectivamente (Losada, 2000, Mataix, 1977).

$$hf_L = 10,7 \cdot c^{-1,85} \cdot Q^{1,85} \cdot D^{-4,87} \quad (10)$$

$$hf_r = [(e/s)^{4/3} \cdot k \cdot u^2 \cdot \sin\alpha / 2 \cdot g] + [u^2 \cdot \sin\beta / 2 \cdot g] \quad (11)$$

$$hf_e = k_e u^2 / 2 \cdot g \quad (12)$$

$$hf_c = k_c u^2 / 2 \cdot g \quad (13)$$

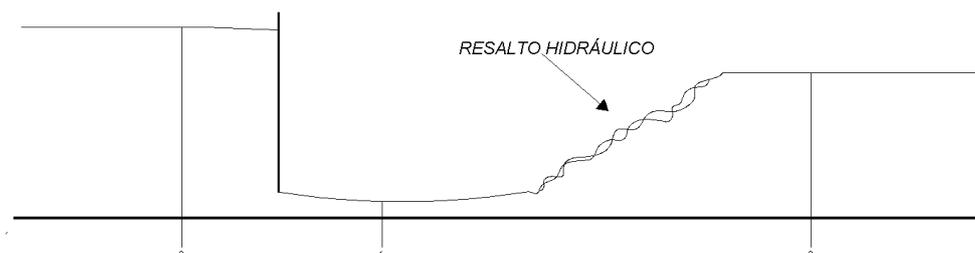
$$hf_v = k_v u^2 / 2 \cdot g \quad (14)$$

Donde e representa el espesor, s la separación y α y β los ángulos de las barras de las rejillas y k_e , k_c y k_v los coeficientes referidos a los estrechamientos, codos y válvulas.

Pero las soluciones basadas en la interposición de elementos de rotura de la carga y disipación de energía también pueden plantearse sin ejecutar obras que permitan salvar diferencias de cota mediante saltos o similares. Existen formaciones hidráulicas que permiten por sí solas disipar la energía. Entre ellas destaca el resalto hidráulico en el que se produce la disipación de energía en forma de calor.

Los resaltos hidráulicos se producen entre dos regiones entre las que el flujo se sitúa en las regiones supercrítica y subcrítica. Se puede producir el resalto hidráulico mediante diferentes técnicas, en la presente comunicación se estudian las producidas por la interposición de barreras al flujo uniforme y, en concreto, la producida por la interposición de compuertas en el flujo. La figura 2 muestra el esquema del resalto hidráulico producido en una conducción por la interposición de una compuerta.

Figura 2: Esquema resalto hidráulico tras una compuerta.



Para el estudio del resalto se aceptará la existencia de régimen uniforme en la sección previa a la compuerta, gradualmente variado en el tramo aguas abajo de la compuerta y previo al resalto y de nuevo uniforme en un punto aguas abajo del resalto y lo suficientemente alejado de éste.

El estudio de la energía disipada en el resalto hidráulico se realiza a través de la ecuación global de Euler y la igualdad de impulsiones aguas arriba y abajo del resalto. De esta forma, para una sección rectangular, la expresión concreta que relaciona los calados conjugados en las secciones 1 y 2 es la que se refleja en la ecuación 15.

$$y_j = y_i \cdot [-1 + (1 + 8 \cdot Q^2 / g \cdot b \cdot y_i^3)^{1/2}] / 2 \quad (15)$$

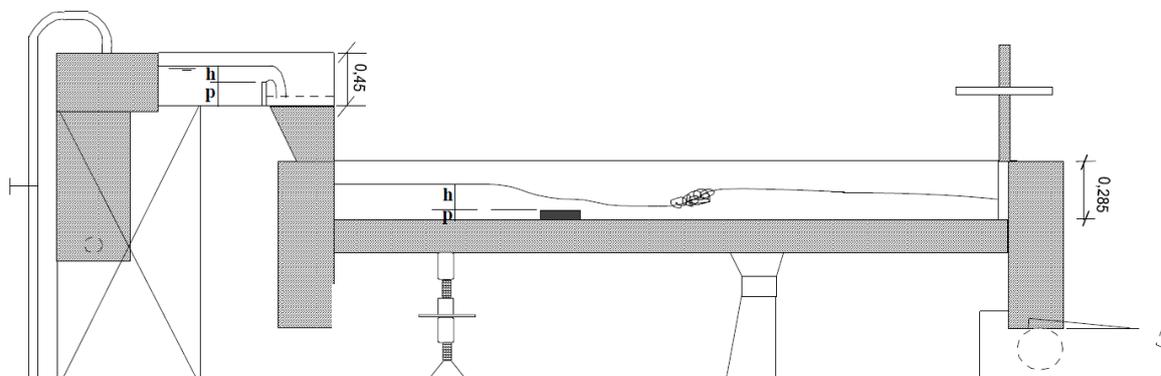
Conocidos los calados puede despejarse la energía disipada como diferencia entre los niveles energéticos de las secciones aguas arriba y abajo del resalto (ecuación 16).

$$hf = y_1 + (Q^2 / w_1^2 2g) - y_2 - (Q^2 / w_2^2 2g) \quad (16)$$

Estas pérdidas de carga tienen una traducción en términos de potencia gracias a través del caudal que las producen.

El análisis del posible aprovechamiento de energía se ha realizado sobre el canal de ensayos del laboratorio de hidráulica de la Escuela Técnica Superior de ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid. Se trata de una infraestructura de una longitud superior a los 3 metros y de dimensiones interiores 0.2x0.285 m, se acepta que el canal tiene un coeficiente de Manning igual a 0.011. La figura 3 muestra un esquema de la instalación.

Figura 3. Esquema del canal de ensayos

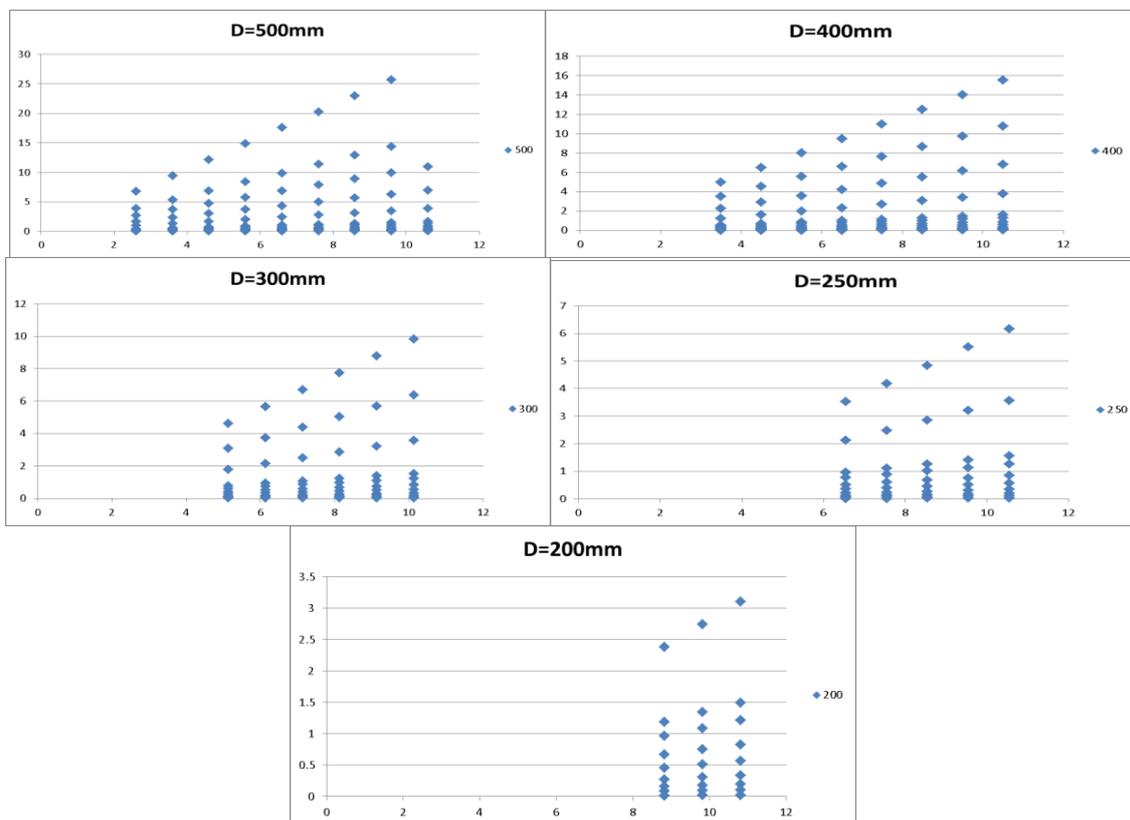


3. Resultados

Comenzando por el estudio de la primera de las cuestiones planteadas en el apartado metodológico, se han calculado los valores máximos de la pendiente de la conducción que conducirían a la velocidad máxima permitida. Fijado un valor máximo de la velocidad permitida de 3 m/s se han calculado las potencias que podrían turbinarse para diferentes configuraciones de geometría de la tubería (circular, rectangular y triangular), tamaños de las mismas y materiales.

En la figura 4 se incluyen los valores de potencia turbinable (eje de ordenadas) en función del desnivel (eje de abscisas) para diferentes valores de diámetro en conducciones circulares de hormigón.

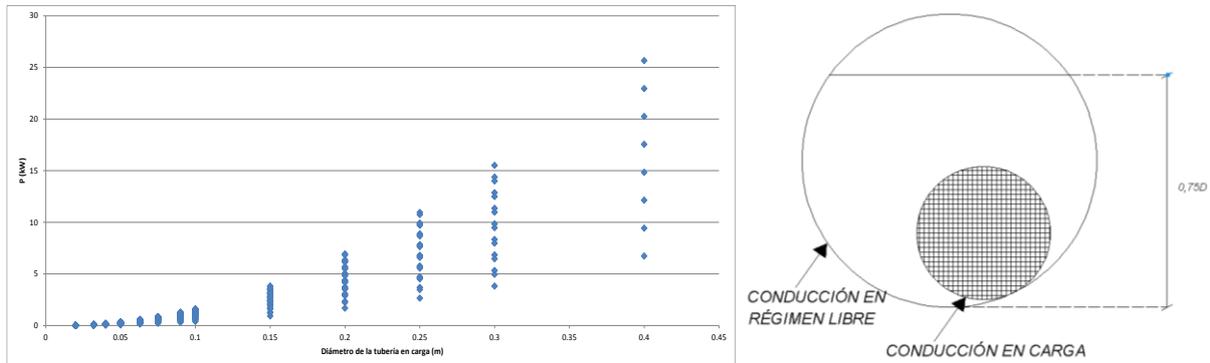
Figura 4. Potencia turbinable en función de cota a salvar para diferentes diámetros en conducciones circulares de hormigón.



Los mayores valores de potencia a turbinar se obtienen para el mayor desnivel. En los gráficos de la figura 4 la primera fila vertical de puntos aparece para el valor mínimo de diferencia de cota que garantiza la superación de la velocidad máxima permitida. La observación de los gráficos permite deducir la mayor facilidad para aprovechar el excedente de energía en conducciones mayores en las que el desnivel topográfico requerido es menor y en las que por tanto con más probabilidad se podría turbinar el exceso de energía. Además, cada punto representa la potencia a turbinar para diferentes valores de la conducción en carga que habría de colocarse para derivar el caudal a turbinar.

El esquema de aprovechamiento consiste en la ejecución de una tubería en carga interior a la conducción, y al pozo necesario para salvar el desnivel sin superar la velocidad, en régimen libre y sobre la que se dispondría la turbina. En la figura 5 se incluye un croquis de la propuesta de aprovechamiento junto con un gráfico de los diferentes valores de potencia obtenidos para diferentes diámetros de la conducción en carga en función del diámetro de la conducción en régimen libre (las restricciones para el diámetro de la conducción en carga son tales que no deben superar el 75% del diámetro de la conducción en régimen libre).

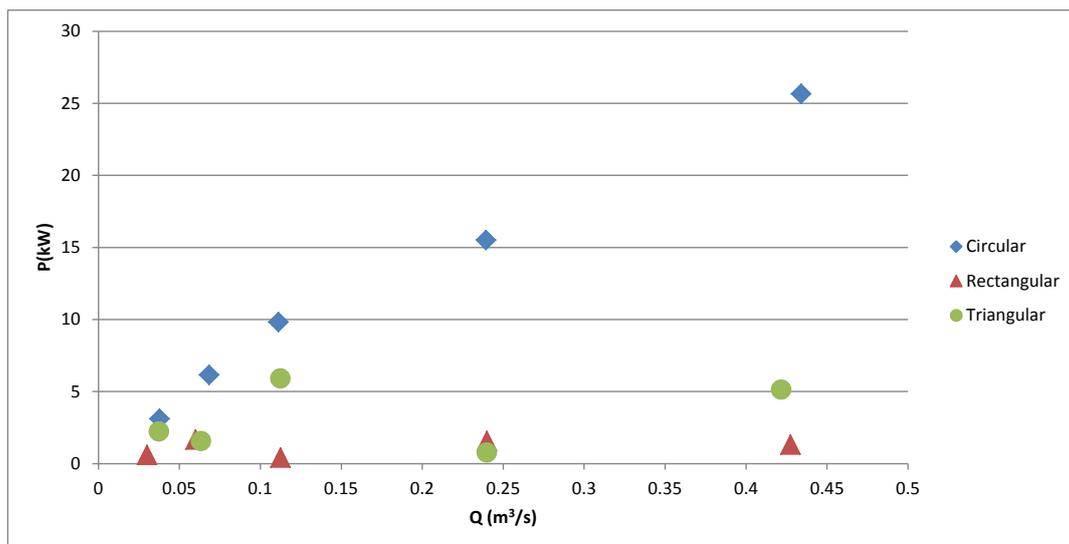
Figura 5. Potencia turbinable en función del diámetro de la conducción en carga y croquis de la instalación.



Los valores máximos de potencia para conducciones de 500 mm de diámetro superan los 25 kW. La capacidad de transformación de esta potencia en energía depende de las características de la red puesto que en conducciones de saneamiento para aguas pluviales el caudal que circula depende de la pluviometría y no es constante. Sin embargo, en otro tipo de redes en las que el caudal se mantiene constante, ésta sería la potencia que podría transformarse en energía en continuo.

Los resultados para el resto de geometrías analizadas muestran resultados similares en cuanto a las características de la relación potencia-desnivel y potencia-diámetro de la conducción en carga. Si se comparan los valores de potencia potencialmente turbinable entre diferentes geometrías y para un mismo caudal, puede comprobarse cómo la sección circular es la más eficiente desde el punto de vista del aprovechamiento del excedente de energía (figura 6).

Figura 6. Potencia turbinable en función del caudal conducido para diferentes tipos de geometría de la conducción.

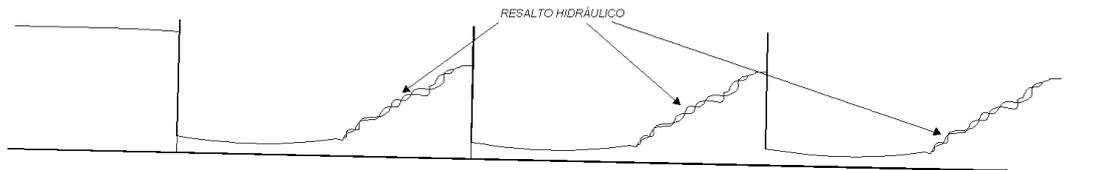


Pero la solución anterior que consiste en la sustitución de un tramo recto por un pozo para salvar el desnivel y turbinar el excedente de energía no es la única considerada. En el presente trabajo se ha analizado también la posibilidad de interponer elementos que rompan

la carga y permitan aprovechar la energía sin necesidad de ejecutar pozos que sustituyan tramos rectos de conducción.

La idea pasa por ubicar compuertas en serie en un tramo recto de conducción de manera que se garantice que no se supera la velocidad máxima permitida. Ello permite además aflorar un excedente de energía que se disipa en cada resalto producido aguas debajo de cada compuerta. La figura 7 muestra un esquema del planteamiento.

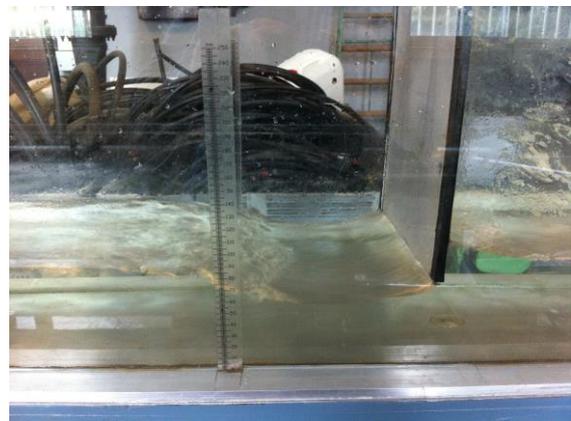
Figura 7. Esquema resaltos en serie.



Para el estudio de las alternativas de utilización de la energía disipada en el resalto se han analizado en laboratorio diferentes situaciones de diseño de las mismas. Se han fijado los valores del caudal que se hace llevar al canal y sobre éste se ha medido el calado previo a la compuerta y los calados aguas abajo de la misma y tras el resalto.

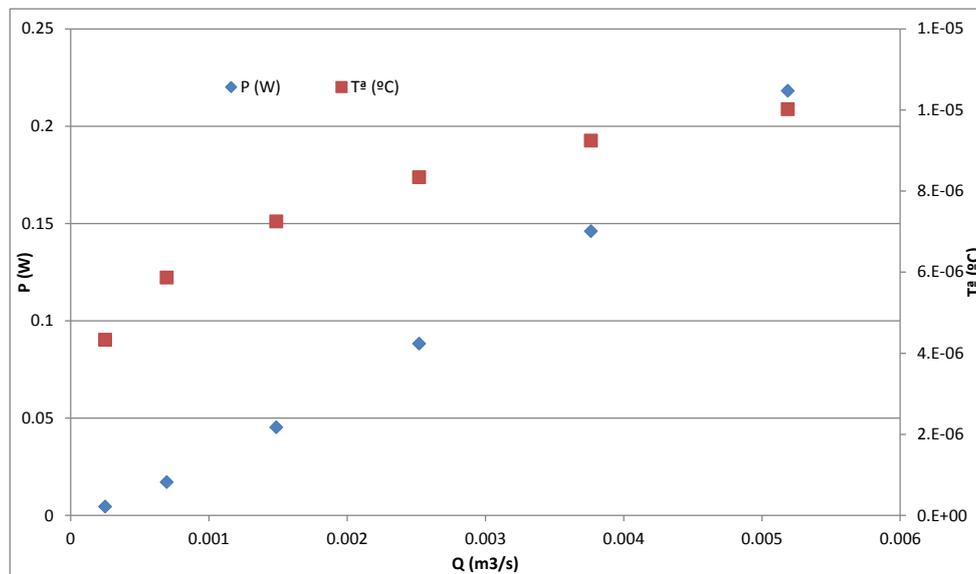
La figura 8 muestra una fotografía del canal durante las mediciones realizadas.

Figura 8. Canal de ensayos en las simulaciones realizadas durante la toma de datos.



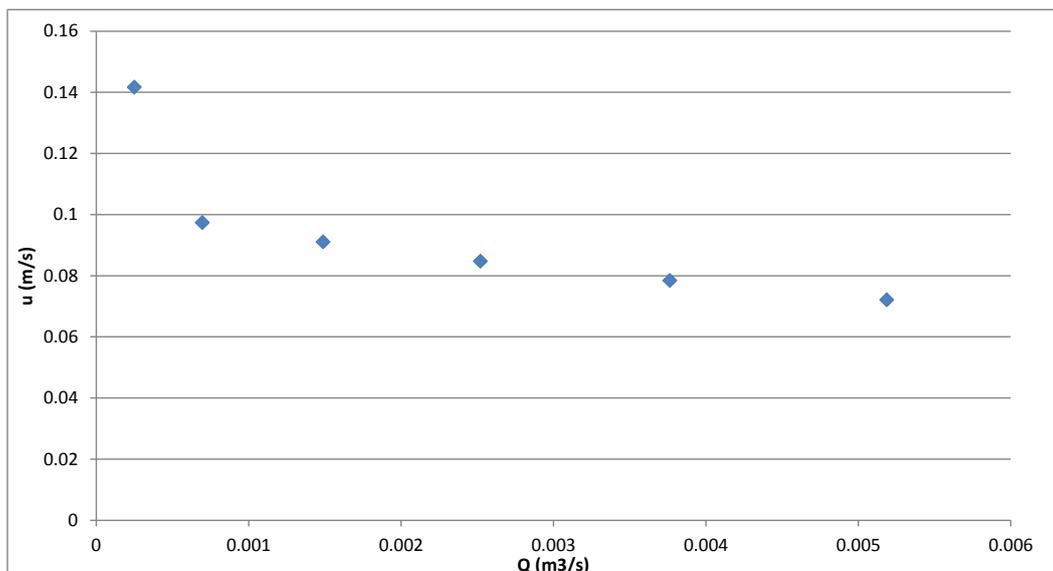
Los resultados de potencia disipada durante el resalto (figura 9) muestran que la potencia disipada alcanza cotas elevadas aunque ello se traduce en muy poca variación de temperatura en el agua debido al elevado calor específico del agua. Estos resultados son acordes con los obtenidos por Komori et al (1982) o Rahbar y Hamzeh (2008), entre otros.

Figura 9. Resultados del cálculo de la potencia y la variación de temperatura en el resalto.



Sí existe una segunda alternativa de aprovechamiento de la energía contenida en el fluido gracias a la componente cinética de la energía en el punto aguas abajo de la compuerta. La figura 10 muestra los valores de velocidad alcanzada en el fluido en este punto.

Figura 10. Resultados de la velocidad del fluido aguas abajo de la compuerta.



Los resultados de la tabla 2 sí apuntan a la existencia de energía cinética susceptible de ser aprovechada en este punto del fluido ya fuese con algún tipo de máquina hidráulica que aprovechara la energía cinética o bien mediante generadores lineales de energía eléctrica.

4. Conclusiones

Los sistemas de conducción del agua en régimen libre requieren de una gestión energética del fluido que implica la descarga de energía en determinados puntos de la instalación.

Dicha energía descargada puede ser reutilizada en función de las posibilidades de diseño hidráulico de la red y en especial de la forma en la que dicha energía puede ser transformada.

Los estudios realizados muestran la validez de la propuesta de sustitución de elementos de descarga por tramos en los que la pendiente de la conducción genera desviaciones respecto de los óptimos de diseño hidráulico. En estos elementos de descarga resultaría viable el turbinado del fluido de cara a transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

El estudio de otros elementos singulares tales como los resaltos muestra resultados dispares. Si el aprovechamiento térmico de la energía disipada en el resalto resulta escasamente viable, la energía cinética que dispone el fluido en el régimen subcrítico sí presenta a priori expectativas de potencial aprovechamiento.

5. Referencias

- Komori, S., Ogino, F., Mizushima, T. (1982). Turbulence structure and transport mechanism at the free surface in an open channel flow. *International Journal of heat mass transfer*, 15: 513-521.
- Losada, A. (2000). *El riego, fundamentos hidráulicos*. Madrid, Ediciones Mundiprensa.
- Mataix, C. (1977): *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid, Ediciones del Castillo.
- Rahbar, N., Hamzeh, M. (2008). Study of hydraulic jump on heat transfer at various conditions in open channels. 5th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics. Acapulco, 25-27 2008.
- White, F.M. (2003). *Mecánica de Fluidos*. Madrid, Mc-GrawHill