

## Explotación de centrales hidroeléctricas sin volumen de almacenamiento por optimización del caudal de turbinado

Juan Manuel Blanco-Barrero \*

Departamento de Energía Eléctrica. E.T.S.I.I., Universidad de La Rioja. San José de Calasanz 31, (Edif. Departam., Dp. 303). Logroño (La Rioja) España  
\* Autor de Correspondencia: juan-manuel.blanco@unirioja.es

Recibido: 13 de septiembre de 2021

Aceptado: 24 de septiembre de 2021

**Resumen:** Las Centrales Hidroeléctricas de tipo Fluyente utilizan los caudales circulantes por el río en cada momento y disponen de las obras e infraestructuras necesarias para su conducción y aprovechamiento, sin tener en su concepción inicial de sistemas de almacenamiento. Este tipo de centrales están diseñadas y automatizadas para funcionar entre ciertos límites de caudal, trabajando con “salto constante”, utilizando los caudales disponibles en cada momento. Los límites de funcionamiento los fijan el “caudal de equipamiento”, para el cual está diseñada la central y el “caudal de mínimo técnico”, que se corresponde con el mínimo valor de caudal con el que puede trabajar la central y que depende de cada tipo de turbina. Mediante los algoritmos de optimización presentados se aprovechan las épocas de bajo nivel de caudal (estiaje) para utilizar las conducciones de la central como elemento de almacenamiento de los caudales inferiores al mínimo técnico y someter la central a ciclos secuenciales de vaciado/llenado de las conducciones permitiendo el aprovechamiento energético, que denominaremos funcionamiento por “caudal óptimo”. Se pretende en este artículo el determinar cómo se adapta cada tipo de turbina a los nuevos algoritmos de optimización planteados, determinando los incrementos de producción obtenidos para cada tipo de turbina y su posibilidad de su utilización mediante la aplicación de los algoritmos de “caudal óptimo”.

**Palabras clave:** Energías Renovables, Centrales hidroeléctricas, Optimización, Regulación.

## Operation of hydroelectric plants without storage volume due to optimization of the turbine flow

**Abstract:** Hydroelectric power plants in diversion scheme systems utilize the water flowing through the river, since they present the necessary facilities and infrastructures to channel and harness the water, without having in their initial conception any storage systems. This type of power stations are designed and automated to operate between certain limits of water head, working with “constant head”, using the heads available at any moment. The operating limits are determined by the “nominal flow” for which the power plant has been designed and the “minimal technical flow” which corresponds to the minimum value of the flow with which the plant can work, which depends on each type of turbine. By means of the presented optimization algorithms we can take advantage of those periods of time with low levels of flow (low water levels) to utilize the channels in the power station as storage elements of flow under the technical minimum, making the power plant undergo sequential cycles of emptying/filling of channels, allowing for the energetic exploitation, that will be denoted as “optimal flow”. In this article, we intend to determine how we can adapt each type of turbine to the new optimization algorithms proposed, establishing the increments in production obtained for each type of turbine and the possibility of applying the “optimal flow” algorithms.

**Keywords:** Renewable energies, hydroelectric power plants, optimization, regulation.

### Introducción

Las turbinas suponen el factor limitante de funcionamiento de las centrales hidroeléctricas, ya que sus límites de utilización están determinados por el caudal máximo de funcionamiento (caudal de equipamiento) y un caudal mínimo que tiene como limitación de un valor mínimo de rendimiento de la turbina del 70%. Los caudales que fijan el límite mínimo varían entre un 10%, 25% y un 40% del caudal de equipamiento de la central, dependiendo del tipo de turbina empleada.

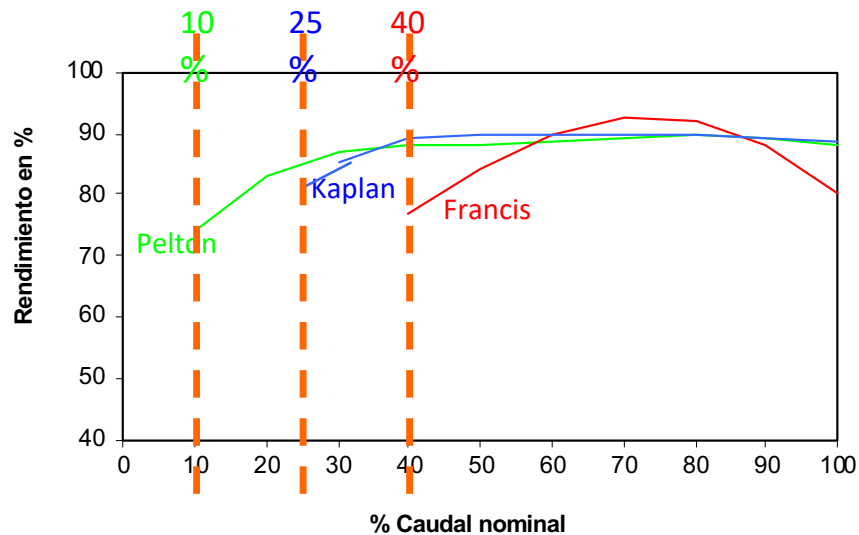


Figura 1. Característica de rendimiento de diferentes turbinas aplicado el caudal de mínimo técnico.

Para el rango de caudales de utilización de las turbinas, la energía a obtener en el aprovechamiento será:

$$E = \int_T Pa \cdot dt \tag{1}$$

Donde la potencia del aprovechamiento ( $Pa$ ) se puede obtenerse en función de los parámetros de salto ( $Hn$ ) y caudal ( $Q$ ).

$$Pa = Q \cdot \rho \cdot g \cdot Hn \cdot \eta t \tag{2}$$

Expresión en la que la altura se considera constante en este tipo de aprovechamiento. Por otra parte, el rendimiento medio en esta fase de cálculo puede estimarse en torno al 80 %, con lo cual, la expresión anterior resulta:

$$E = \rho \cdot g \cdot Hn \cdot \eta t \int_T Q \cdot dt \tag{3}$$

$$E = \rho \cdot g \cdot Hn \cdot \eta t \cdot V \tag{4}$$

Función que nos viene a determinar, que, para obtener la máxima energía en el aprovechamiento, hay que turbinar el mayor volumen de agua circulante por el río.

En el diseño de las centrales se elige un valor de caudal que posibilite un aprovechamiento máximo de los caudales para conseguir un aprovechamiento máximo de la energía. Este caudal se elige realizando un estudio hidrológico. Por otra parte, si al funcionamiento normal de las Centrales Hidroeléctricas Fluyentes (*salto constante*), se incorporan los algoritmos presentados, se permite aumentar el volumen turbinado en el aprovechamiento y por lo tanto la energía generada por el mismo.

### Materiales y Métodos

Comenzamos por analizar el comportamiento de la central según su modo convencional de funcionamiento a *salto constante*. Se parte del conocimiento de los datos de caudales circulantes por el río.

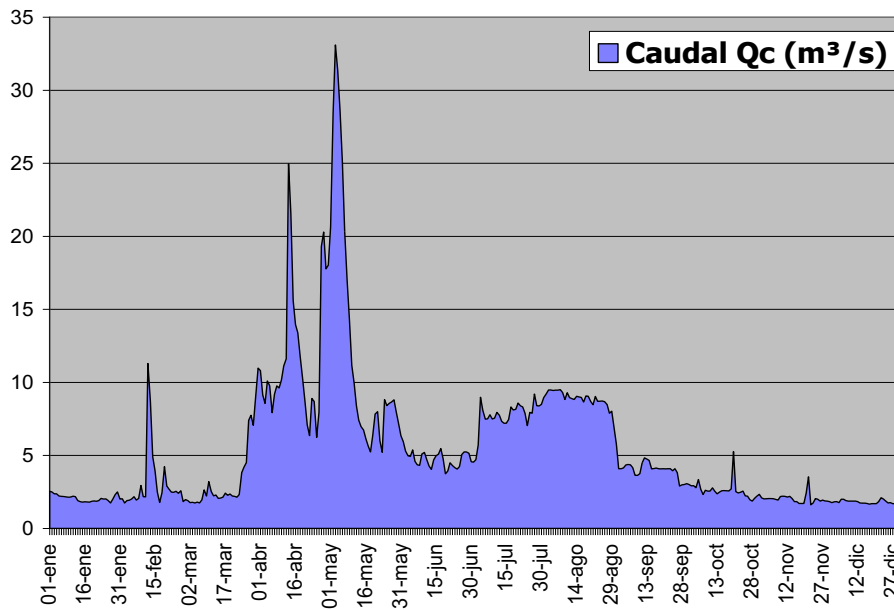


Figura 2. Caudales circulantes en el río Iregua para un año medio (año 2017). Datos fuente CHE.

A partir de la gráfica de caudales circulantes y mediante su ordenación se obtiene la curva de caudales clasificados.

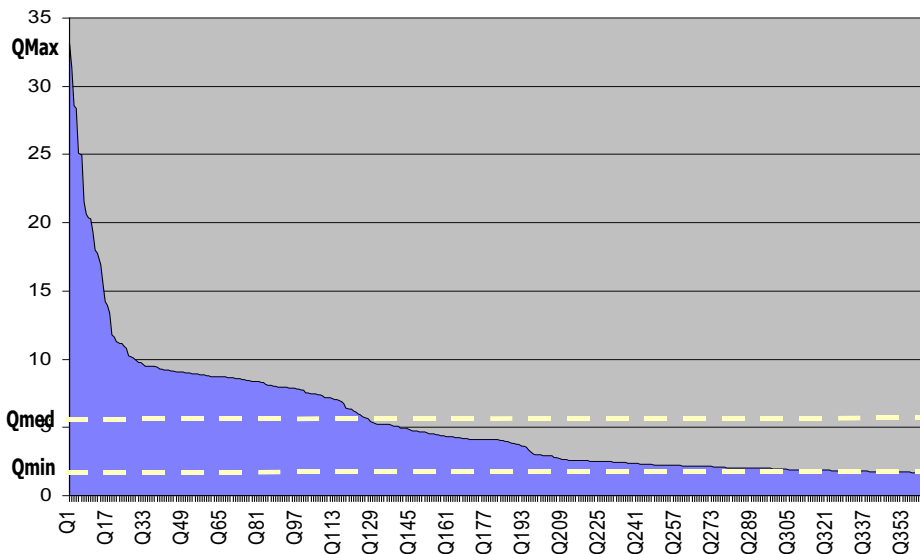


Figura 3. Curva de caudales clasificados. Año medio 2017.

La máxima energía a obtener de la central se conseguiría turbinando todo ese volumen representado por la “Curva de Caudales Clasificados”, pero todo no va a poder ser aprovechable, ya que existen caudales tanto por exceso como por defecto del que se elija como “Caudal de Equipamiento” que no se van a poder turbinar debido a diferentes causas:

1. Caudales ecológicos: Caudal mínimo a dejar siempre circulando por el río para permitir que en el tramo afectado por el aprovechamiento pueda seguir manteniéndose el hábitat del río;
2. Caudales superiores al de equipamiento: Como su nombre indica son caudales que superan el de equipamiento y por lo tanto no serán turbinables en la central, debiéndose dejar circular por el río;
3. Caudal de mínimo técnico ( $Q_{mt}$ ): Caudal mínimo de funcionamiento de la turbina, a partir del cual esta deja de funcionar con rendimientos aceptables.



Tabla1. Rango de saltos netos recomendado para cada tipo de turbina. Fuente [US Bureau, 1976] y elaboración propia.

Tipo de Turbina	H mínimo (%)
Pelton	90
Francis	65
Kaplan	65

b) Volúmenes perdidos por arranque-parada de máquina.

Al arrancar la turbina se consume un volumen de agua almacenado en las conducciones para llevar la turbina a su velocidad de régimen y proceder a su interconexión. Además, una vez interconectada, y hasta alcanzar el *caudal óptimo* de funcionamiento, se consume parte de los volúmenes almacenados con un rendimiento inferior al obtenido por *caudal óptimo* en el equipamiento electromecánico.

Los valores de tiempo, apertura y rampas de aceleración fijados a partir de los datos obtenidos se fijan en:

Tabla 2. Tiempo de apertura y rampas de aceleración. Elaboración propia.

Turbina	Apertura distribuidor en conexión (%)	Tiempo alcanzar la conexión (s)	Rampa de aceleración una vez acoplado hasta 50%
Pelton	2,5	60	30 s
Francis Espiral	5-10	90	60 s
Francis Cámara Abierta	20-30	90	35 s
Kaplan	15	120	90 s

Cada vez que se procede al paro de la central existe un periodo de tiempo para el cierre de los elementos de regulación. El volumen evacuado por la turbina hasta el cierre total de la misma se considera perdido, ya que la máquina ya no está conectada y se procurará que sea el mínimo necesario sin producir problemas de golpe de ariete.

c) Pérdida de rendimiento por reducción de salto.

Las curvas de rendimiento anteriores representan su variación a medida que varía el caudal, para un valor constante del salto neto y de la velocidad de giro de la turbina. Además, como puede verse en la Figura siguiente, el rendimiento también depende en mayor o menor medida del salto puesto a disposición de la turbina, en función del tipo de turbina, siendo menor este rendimiento, cuanto mayor es la pérdida de salto.

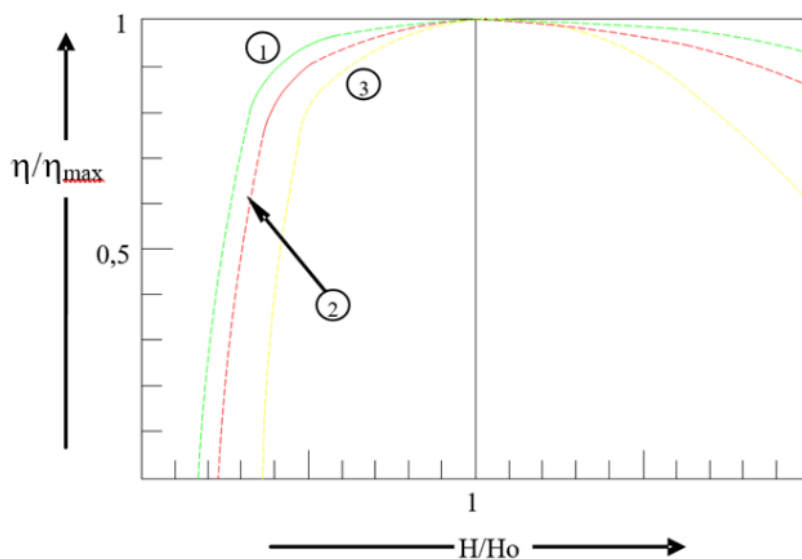


Figura 4. Características de rendimiento según variación de salto. (1) Turbina Hélice; (2) Francis; (3) Pelton; Fuente [Vivier, L.].

## Resultados y Discusión

### Determinación de $Q_{\text{Optimo}}$ .

Para la determinación del  $Q_{\text{Optimo}}$ , se han modelizado las curvas de rendimiento del equipamiento electromecánico de la central, obteniendo para cada tipo de aprovechamiento una curva de rendimiento global, que servirá como base del estudio de los diversos caudales de funcionamiento y de aplicación al modelo de explotación planteado. Posteriormente se aplican las limitaciones de funcionamiento del modelo como tiempos de arranque y conexión a red., pérdida de rendimiento por pérdida de salto y tiempo mínimo de funcionamiento.

Los ensayos se realizan para diferentes tipos de turbinas y aprovechamientos hidroeléctricos, a partir de los datos de caudal obtenidos de la estación de Aforos nº 36 en Islallana, situada en la cuenca del río Iregua (perteneciente a la cuenca del Ebro). De los años hidrológicos disponibles de la estación, se considera una serie de referencia de 40 años 1981-2020, obteniendo como año medio, año de aplicación a los modelos planteados, el año 2017.

#### a) Centrales de salto elevado, con turbinas alimentadas por tubería forzada y cámara espiral

Dentro de este primer modelo, la instalación donde se implementan los algoritmos de regulación por *caudal óptimo* es una central hidroeléctrica, de tipo fluyente, con las siguientes características:

- Canal de hormigón
- Tubería forzada.
- Salto útil de 20 m de altura.
- Caudal de equipamiento ( $Q_n$ ) de 6 m<sup>3</sup>/s.

Aplicando la función de *caudal óptimo* y comparándola con la regulación a altura constante, en la Figura siguiente puede verse, para cada uno de los caudales circulantes que discurren por el río (función azul), los caudales de trabajo para funcionamiento convencional en altura constante (función verde) y los caudales de trabajo en un funcionamiento con los nuevos algoritmos implementados, trabajando con *caudal óptimo* (función roja).

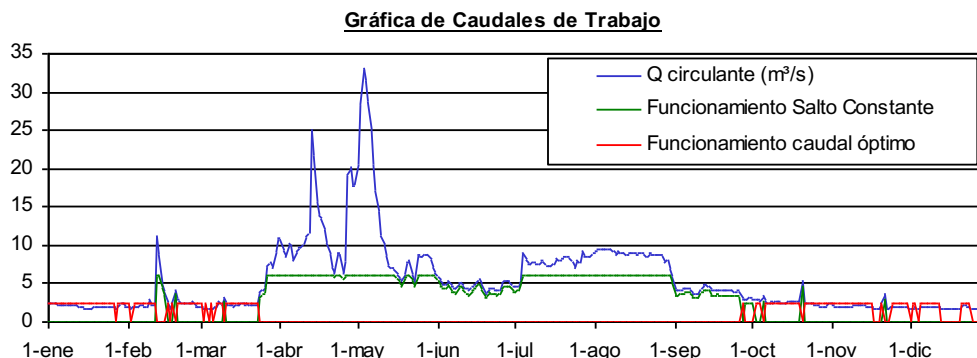


Figura 6. Comparación de caudales de trabajo para funcionamiento a altura constante vs. *Caudal óptimo* año 2017 (año medio) para turbinas Francis de cámara espiral.

El modelo de explotación planteado a *caudal óptimo* permite el trabajo de la central durante los días de no funcionamiento en el modelo tradicional, produciendo un incremento en la producción energética del 19,34 % y elevar la utilización anual un 8,21 %. El volumen turbinado por *caudal óptimo* es de 18,70 hm<sup>3</sup>, un 11% del total turbinado.

Considerando la utilización de la central hidroeléctrica tipo según ambos modos de operación, la central fija su utilización anual en el 50,66 %. El incremento de volumen turbinado es un 20,98 % con el utilizado únicamente por *salto constante*.

Las energías producidas de forma clasificada para el año hidrológico medio considerado (año 2017), obtenidas a partir de la curva de caudales clasificados, se representa en la gráfica siguiente, donde se observan los funcionamientos por *salto constante* y *caudal óptimo*.

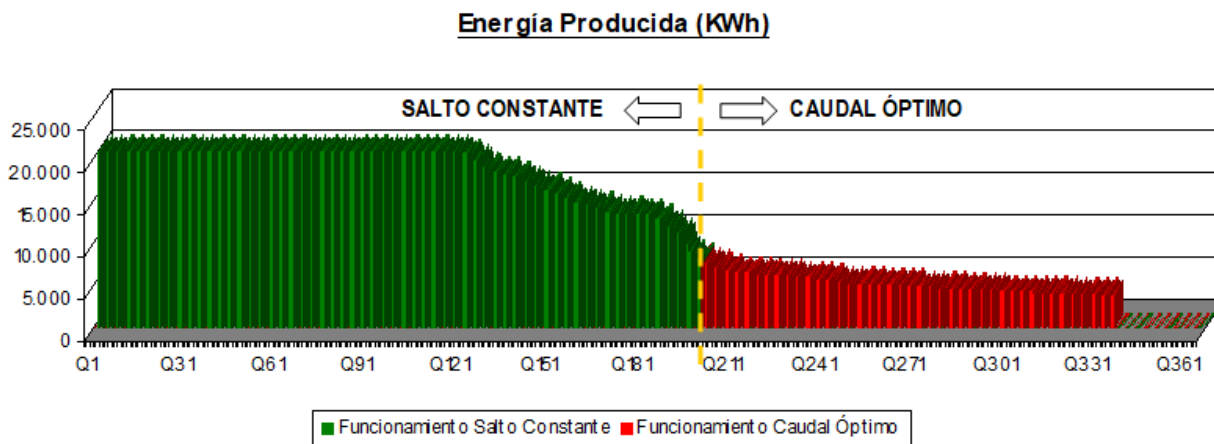


Figura 7. Energía producida de forma clasificada para central equipada con turbina Francis de cámara espiral.

b) Centrales de salto elevado con turbinas Pelton.

Datos de la Central:

- Canal de hormigón
- Tubería forzada.
- Salto útil de 120 m de altura.
- Caudal de equipamiento ( $Q_n$ ) de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Por aplicación de los modelos de explotación por altura constante y caudal óptimo, se representa en la Figura siguiente para cada caudal circulante por el río, los caudales de trabajo correspondientes a cada modelo de explotación.

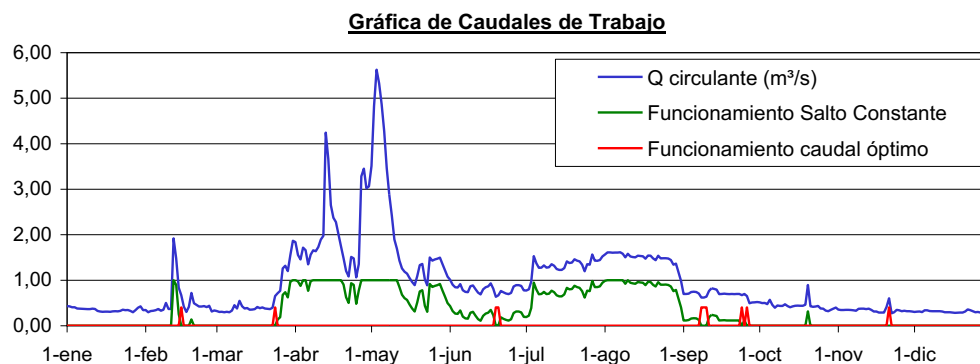


Figura 8. Representación de caudales de trabajo por funcionamiento a *salto constante* año 2017 (año medio). Turbina Pelton.

Considerando la utilización de la central hidroeléctrica según ambos modos de operación, la central trabaja por *caudal óptimo* durante 0,17% de utilización anual. La central prácticamente produce en este modo de funcionamiento a *caudal óptimo* un 0,52 % de la energía obtenida por *salto constante*.

A partir de los resultados puede determinarse que, en los aprovechamientos dispuestos con turbina Pelton, debido al bajo valor del caudal de mínimo técnico (un 10%), la central prácticamente no trabaja en modo *caudal óptimo*, y debido a las bajas producciones conseguidas se desaconseja el trabajar con este tipo de turbinas en el citado modo.

Representando las energías a partir de los caudales clasificados, se obtiene la representación de las energías de forma clasificada, donde se observa la baja producción por el modelo de explotación por *caudal óptimo*.

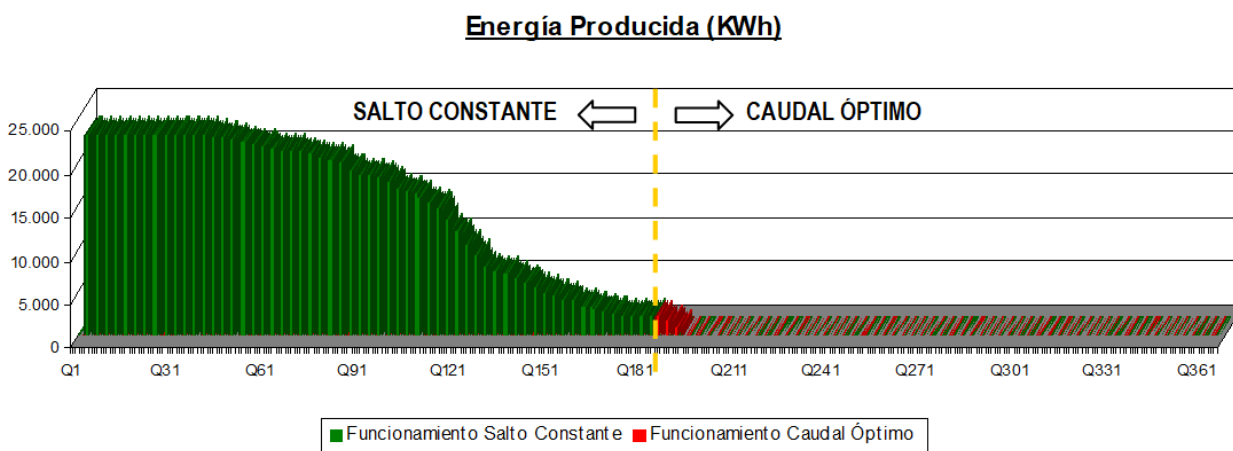


Figura 9. Energía producida de forma clasificada para central equipada con turbina Pelton (año medio).

c) Centrales de salto bajo, con turbinas de cámara abierta. Turbina Francis.

Datos de la Central:

- Canal de hormigón
- Salto útil de 9 m de altura.
- Caudal de equipamiento ( $Q_n$ ) de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A partir de la gráfica de caudales circulantes, se determina para cada modelo de explotación planteado los caudales de trabajo, que pueden verse en la Figura.

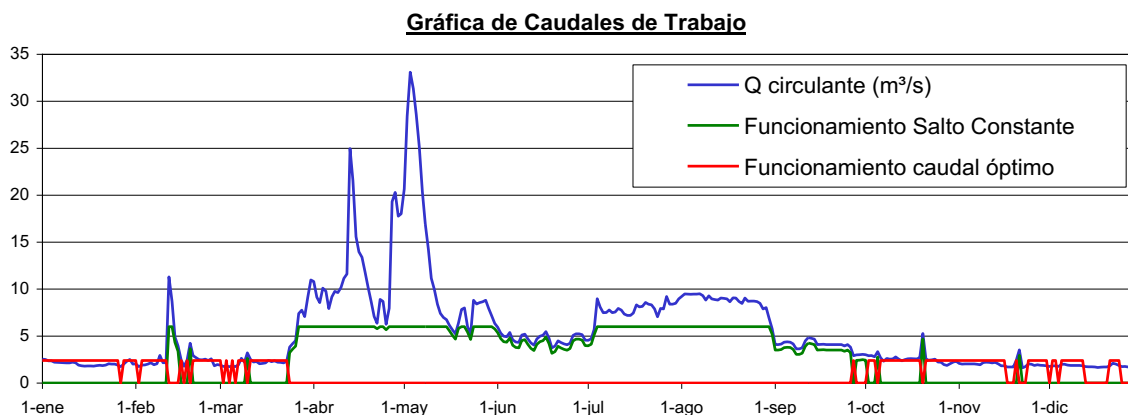


Figura 10. Comparación de caudales de trabajo para funcionamiento a altura constante vs. Caudal óptimo; año 2017.

El modelo de explotación planteado a *caudal óptimo* produce un incremento en la producción energética del 18,54 %. El volumen turbinado son  $18,59 \text{ hm}^3$  ligeramente inferior al caso de turbina alimentada por tubería forzada debido al mayor porcentaje de apertura del distribuidor en el acoplamiento. El incremento de producción energética es ligeramente inferior, debido a que al ser un salto inferior al anterior, tiene mayor influencia la pérdida de rendimiento en los vaciados debido a la pérdida de salto.

Las producciones de forma clasificada se representan en la gráfica siguiente.

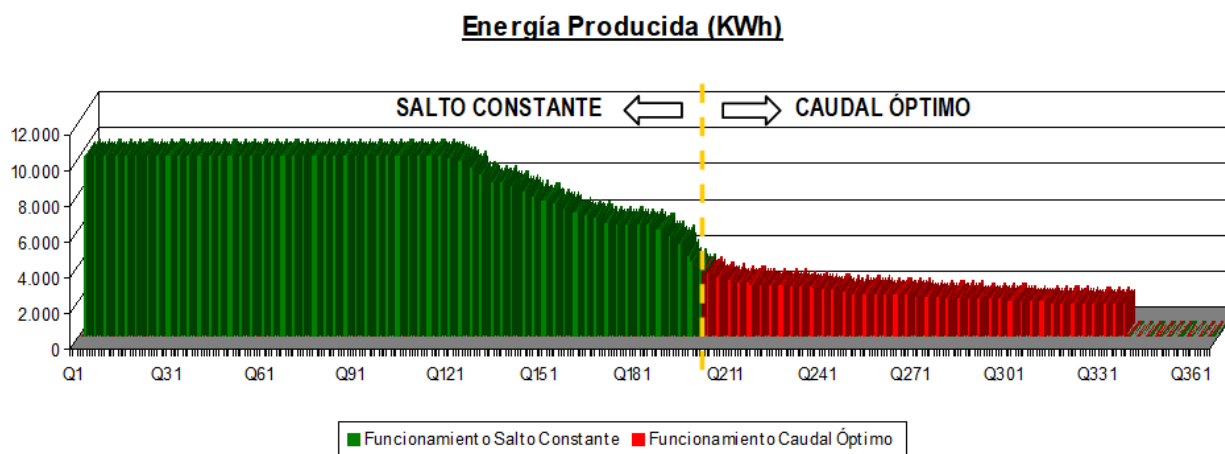


Figura 11. Energía producida de forma clasificada para central equipada con turbina Francis de cámara abierta (año medio).

d) *Utilización de turbinas Kaplan.*

Datos de la Central:

- Canal de hormigón
- Salto útil de 9 m de altura.
- Caudal de equipamiento ( $Q_n$ ) de  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Aplicando la función de *caudal óptimo* y comparándola con la regulación a altura constante, en la Figura siguiente puede verse, para cada uno de los caudales circulantes que discurren por el río (función azul), los caudales de trabajo para funcionamiento convencional en altura constante (función verde) y los caudales de trabajo en un funcionamiento con los nuevos algoritmos implementados, trabajando con *caudal óptimo* (función roja).

**Gráfica de Caudales de Trabajo**

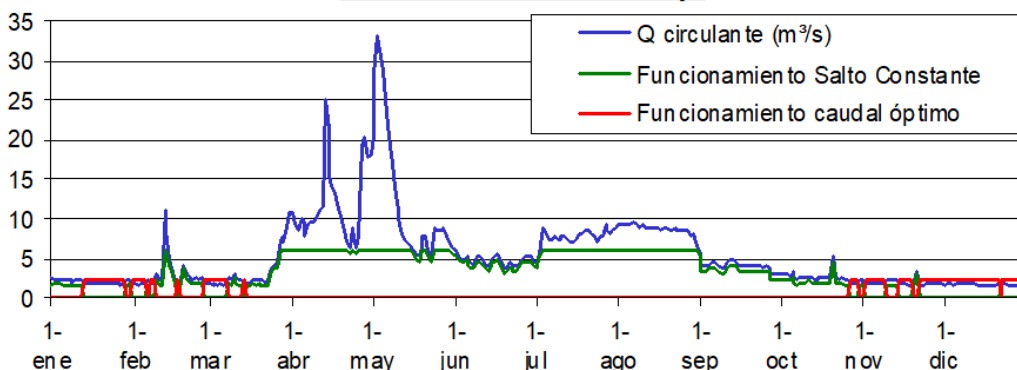


Figura 12. Comparación de caudales de trabajo para funcionamiento a altura constante vs. *Caudal óptimo*; año 2017 (año medio). Turbina Kaplan.

El modelo de explotación planteado a *caudal óptimo* produce un incremento en la producción energética del 9,37%, muy inferior al obtenido caso de que el aprovechamiento estuviese dotado de turbinas Francis. El volumen turbinado por *caudal óptimo* es  $9,60 \text{ hm}^3$ . Esto es debido al caudal de mínimo técnico de la turbina Kaplan que favorece el modelo tradicional.

Considerando la utilización de la central hidroeléctrica según ambos modos de operación, la central trabaja durante los 365 días del año y turbinada un volumen total de  $110,54 \text{ hm}^3$ . Es decir, funciona de manera constante durante todo el año, un 75,34 % a *salto constante* y un 24,66 % a *caudal óptimo*.

A partir de la curva de caudales clasificados podemos obtener la relación de energías producidas en el aprovechamiento de forma clasificada, observando las producciones por *salto constante* (modelo de explotación tradicional) y por *caudal óptimo* (modelo de explotación propuesto).

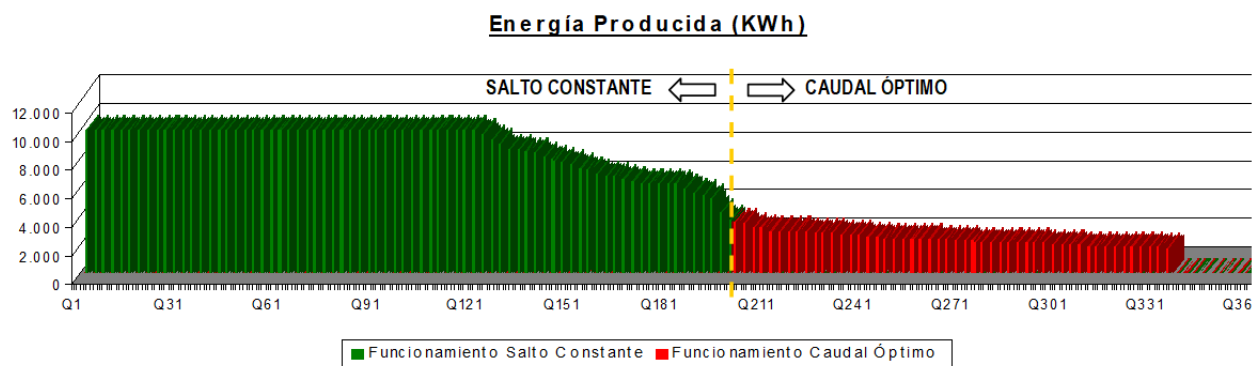


Figura 13. Energía producida de forma clasificada para central equipada con turbina Kaplan (año medio).

## Conclusiones

A partir del modelo de explotación desarrollado por *caudal óptimo* y de su aplicación a los diversos tipos de aprovechamientos se observan diferentes comportamientos de las centrales y de los incrementos de producción dependiendo del tipo de central y de su configuración.

Para el caso de utilización de turbinas Francis de cámara abierta o cámara espiral se observan incrementos elevados en la producción.

La diferencia en cuanto a las producciones obtenidas para turbinas de cámara abierta y para cámara espiral, para los mismos volúmenes de utilización en el modelo de explotación por *caudal óptimo*, es debido a la diferencia de salto en las centrales planteadas. En el caso de centrales con turbinas de cámara abierta el salto establecido es de 9 metros, elevándose hasta los 20 metros en el caso de estar la central dotada con turbinas de cámara espiral. Para un mismo vaciado de conducciones, la central con salto inferior presenta un mayor porcentaje de pérdida de salto que lleva a una mayor pérdida de rendimiento de esta.

Además, en la aplicación del modelo a las turbinas Francis se observa que en las turbinas de cámara abierta los volúmenes perdidos hasta el acoplamiento de las turbinas son mayores que para las turbinas de cámara espiral, con lo que se obtiene un mejor aprovechamiento en las centrales con tubería forzada, que viene a sumarse a la anterior mejora de rendimiento debida al mayor salto.

Las centrales dotadas de turbinas de tipo Pelton, presentan incrementos de producción muy bajos, con una utilización muy baja en la aplicación del modelo de explotación planteado.

Las turbinas Kaplan presentan un incremento de producción energética medios. Este incremento en el porcentaje de la producción energética es debido al caudal de mínimo técnico de este tipo de turbinas, que está establecido en el 25% del caudal nominal, lo que favorece la implantación del modelo desarrollado.

## Bibliografía

- Blanco Barrero, J.C. Sáenz-Díez Muro, E. Jiménez Macías, P. Lara Santillán (2007) "Optimization of the hydrological utilization for hydroelectric power plants of flowing type", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'07), 2007, Seville.
- Sáenz-Díez J.C., Blanco J.M., Jiménez E., Pérez de la Parte, M. (2011) "Generación microeléctrica mediante energía renovable hidráulica en el espacio urbano"
- Mataix, C. (2009) "Turbomáquinas Hidraulicas"
- Wood A.J., Wollenberg B.F., (2013) "Power generation operation and control"