



SALTOS CARACTERÍSTICOS

Guía N°2 - Trabajo Práctico Integrador
Aprovechamientos Hidráulicos (2026)

Integrantes de la Cátedra

- Ing. Juan Carlos Cacciavillani
- Ing. Diego Fabián
- Ing. Juan Pablo Flores

1. INTRODUCCIÓN

El salto es, junto con el caudal, la variable que gobierna la potencia disponible de un aprovechamiento hidroeléctrico. Definir con cuidado los saltos brutos y netos característicos no es simplemente un trámite previo al diseño: es lo que fija el rango dentro del cual va a trabajar la máquina, condiciona la selección del tipo y tamaño de la turbina, y determina buena parte de la energía que finalmente se pueda generar.

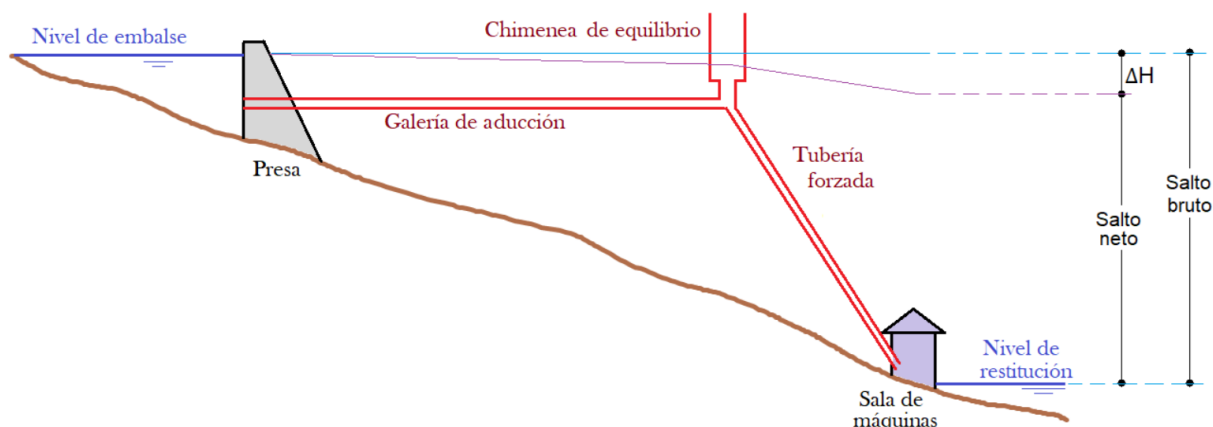


Figura 1. Esquema con los saltos bruto y neto de un aprovechamiento.

El salto bruto se obtiene, en principio, como la diferencia entre dos cotas: el nivel del embalse y el nivel de restitución aguas abajo. Sin embargo, ninguno de esos niveles es único ni constante, ya que ambos varían según las condiciones de operación de la central y el régimen del río.

Entre el embalse y la restitución, además, el agua pierde energía por fricción y por singularidades a lo largo de la conducción. Por eso, el salto neto representa la energía hidráulica efectivamente disponible para la turbina, y es el valor que se utiliza para dimensionar la máquina.

1.1. Objetivos de la guía

A partir de la definición de los niveles característicos de operación del embalse y de restitución, y de una primera configuración general del aprovechamiento, la meta de esta guía es calcular los saltos brutos y netos máximo y mínimo del proyecto. Para ello, se predimensionará la conducción y se determinarán las pérdidas de energía del sistema en las situaciones de estudio.

1.2. Software requerido

Para esta guía no se requiere instalar software adicional al indicado en la Guía 1. Será suficiente trabajar con Excel para realizar los cálculos y con Word para redactar el informe. También pueden emplearse sus equivalentes en Google Drive, siempre que permitan organizar los datos y presentar los resultados con claridad.

Dado que esta guía se centra por completo en el desarrollo de cálculos, se recomienda comenzar desde ahora una planilla propia y ordenada. Varios de los valores que se obtengan en esta etapa se reutilizarán en guías posteriores, por lo que conviene conservarlos de manera clara para evitar rehacer las cuentas más adelante.



2. NIVELES DE OPERACIÓN

En la Guía N°1 se definió la ubicación del cierre en el río, fijando la cota de fondo y una cota de coronamiento aproximada a partir del reconocimiento del vaso. A partir de esos valores, y de algunos datos adicionales de proyecto que se detallan a continuación, corresponde ahora definir los niveles característicos que gobiernan la operación del aprovechamiento.

2.1. Datos generales de proyecto

Los siguientes valores se adoptan como datos de partida para el desarrollo del trabajo práctico integrador:

Datos generales de proyecto		
Caudal total del aprovechamiento	Q	$= 147,00 \text{ m}^3/\text{s}$
Densidad del agua	δ	$= 997,00 \text{ kg/m}^3$
Temperatura del agua	T_a	$= 15,00 \text{ }^\circ\text{C}$
Aceleración de la gravedad	g	$= 9,81 \text{ m/s}^2$
Longitud de galería a presión	L_G	$= 15.100 \text{ m}$
Pendiente de galería a presión	i_G	$= 0,10 \text{ } \%$
Longitud de tubería forzada	L_{TF}	$= 400,00 \text{ m}$
Pérdidas singulares (% de p. generalizadas)	Δ	$= 10,00 \text{ } \%$
Período de diseño	T	$= 50,00 \text{ años}$
Coeficientes de Manning en la conducción		
Galería a presión: Hormigón	n_H	$= 0,0135$
Tubería forzada: Acero	n_A	$= 0,0108$

Características de la central		
Tipo de turbina		$= \text{Francis}$
Cantidad de grupos	N°	$= 2$
Velocidad máxima a la salida del tubo difusor	U_{TD}	$= 2,00 \text{ m/s}$
Eficiencia hidráulica	η	$= 0,945$
Tiempo de operación	TO	$= 2190 \text{ Horas}$
Frecuencia de la red	f	$= 50 \text{ Hz}$

Se adopta el mismo caudal turbinado por la central Agua del Toro, ubicada aguas arriba. Esta decisión responde a que el volumen de embalse previsto para El Baqueano es de un orden de magnitud menor; en consecuencia, el aprovechamiento carece de capacidad suficiente para regular de manera independiente el volumen que recibe, y debe turbinar, en términos generales, el mismo gasto que eroga la central precedente.

Los valores indicados para la conducción son tentativos y dependen de la configuración real adoptada, por lo que podrán ajustarse una vez definido el trazado entre la toma y la central.



Si bien las pérdidas por singularidades (asociadas a curvas, obra de toma, transiciones, válvulas y otros elementos) se calculan mediante expresiones específicas para cada caso, en esta etapa no resulta necesario analizarlas individualmente. Por simplicidad, se considerará que equivalen al 10% de las pérdidas generalizadas de toda la conducción.

2.2. Niveles de embalse

Son las distintas cotas que alcanza el vaso del embalse a lo largo de su operación. Arrancando desde la cota inferior, se identifica el **nivel de fondo del embalse** (NFE), que corresponde a la cota del lecho del río en el sitio donde se funda la presa.

Por encima de ese nivel se desarrolla el volumen muerto, destinado a alojar los sedimentos que se depositarán en el embalse a lo largo de su vida útil. Para El Baqueano, el cálculo de este volumen debería considerar únicamente el aporte de su “cuenca propia”, comprendida entre Agua del Toro y el cierre, ya que la mayor parte del sedimento transportado por el río desde su nacimiento queda retenido aguas arriba, en el embalse precedente. El **nivel de volumen muerto** (NVM) representa la cota hasta la cual se estima que llegará ese relleno sedimentario.

Por encima de esa cota se ubica la obra de toma del aprovechamiento, cuyo análisis se desarrollará en la próxima guía del trabajo práctico. Su posición deberá respetar una separación mínima respecto del nivel de volumen muerto y garantizar, además, una sumergencia adecuada por encima del **nivel mínimo minimorum** (Nmm). Este último representa el nivel mínimo extraordinario de operación de las turbinas: por debajo de esta cota, el salto disponible ya no resulta suficiente para el funcionamiento de las máquinas.

Por encima se encuentra el **nivel mínimo normal** (Nmn), que marca el límite inferior de la banda de regulación normal del embalse. Hasta este nivel, el embalse puede descargarse durante la operación ordinaria manteniendo la generación prevista o comprometida. Por debajo de esta cota, la generación continúa siendo técnicamente posible, pero deja de constituir el objetivo principal de la operación, ya que implicaría utilizar una reserva no prevista.

En el extremo superior de la banda de operación se ubica el **nivel máximo normal** (NMN), que corresponde al nivel más alto que el embalse puede alcanzar en condiciones normales y que, en muchos casos, coincide con la cota de vertedero libre. Es habitual que este nivel se gestione de manera estacional: durante los períodos con mayor probabilidad de crecidas, puede reducirse deliberadamente para disponer de un resguardo adicional que permita amortiguar el evento.

El **nivel máximo maximorum** (NMM) es el nivel más alto que alcanza el embalse durante el tránsito de la Crecida Máxima Probable (CMP) por el vertedero de seguridad. Durante este evento, la generación no constituye la práctica habitual, ya que la prioridad pasa a ser la seguridad de la presa. Además, una parte importante del caudal se evacúa por el vertedero y el agua puede transportar una carga elevada de sedimentos y material de arrastre, con potencial para producir daños en los equipos.

Por definición de diseño, este nivel debe quedar siempre por debajo del **nivel de coronamiento** (NC), que corresponde a la cota superior de la presa. La diferencia entre ambos niveles constituye la revancha de seguridad. Este margen puede ser más ajustado en presas de hormigón que en presas de materiales sueltos, ya que estas últimas no admiten sobrepasos sin riesgo de falla.

Niveles de Embalse		
Nivel de coronamiento	NC	= 1196,00 msnm
Nivel máximo maximorum	NMM	= 1194,00 msnm
Nivel máximo normal	NMN	= 1190,50 msnm
Nivel mínimo normal	Nmn	= 1173,00 msnm
Nivel mínimo minimorum	Nmm	= 1169,00 msnm
Nivel de volumen muerto	NVM	= 1160,00 msnm
Nivel de fondo del embalse	NFE	= 1150,00 msnm

2.3. Niveles de restitución

Aguas abajo, en la restitución, se consideran tres niveles característicos, todos asociados al caudal turbinado en cada condición de operación. El más bajo corresponde al **nivel mínimo de restitución** (NRm), que se alcanza cuando una sola unidad funciona al 50% de su potencia, es decir, en régimen de carga parcial.

Cuando una única unidad opera a plena carga, el caudal descargado define el **nivel de restitución normal** (NRN). En cambio, si todas las turbinas instaladas trabajan al 100% de su potencia, con el distribuidor en su máxima apertura, se alcanza el **nivel máximo de restitución** (NRM), asociado al mayor caudal turbinado previsto para la central.

Niveles de Restitución		
2 unidades con potencia al 100%	NRM	= 1003,50 msnm
1 unidad con potencia al 100%	NRN	= 1003,00 msnm
1 unidad con potencia al 50%	NRm	= 1002,00 msnm

Se propone adoptar los valores anteriores, aunque la determinación exacta de estos niveles requiere, en rigor, una curva de descarga del tramo de restitución, obtenida por relevamiento del cauce o por modelación hidráulica, algo que excede el alcance de esta guía.

3. SALTOS

3.1. Saltos brutos

El salto bruto (SB) se define como la diferencia entre el nivel de embalse y el de restitución, sin descontar ninguna pérdida de carga. Se calculan dos valores característicos, el máximo y el mínimo:

$$\text{Saltos brutos característicos:} \quad SBM = NMN - NRm \quad SBm = Nmm - NRM$$

El **salto bruto máximo** (SBM) combina el nivel de embalse más alto en operación normal (NMN) con el nivel de restitución más bajo (NRm): la mejor combinación posible. El **salto bruto mínimo** (SBm) combina el nivel de embalse más bajo, el mínimo minimorum (Nmm), con el nivel de restitución más alto (NRM): la peor combinación posible.

3.2. Pérdidas de carga

Antes de calcular las pérdidas de carga, es necesario estimar las dimensiones de la galería a presión y de la tubería forzada. Para ello, se adopta una velocidad de hipótesis asociada al caudal máximo y, suponiendo conductos de sección circular, se determina el diámetro preliminar:

$$\text{Velocidad de la galería a presión: } U_{GP} = 2,5 \text{ m/s}$$

$$\text{Velocidad de la tubería forzada: } U_{TF} = 6 \text{ m/s}$$

$$\text{Predimensionamiento de la conducción: } Q = U \cdot A \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot U}}$$

A partir de estos diámetros se obtiene el radio hidráulico de cada conducto circular ($RH = D/4$), necesario para el cálculo de pérdidas. Un tramo se extiende desde la obra de toma hasta la chimenea de equilibrio y el otro desde ese punto hasta la cámara espiral.

Las **pérdidas de carga generalizadas** (por fricción) se calculan con la expresión de Chézy-Manning, para cada tramo de la conducción, donde η es el coeficiente de Manning del material.

$$\text{Pérdidas de carga generalizadas: } \Delta h_{gen} = \frac{\eta^2 \cdot U^2}{RH^{4/3}} \cdot L$$

Las **pérdidas singulares** se adoptan, según lo mencionado previamente, como un 10% de las generalizadas, por lo que la pérdida total en la conducción resulta:

$$\text{Pérdidas de carga totales: } \Delta h_{cond} = \Delta h_{gen} + \Delta h_{sing} = 1,10 \cdot \Delta h_{gen}$$

Finalmente, se determina la pérdida de energía provocada a la **salida del tubo difusor**:

$$\text{Pérdidas de carga a la salida del tubo difusor: } \Delta h_{TD} = \frac{U_{TD}^2}{2 \cdot g}$$

Estas pérdidas dependen del caudal que efectivamente circula por la conducción. Para este trabajo se evaluarán dos situaciones características: a caudal máximo, correspondiente al 100% del caudal de diseño con ambas turbinas en operación, y a caudal mínimo, adoptado como el 25% del caudal máximo, equivalente a una sola unidad trabajando al 50% de su potencia.

Como las pérdidas de carga varían con el cuadrado de la velocidad, una reducción del caudal a la cuarta parte implica también una velocidad cuatro veces menor. En consecuencia, la pérdida total a caudal máximo resulta 16 veces mayor que la pérdida correspondiente a caudal mínimo.

3.3. Saltos netos

De acuerdo con la norma IEC, el salto neto se define como la diferencia entre el nivel del embalse y el nivel de restitución, descontando las pérdidas de carga que se producen desde la obra de toma hasta la entrada a la cámara espiral de la turbina, junto con la energía cinética a la salida del tubo difusor.

$$\text{Salto neto (IEC): } SN = N_{embalse} - N_{restitución} - \Delta h_{cond} - \Delta h_{TD}$$



Cabe aclarar que esta expresión no contempla las pérdidas de carga asociadas a la turbina (en el distribuidor, el rodete y el tubo de aspiración), ya que quedan representadas por la eficiencia hidráulica de la máquina (η), que se aplica de manera independiente al calcular la potencia.

También en este caso se calculan dos valores característicos, y en cada uno la pérdida de carga que se descuenta es la correspondiente a la condición de caudal asociada al salto respectivo:

$$\text{Saltos netos característicos:} \quad SNM = SBM - \Delta h_{Qmin} \quad SNm = SBm - \Delta h_{Qmax}$$

El **salto neto máximo** (SNM) representa la mejor condición posible para la central: al salto bruto más favorable (SBM) se le restan las pérdidas mínimas, propias de la situación con el 25% del caudal total.

De la misma manera, el **salto neto mínimo** (SNm) representa la peor condición posible: al salto bruto ya desfavorable (SBm) se le suman las pérdidas máximas, que ocurren justamente cuando circula el caudal de diseño completo.

4. ENTREGABLES

Para la próxima clase, contar con:

- Los diámetros preliminares de la galería a presión y de la tubería forzada.
- Las pérdidas de carga calculadas para el caudal máximo y el caudal mínimo (generalizadas, singulares, a la salida del tubo difusor y totales).
- Los valores de salto bruto máximo y mínimo, y de salto neto máximo y mínimo.

En paralelo, se puede ir avanzando con la redacción del informe final, incorporando en esta etapa el procedimiento seguido, fórmulas, hipótesis adoptadas y tablas para la definición de los niveles de operación y el cálculo de los saltos característicos.