



# **GUÍA PARA ESTIMAR LA DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

**Contrato INE/ENE/ERG-T1886-SN1/11 :**

***“Estudio de factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH)”***

**Banco Interamericano de Desarrollo (BID) - Fundación Julio Ricaldoni, Uruguay**

**Diciembre 2012**

# Introducción

El objetivo de la presente guía es brindar las bases técnicas para estimar la disponibilidad energética de generación hidroeléctrica en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCHs), para que emprendedores privados puedan estimar el retorno de una inversión.

Se presentan dos apartados diferentes:

- uno para embalses construidos para uso prioritario de riego (y subsidiario de generación)
- otro para embalses dedicados primordialmente a la generación hidroeléctrica,

debido a que sobre todo la operación del embalse –y por tanto la elección de la turbina- no son asimilables en ambos casos.

Los estudios realizados para obtener los resultados que se presentan y proponen en esta guía, así como las hipótesis adoptadas, se encuentran en el Informe “**Disponibilidad energética en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas y Análisis de aporte al sistema eléctrico uruguayo**”. Si bien las hipótesis planteadas pueden variar caso a caso, se considera que los lineamientos que se proponen son una razonable primera aproximación para estimar la disponibilidad energética en los dos tipos de sistemas considerados.

## EMBALSES DE USO PRIORITARIO PARA RIEGO

Dado un embalse para riego ya diseñado, cuyas características geométricas se conocen, se debe determinar en primer lugar:

- la cuenca de aporte (delimitación en planos, área que abarca)
- la altura máxima o salto aprovechable
- el volumen de almacenamiento del embalse.

A partir de dichos datos, se siguen los pasos que se presentan a continuación para estimar la disponibilidad energética media del embalse de riego, suponiendo que:

- El riego es por gravedad.
- Dentro de la zafra de riego, se turbinan todo el caudal de riego.
- El caudal de funcionamiento de la turbina a instalar es igual al caudal de riego, que se supone constante; y la altura de funcionamiento de la turbina o salto bruto - **H** - es igual a la cota de vertido del embalse menos la cota del agua en el canal de riego.
- Fuera de la temporada de riego, solo se turbinan en condiciones de vertido. O sea, cuando hay agua en exceso y se puede turbinar sin comprometer la reserva para riego.

### 1. Estimación del volumen medio de aporte anual al embalse

Se determina primero el volumen medio mensual de aporte al embalse. Para ello, se estima el escurrimiento medio mensual de la cuenca a través de alguno de los siguientes métodos:

- La utilización del mapa de escurrimientos medios (mm/mes) de Uruguay que se presenta en el Anexo I.
- La aplicación del modelo de precipitación-escurrimiento de Temez en la cuenca de aporte al embalse para obtener una serie de escurrimiento mensual (mm/mes), a la cual se le determina el promedio. La descripción del modelo de Temez, así como las herramientas y datos necesarios para su aplicación se encuentran en la sección 2.1 del Manual de Pequeñas Presas de la Dirección Nacional de Agua (DINAGUA), disponible en:  
<http://www.mvotma.gub.uy/index.php/biblioteca/documentos-de-agua/item/10003003>.

Luego se determina el volumen medio de aporte anual al embalse como:

$$\text{Aporte medio anual (m}^3\text{)} = \frac{12 * \text{Esc medio (mm/mes)} * \text{A cuenca (m}^2\text{)}}{1000}$$

siendo **Esc medio** el escurrimiento medio de la cuenca ya determinado y **A cuenca** el área de la cuenca de aporte.

Se determina entonces la relación entre el volumen medio anual de aporte al embalse y el volumen máximo de almacenamiento del mismo. Se obtiene así un número adimensional que refleja la capacidad de la cuenca en relación al volumen del embalse.

$$\frac{\text{Aporte medio anual (m}^3\text{)}}{\text{Volumen del embalse (m}^3\text{)}}$$

## 2. Caudal de funcionamiento y potencia de la turbina

El caudal de funcionamiento de la turbina se toma como el caudal de riego por gravedad. Se lo supone asume uniforme, y por tanto será igual al volumen del embalse dividido el tiempo medio de riego.

A continuación se supone que el embalse riega en forma continua durante toda la temporada de riego de modo que:

$$\text{Caudal funcionamiento (m}^3\text{/h)} = \frac{\text{Volumen del embalse (m}^3\text{)}}{4 * 30 * 24}$$

La potencia nominal de la turbina se toma como:

$$\text{Potencia nominal (kW)} = \frac{9.81 * \text{Caudal funcionamiento (m}^3\text{/h)} * H \text{ (m)} * \eta}{3600}$$

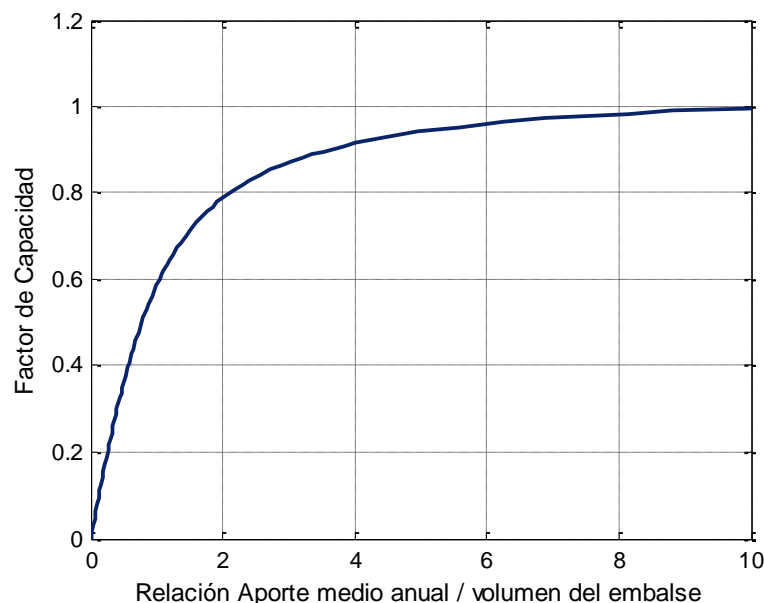
siendo  $H$  la altura de funcionamiento de la turbina ya definida y  $\eta$  su rendimiento; el valor de  $\eta$  puede tomarse entre 0,85 y 0,90.

## 3. Estimación del Factor de Capacidad del embalse

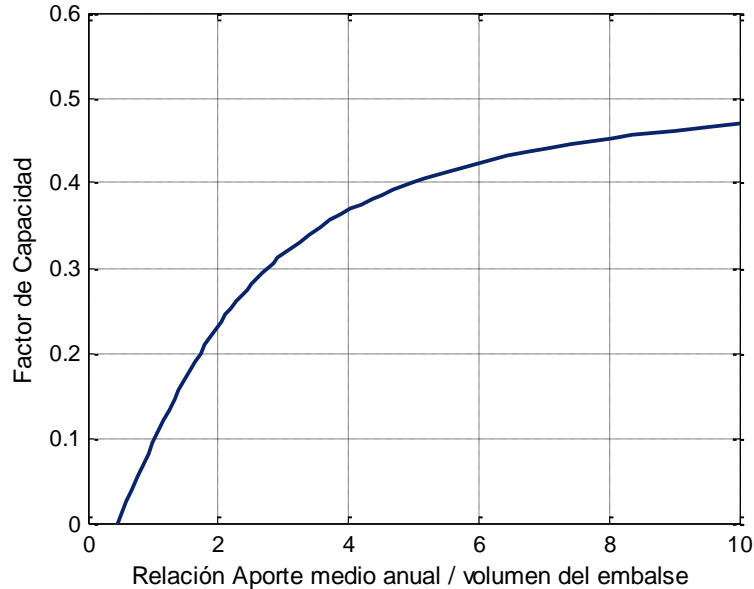
Se define el **Factor de Capacidad** como la relación entre la energía hidroeléctrica media generada en un embalse durante una temporada y la energía máxima generable en el mismo tiempo con la misma potencia instalada; corresponde aproximadamente a la fracción del tiempo en que la turbina se encuentra en operación.

A partir de la relación entre el aporte medio anual al embalse y el volumen máximo del mismo, calculada en el punto 1, se estima el Factor de Capacidad del embalse en la temporada de riego y en la temporada de llenado a partir de las siguientes gráficas.

Figura 1: Factor de Capacidad – Riego (Nov-Feb, 4 meses)



**Figura 2: Factor de Capacidad – Llenado (Mar-Oct, 8meses)**



#### **4. Estimación de la energía media anual generable en el embalse**

A partir de los Factores de Capacidad por temporada, se calcula la energía media generada en el embalse, para cada temporada, como:

- En la temporada de riego:

$$\text{Energía Riego (kWh)} =$$

$$\text{Factor de Capacidad (Riego)} * 4 * 30 * 24 * \text{Potencia nominal (kW)}$$

La estimación de energía durante la temporada de riego no depende de la hipótesis de riego continuo sino de la cantidad total de agua utilizada. Manteniendo las otras hipótesis, si el riego fuera intermitente (por ejemplo, para utilizar la discriminación horaria en las tarifas, o por distintas programaciones del riego), el aumento del caudal de funcionamiento compensa la reducción en el factor de capacidad, obteniéndose aproximadamente la misma energía en la temporada.

- En la temporada de llenado:

$$\text{Energía Llenado (kWh)} =$$

$$\text{Factor de Capacidad (Llenado)} * 8 * 30 * 24 * \text{Potencia nominal (kW)}$$

Si el turbinado fuera intermitente y no continuo, se tendría un mayor caudal de funcionamiento (requiriendo mayor potencia instalada) que repercutiría en una mayor energía generada durante el período de llenado. En este caso el factor de capacidad depende del tiempo de vertido y no se vería afectado sustancialmente.

Finalmente, para calcular la energía media anual generada, se suman las energías a generar en cada temporada.

# EMBALSES PARA GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

Dado un punto de cierre de un curso de agua en el cual se plantea represar para generar un embalse para generación hidroeléctrica, se determina en primer lugar

- su cuenca de aporte
- la relación entre la altura de presa y el volumen almacenado,

a partir de la topografía del terreno en la zona de la cuenca y en el punto de cierre, respectivamente.

A partir de dichos datos, se siguen los pasos que se presentan a continuación para estimar la disponibilidad energética media del embalse, para diferentes potencias instaladas.

## 1. Estimación del caudal medio de aporte al embalse

Se determina primero el aporte medio mensual de agua al embalse. Para ello, se estima el escurrimiento medio mensual de la cuenca a través de alguno de los siguientes métodos:

- La utilización del mapa de escurrimientos medios (mm/mes) de Uruguay que se presenta en el Anexo I.
- La aplicación del modelo de precipitación-escurrimiento de Temez en la cuenca de aporte al embalse para obtener una serie de valores de escurrimiento mensual (mm/mes), a la cual se le determina el promedio. La descripción del modelo de Temez, así como las herramientas y datos necesarios para su aplicación se encuentran en la sección 2.1 del Manual de Pequeñas Presas de la Dirección Nacional de Agua (DINAGUA), disponible en: <http://www.mvotma.gub.uy/index.php/biblioteca/documentos-de-agua/item/10003003>.

Luego se determina el caudal medio de aporte al embalse como:

$$\mathbf{Caudal\ medio} \text{ (m}^3\text{/h)} = \frac{\mathbf{Esc\ medio} \text{ (mm/mes)} * \mathbf{A\ cuenca} \text{ (m}^2\text{)}}{1000 * 30 * 24}$$

siendo **Esc medio** el escurrimiento medio de la cuenca ya determinado y **A cuenca** el área de la cuenca de aporte.

Se calcula entonces el Tiempo de Residencia del embalse como:

$$\mathbf{Tiempo\ de\ Residencia} \text{ (meses)} = \frac{\mathbf{Volumen\ del\ embalse} \text{ (m}^3\text{)}}{\mathbf{Caudal\ medio} \text{ (m}^3\text{/h)} * 24 * 30}$$

## 2. Caudal de funcionamiento y potencia de la turbina

Se consideran varios caudales de funcionamiento iguales a 1, 1.4, 2.4, 4 y 6 veces el caudal medio de aporte al embalse. Para cada uno de ellos se calcula la potencia nominal de la turbina como:

$$Potencia\ nominal\ (kW) = \frac{9.81 * Caudal\ funcionamiento\ \left(\frac{m^3}{h}\right) * H\ (m) * \eta}{3600}$$

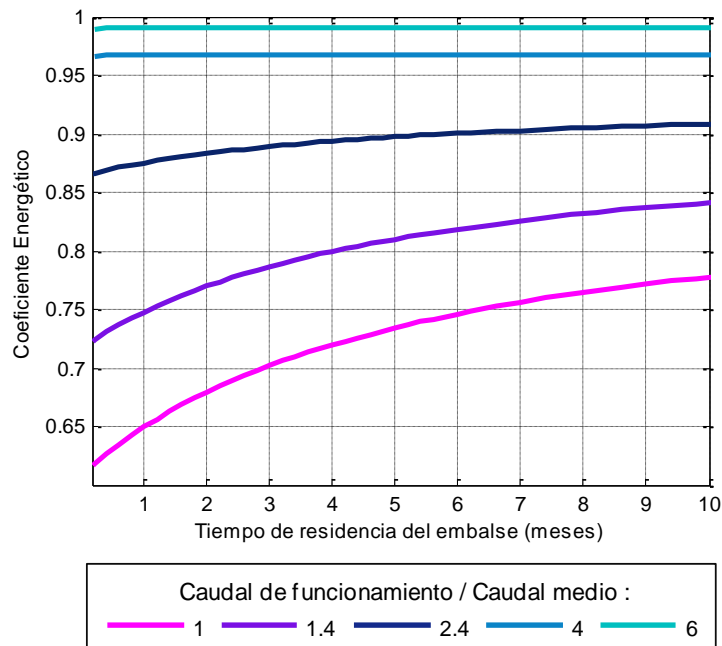
siendo  $H$  la altura de funcionamiento o salto de la turbina, y  $\eta$  su rendimiento; el valor de  $\eta$  puede tomarse entre 0,85 y 0,9.

## 3. Estimación del Coeficiente Energético

Se define el Coeficiente Energético como la relación entre la energía hidroeléctrica media generada en el embalse (con determinada potencia nominal instalada) y la energía máxima generable con una turbina con caudal de funcionamiento igual al caudal medio de aporte al embalse.

A partir del Tiempo de Residencia del embalse calculado en el punto anterior, del coeficiente que relaciona el caudal de funcionamiento de la turbina y del caudal medio de aporte al embalse, se estima el Coeficiente Energético asociado a cada turbina, a partir de la gráfica que se presenta en la Figura 3.

Figura 3: Coeficiente Energético según caudal de funcionamiento de la turbina



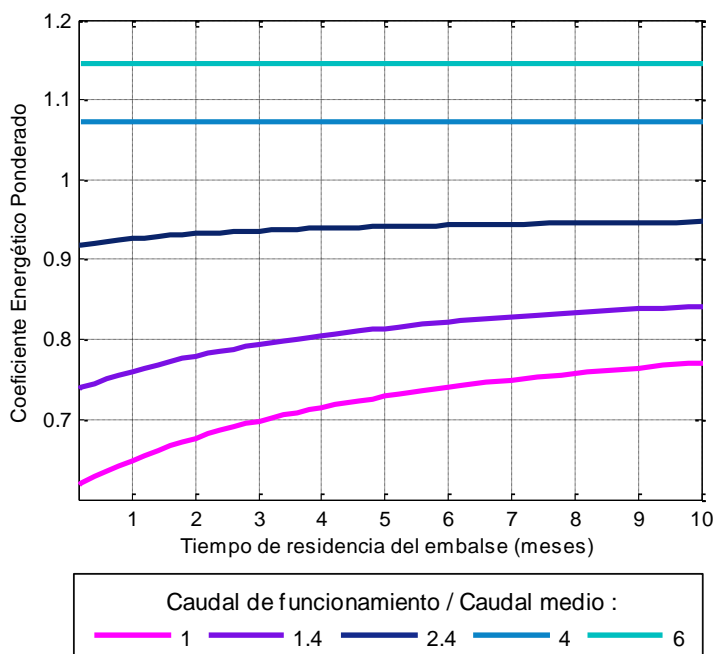
Al considerar caudales de funcionamiento significativamente mayores al caudal medio, se dispone de un grado de libertad más: la elección del horario de turbinado, que puede ser de interés ubicar en los tramos horarios más exigidos por la demanda si estos son remunerados diferencialmente. Teniendo en cuenta este aspecto, se estima el Coeficiente Energético Ponderado (por los coeficientes de remuneración según tramo horario y estación del año de la Tabla 1) que se presenta a continuación (Figura 4).

**Tabla 1: Coeficientes de remuneración por energía (según estación y tramo horario)**

Tramo	Horario	Horas	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Punta	18 - 22 hs	4	1.3	1.3	1.4	1.2
Valle	0 - 7 hs	7	1.1	0.8	0.9	0.7
Llano	Resto de las horas	13	1.2	0.9	1	0.8

Resolución 12 – 1056 del directorio de UTE.

**Figura 4: Coeficiente Energético Ponderado según caudal de funcionamiento de la turbina**



#### 4. Estimación de la energía media anual a generar en el embalse

A partir del Coeficiente Energético (o del Coeficiente Energético Ponderado si se obtiene un precio discriminado por tramo horario según Tabla 1), se calcula la energía media anual a generar en el embalse como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Energía (kWh)} \\
 &= \text{Coeficiente Energético (Ponderado)} * \eta * 12 * 30 * 24 \\
 & * \frac{9.81 * \text{Caudal medio (m}^3\text{/h)} * H(\text{m})}{3600}
 \end{aligned}$$

siendo  $\eta$  el rendimiento de la turbina; el valor de  $\eta$  puede tomarse entre 0,85 y 0,90

A partir de la energía generada por las diferentes potencias instaladas y de los costos de inversión/mantenimiento de las correspondientes turbinas podrá seleccionarse la potencia más adecuada a instalar en cada caso.



# ANEXO I: MAPA DE ESCURRIMIENTOS MEDIOS DE URUGUAY

Mapa elaborado en base a los datos publicados por Genta, J.L y Failache, N. "Monitoreo y disponibilidad de recurso hídricos en Uruguay". Dirección Nacional de Aguas y Saneamiento – Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente.

