

## **Homework N-05**

**Instructor:** Dr. Joaquín Valencia

**Estudiante:** Antonio Pérez

**ID:** 158655

**Fecha de entrega:** (01/14/2026)

# Problema. ¿Dos o más turbinas Pelton en serie: es posible y es recomendable? (SI + ejemplo realista)

## 1. Planteamiento

Se considera una instalación hidroeléctrica de alta cabeza donde el agua se almacena en una represa y se conduce hasta una casa de máquinas mediante un penstock. En proyectos reales, la turbina Pelton se selecciona típicamente cuando el **head** es alto y el caudal es moderado.

**Pregunta técnica:** ¿es posible colocar **dos o más turbinas Pelton en serie** y, si es posible, **es recomendable** comparado con alternativas comunes (múltiples chorros o unidades en paralelo)?

## 2. Aclaración crítica: dos tipos de “serie”

En el contexto de Pelton, “serie” se confunde fácilmente. Se distinguen dos formas:

1. **Serie estricta (descarga → siguiente rodete):** el flujo que sale del primer rodete se intenta usar para accionar un segundo rodete.
2. **Serie por etapas de head (multietapa):** el mismo caudal  $Q$  atraviesa un sistema donde el **head neto total** se reparte en etapas  $H_{n,i}$ , y cada etapa dispone de su **propia boquilla** para generar su chorro.

**Respuesta técnica:** La serie estricta no es recomendable; la única “serie” viable es la multietapa por head con boquillas por etapa.

## 3. Soporte físico: por qué la serie estricta no se recomienda

Una Pelton es una turbina de **impulso**. En la boquilla ocurre la conversión de presión a velocidad, formando un chorro **libre** (presión aproximada a la atmosférica). Por diseño, se busca que el rodete extraiga la mayor fracción posible de energía del chorro.

Después del impacto, el flujo sale:

- **disperso** (no forma chorro coherente),
- **con mezcla y turbulencia**,
- **con energía cinética residual no recuperable fácilmente**.

Por lo tanto, intentar alimentar un segundo rodete con esa descarga obliga a introducir ductos, captación, y un proceso de re-formación de chorro que incrementa pérdidas. En consecuencia, la serie estricta tiende a ser ineficiente y operacionalmente compleja.

## 4. ¿Cuándo tendría sentido una “serie” multietapa?

Una multietapa Pelton puede considerarse cuando existen restricciones reales como:

- limitaciones mecánicas (velocidad periférica máxima, esfuerzos, cavitación no aplica como reacción, pero sí límites de manufactura y seguridad),
- necesidad de dividir el head para operar con rodetes más pequeños o por control,
- requerimientos de modularidad en una casa de máquinas con etapas internas.

**Sin embargo:** aun siendo viable, normalmente **no es la primera opción**, porque agrega boquillas, válvulas, conexiones y pérdidas. En la práctica se prefiere:

- **Una Pelton con múltiples chorros** (varias boquillas sobre el mismo rodete), o
- **Unidades en paralelo** (dos turbinas iguales alimentadas desde un manifold).

## 5. Nomenclatura (Sistema Internacional)

Variable	Valor	Descripción
$H_g$	dato	Head bruto represa → boquilla (m)
$H_L$	dato	Pérdidas totales del sistema (m)
$H_n$	$H_g - H_L$	Head neto disponible (m)
$Q$	dato	Caudal volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$\rho$	$\approx 1000$	Densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$g$	9,81	Gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ )
$C_v$	dato	Coeficiente de velocidad boquilla
$N$	2	Número de etapas (serie multietapa)
$H_{n,i}$	$H_n/N$	Head neto por etapa (m)
$V_j$	?	Velocidad del chorro ( $\text{m}/\text{s}$ )
$\eta$	dato	Eficiencia global (hidráulica+mecánica+eléctrica)
$P$	?	Potencia (W)

## 6. Modelo matemático (base para comparar configuraciones)

### 6.1 Head neto

$$H_n = H_g - H_L$$

$$H_n = H_g - H_L$$

### 6.2 Chorro Pelton

$$V_j = C_v \sqrt{2gH_n}$$

$$V_j = C_v \sqrt{2gH_n}$$

### 6.3 Potencia total disponible

$$P_{\text{total}} = \eta \rho g Q H_n$$

$$P_{\text{total}} = \eta \rho g Q H_n$$

**Interpretación:** la potencia depende del **head neto total**. Cambiar la topología (serie/paralelo) solo altera  $H_L$  (pérdidas) y la complejidad de operación, pero no crea energía adicional.

## 7. Ejemplo realista (inicia desde la represa) y comparación de opciones

**Situación real de diseño:** Una represa alimenta una casa de máquinas mediante un penstock. El diseño inicial propone:

- Head bruto desde la superficie del embalse hasta la casa de máquinas:  $H_g = 520$  m.
- Caudal de diseño:  $Q = 0,80 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Se considera una boquilla con  $C_v = 0,98$ .
- Eficiencia global estimada:  $\eta = 0,88$  (hidráulica+mecánica+eléctrica).

Se evaluarán tres configuraciones:

1. **Caso A (Referencia): 1 Pelton (una etapa).**
2. **Caso B: 2 Pelton en serie multietapa (head dividido).**
3. **Caso C: 2 Pelton en paralelo (dos unidades, cada una con  $Q/2$ ).**

### Suposición de pérdidas (para comparar de manera realista)

En instalaciones reales, aumentar válvulas/boquillas/conexiones suele aumentar pérdidas. Se asume:

- Caso A: pérdidas  $H_{L,A} = 35$  m (penstock + válvula principal + boquilla).
- Caso B: pérdidas  $H_{L,B} = 48$  m (componentes extra de segunda etapa).
- Caso C: pérdidas  $H_{L,C} = 40$  m (manifold y dos ramas).

### Paso 7.1 Head neto de cada caso

**Fórmula:**  $H_n = H_g - H_L$

**Sustitución:**

$$H_{n,A} = 520 - 35 = 485 \text{ m} \quad H_{n,B} = 520 - 48 = 472 \text{ m} \quad H_{n,C} = 520 - 40 = 480 \text{ m}$$

**Resultados:**  $H_{n,A} = 485 \text{ m}$   $H_{n,B} = 472 \text{ m}$   $H_{n,C} = 480 \text{ m}$

### Paso 7.2 Potencia total por caso

**Fórmula:**  $P = \eta \rho g Q H_n$

**Sustitución (con  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ,  $\eta = 0,88$ ):**

$$P_A = 0,88(1000)(9,81)(0,80)(485) = 3,35 \times 10^6 \text{ W}$$

$$P_B = 0,88(1000)(9,81)(0,80)(472) = 3,26 \times 10^6 \text{ W}$$

$$P_C = 0,88(1000)(9,81)(0,80)(480) = 3,31 \times 10^6 \text{ W}$$

**Resultados:**  $P_A \approx 3,35 \text{ MW}$   $P_B \approx 3,26 \text{ MW}$   $P_C \approx 3,31 \text{ MW}$

### Paso 7.3 Discusión: cuál es recomendable y por qué

**Observación 1 (energía disponible):** la potencia cambia principalmente porque cambian las pérdidas  $H_L$ . El caso B (serie) tiene más pérdidas por tener más componentes (boquilla/valvulería/carcasa extra).

**Observación 2 (operación):**

- **Serie multietapa (Caso B):** mayor complejidad, más pérdidas, y no aumenta potencia; se justifica solo si existen restricciones de diseño (tamaño del rodete, límites de velocidad, integración mecánica).
- **Paralelo (Caso C):** es altamente usado porque permite mantener eficiencia, repartir caudal y tener redundancia.
- **Una sola unidad (Caso A):** es óptima si el equipo puede manejar el head y el caudal sin restricciones mecánicas.

**Conclusión del ejemplo:** La serie no es la opción recomendada en general; paralelo o múltiples chorros suelen ser superiores.

## 8. Conclusiones finales

1. Sí es posible usar dos o más Pelton “en serie” solamente como **multietapa por head**.
2. La **serie estricta** (descarga directa entre rodetes) no se recomienda debido a la naturaleza del chorro libre.
3. La potencia depende de  $H_n$ :  $P = \eta \rho g Q H_n$ . La topología cambia  $H_L$ , no crea energía.
4. En implementaciones reales, la serie tiende a introducir pérdidas y complejidad; por ello normalmente se prefiere **múltiples chorros o unidades en paralelo**.