

*MÓDULO: ENERGÍA MINIHIDRÁULICA*

*EJEMPLO SIMPLIFICADO  
DE UN ESTUDIO DE  
VIABILIDAD PARA LA  
REHABILITACIÓN DE UNA  
MINICENTRAL  
HIDROELÉCTRICA*

*AUTOR: M<sup>a</sup> CARMEN LÓPEZ OCÓN*

## ANTECEDENTES - PLANTEAMIENTO

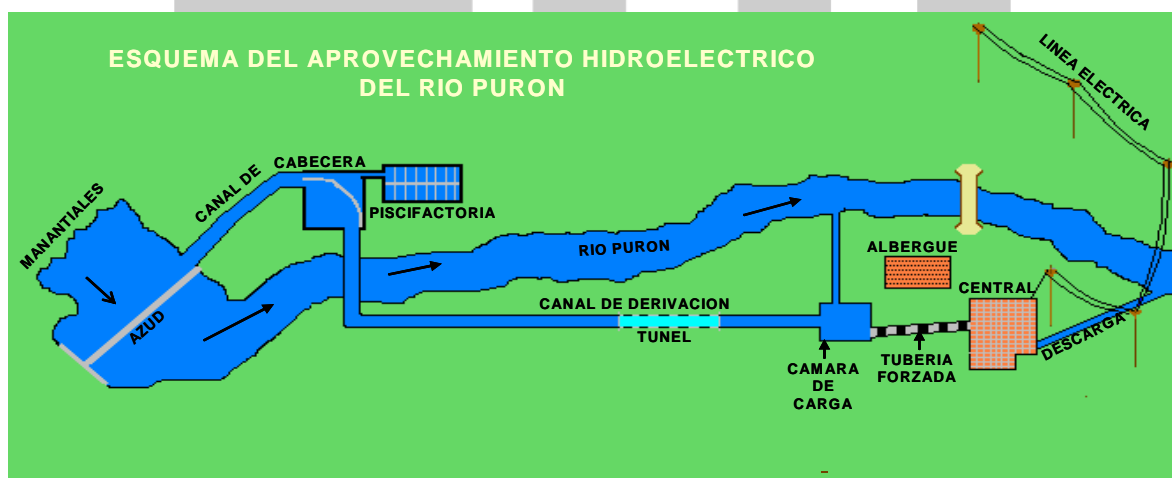
Un estudio de viabilidad es un documento previo a un Proyecto constructivo que, mediante una inversión mínima, permite determinar la rentabilidad técnica y económica que supone la construcción o rehabilitación de un aprovechamiento hidroeléctrico.

La central a estudiar está en Asturias, en la cuenca hidrográfica del Norte. Dejó de funcionar en los años 70 debido al deterioro de su equipamiento, con unos rendimientos muy bajos y, como consecuencia, a su falta de rentabilidad.

El aprovechamiento es de tipo fluyente y cuenta con las siguientes instalaciones:

- Azud.
- Canal de derivación de casi 1.000 m de longitud.
- Cámara de carga con aliviadero lateral.
- Tubería forzada.
- Edificio de la central (no queda ningún resto de equipamiento electromecánico).
- Canal de descarga de 100 m de longitud.

Las instalaciones se encuentran en un estado aceptable, excepto la tubería forzada (inservible) y el edificio de la central (muy deteriorado).



## ACTUACIONES A REALIZAR

### 1. OBTENCIÓN DE LOS DATOS CONCESIONALES

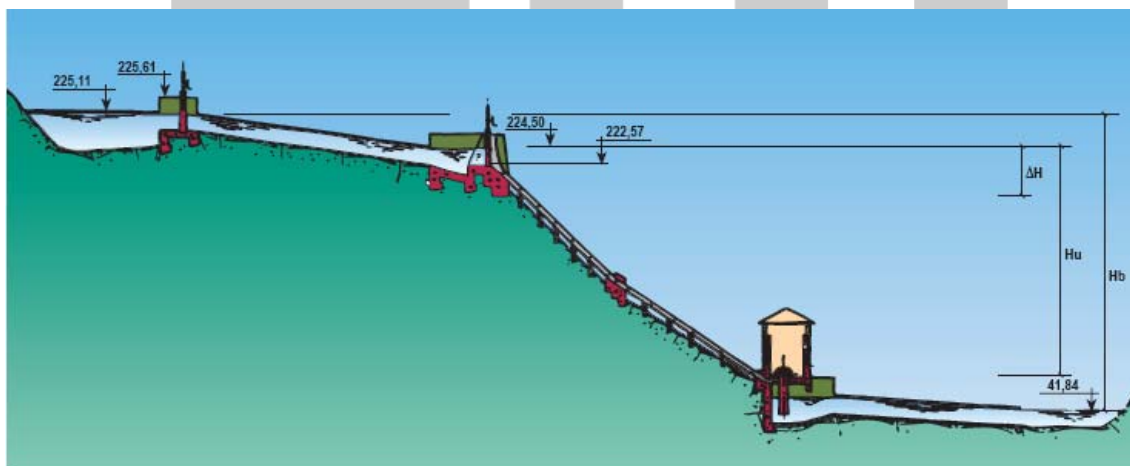
Según el Registro de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Norte, la concesión de aguas no está afectada por expediente de caducidad y fue otorgada al propietario actual por Resolución de fecha Junio de 1940, para aprovechar un caudal de 800 l/s en un salto bruto de 180 m.

### 2. OBTENCIÓN DE LOS DATOS TOPOGRÁFICOS

Es necesario disponer de una serie de cotas con el fin de determinar la capacidad de transporte del canal de derivación y el salto bruto del aprovechamiento, que en muchos casos no coincide con el salto registrado en la concesión.

Los datos de altimetría más significativos del aprovechamiento en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) son:

- Cota de coronación del azud..... 225,61
- Cota de la lámina de agua en la toma..... 225,11
- Cota del fondo de la cámara de agua..... 222,57
- Cota de la lámina de agua en la cámara de carga..... 224,50
- Cota de lámina de agua en la zona del río donde se restituye el agua...41,84
- Cota de lámina de agua en el tubo de aspiración de la turbina.....42,34



### 3. DETERMINACIÓN DEL SALTO

El cálculo del salto neto se realiza a partir de los datos topográficos y de las pérdidas de carga. Estas están constituidas principalmente por:

- Pérdidas en la toma (reja)
- Pérdidas en el canal de derivación
- Pérdidas en la tubería forzada

Estas pérdidas de carga se pueden considerar, en una primera estimación, entre el 5% y el 10% del salto bruto.

Por tanto, el salto neto del aprovechamiento es:

$$\text{Salto bruto } (H_b) = 225,11 - 41,84 = 183,27 \text{ m}$$

$$\text{Salto útil } (H_u) = 224,50 - 42,34 = 182,16 \text{ m}$$

$$\text{Pérdidas } (H_p) = 7\% * H_b = 12,83 \text{ m}$$

$$\text{Salto neto } (H_n) = \text{Salto útil } (H_u) - \text{Pérdidas de carga } (H_p)$$

$$\text{Salto neto } (H_n) = 182,16 - 12,83 = 169,3 \text{ m} \approx \mathbf{170 \text{ m}}$$

#### 4. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DEL CANAL

La central tiene una infraestructura existente (azud, canal, edificio...) que se intentará aprovechar. Por este motivo la capacidad máxima que puede transportar el canal de derivación limita el caudal a derivar hacia la central.

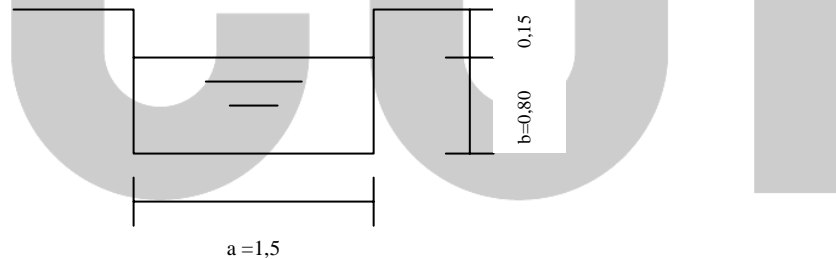
La capacidad del canal suele determinarse a partir de fórmulas empíricas. Sin embargo, puede realizarse una estimación rápida de la misma a partir de la sección mojada mínima del canal.

La sección mojada del canal es:

$$S = b \times a = 0,8 \times 1,5 = 1,2 \text{ m}^2$$

Siendo: b = altura de la lámina de agua del canal (m)

a = anchura del canal (m)



La capacidad máxima de transporte del canal (expresada en m<sup>3</sup>/s) estará comprendida entre el 80% y el 100% de ese valor.

$$Q_1 = (1,2 \times 0,8) \times 1 \text{ m/s} = 0,96 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (960 l/s)}$$

$$Q_2 = (1,2 \times 1) \times 1 \text{ m/s} = 1,2 \text{ m}^3/\text{s} \text{ (1.200 l/s)}$$

Aplicando cualquiera de las fórmulas empíricas existentes para el cálculo de la capacidad de transporte de canales abiertos, se hubiera obtenido que el canal puede transportar un caudal máximo de 1.000 l/s.

#### 5. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE EQUIPAMIENTO

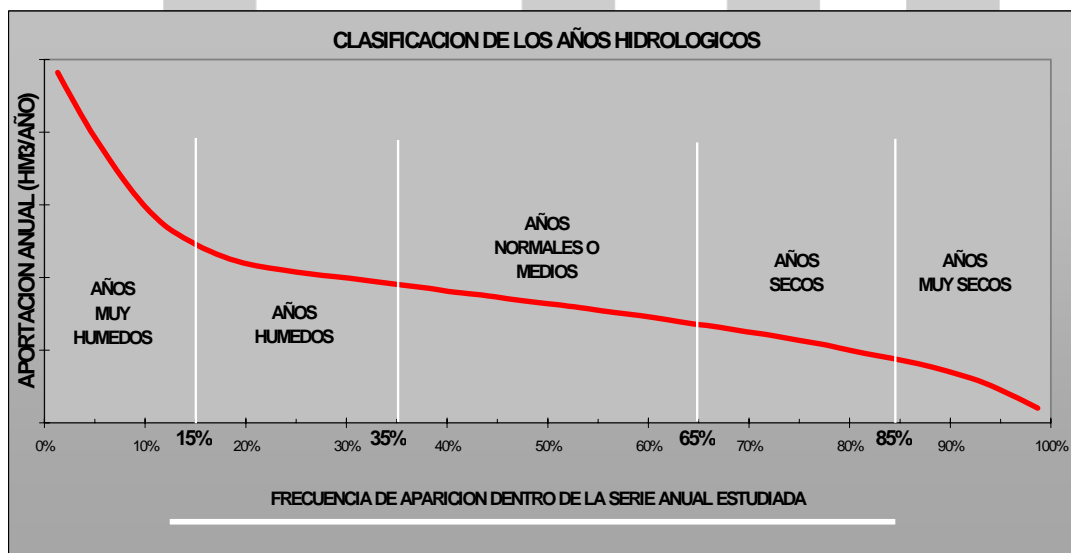
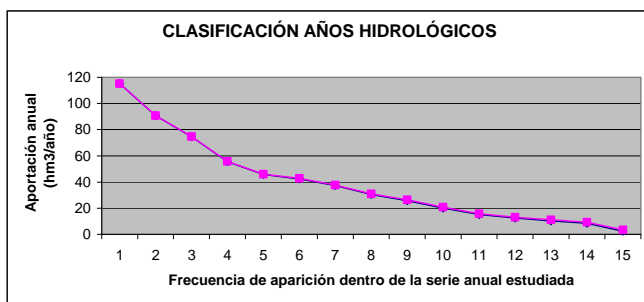
Se dispone de una serie continua de 15 años con datos de caudales medios diarios y aportaciones anuales, provenientes de una estación de aforo situada a 100 m aguas arriba de la central.



Con los datos de las aportaciones anuales, distribuiremos los años en muy húmedos, húmedos, normales o medios, secos y muy secos:

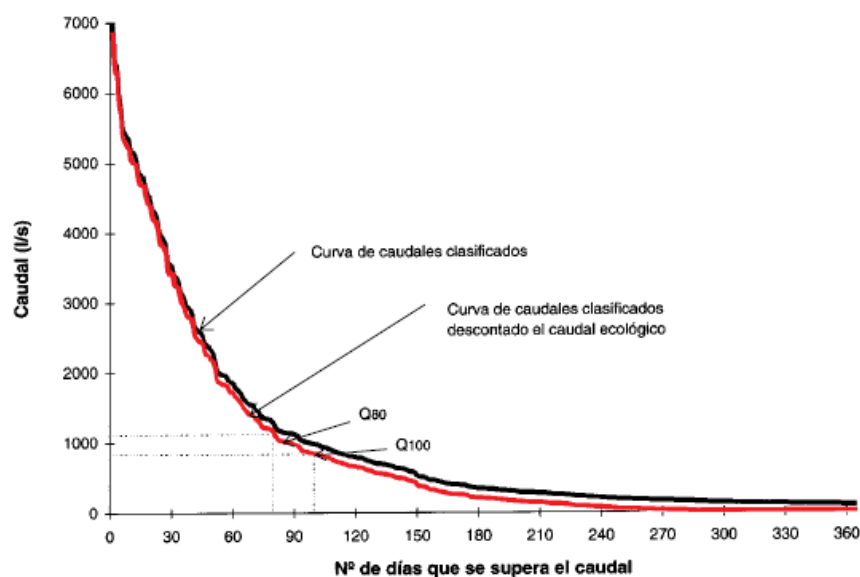
NÚMERO AÑOS DE LA SERIE: 15

DATOS APORTACIONES		ORDENACIÓN DE APORTACIONES		CLASIFICACIÓN AÑOS				Q MEDIO (M3/S)
AÑO HIDROLÓGICO (sin orden)	Aportación (Hm3)	AÑO HIDROLÓGICO (ordenados)	Aportación (Hm3)	NUM.	PERCENT.	INDICE	TIPO	
1990/91	74,58	1994/95	115,17	1	3%	1	MUY HUMEDO	3,65
1991/92	12,43	1993/94	90,69	2	10%	1	MUY HUMEDO	2,88
1992/93	25,79	1990/91	74,58	3	17%	2	HUMEDO	2,36
1993/94	90,69	2002/03	55,48	4	23%	2	HUMEDO	1,76
1994/95	115,17	2003/04	45,69	5	30%	2	HUMEDO	1,45
1995/96	42,36	1995/96	42,36	6	37%	3	MEDIO	1,34
1996/97	10,27	1997/98	37,28	7	43%	3	MEDIO	1,18
1997/98	37,28	2001/02	30,42	8	50%	3	MEDIO	0,96
1998/99	8,45	1992/93	25,79	9	57%	3	MEDIO	0,82
1999/00	15,12	2000/01	20,17	10	63%	3	MEDIO	0,64
2000/01	20,17	1999/00	15,12	11	70%	4	SECO	0,48
2001/02	30,42	1991/92	12,43	12	77%	4	SECO	0,39
2002/03	55,48	1996/97	10,27	13	83%	4	SECO	0,33
2003/04	45,69	1998/99	8,45	14	90%	5	MUY SECO	0,27
2004/05	2,46	2004/05	2,46	15	97%	5	MUY SECO	0,08



De la clasificación anterior elegiremos un año medio representativo y con los datos de caudales medios diarios de ese año, se construirá la curva de caudales clasificados.

El caudal de equipamiento de la turbina se establece a partir de la curva de caudales clasificados a la que previamente se le ha descontado el caudal ecológico fijado por el organismo competente. En este caso, el caudal ecológico es de 100 l/s.



El caudal de equipamiento suele fluctuar entre el  $Q_{80}$  y el  $Q_{100}$ . En este caso se tiene que el caudal concesional, 800 l/s, se corresponde con el  $Q_{100}$  y la capacidad máxima de transporte del canal, 1.000 l/s, con el  $Q_{80}$ . Así, las distintas alternativas de caudal de equipamiento estarán comprendidas entre 800 l/s y 1.000 l/s.

## 6. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE TURBINA

Con los datos de salto y caudal que se tienen, aplicando el gráfico resulta que el tipo de turbina más adecuado para la minicentral del ejemplo es una PELTON.

### Alternativas de instalación

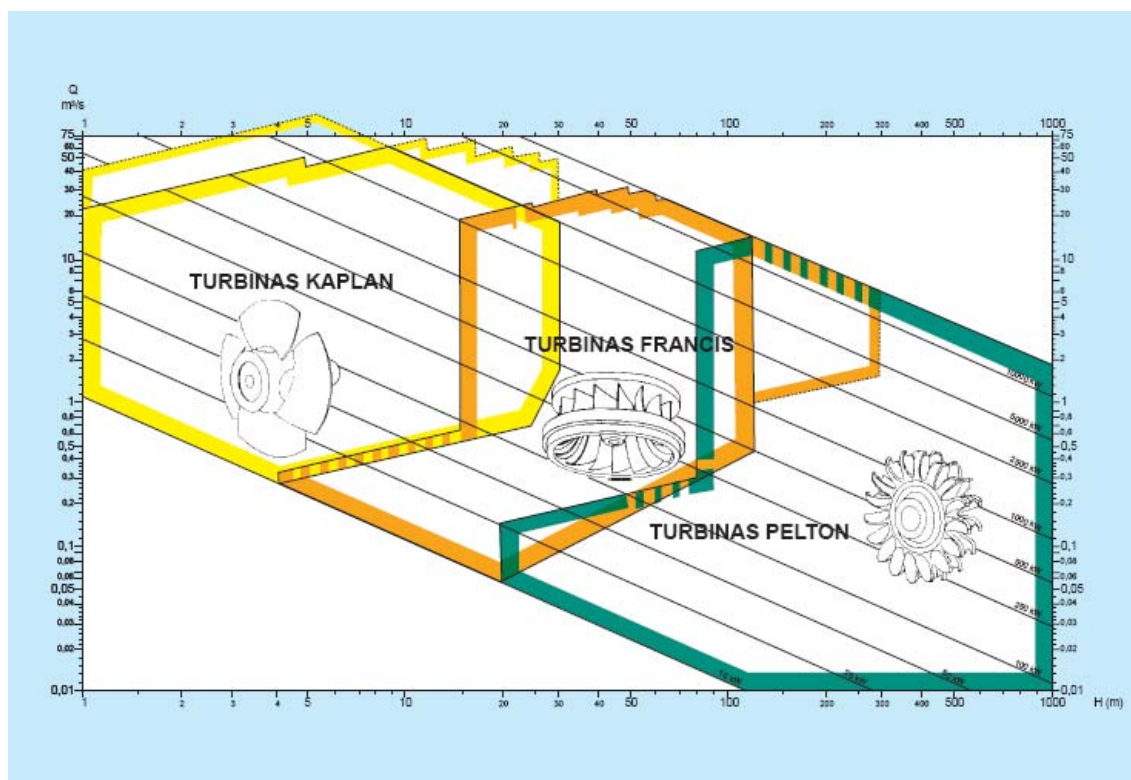
Se van a tener en cuenta tres posibles alternativas de instalación:

- 1ª alternativa: Caudal de equipamiento igual al caudal concesional  $Q_1 = 800$  l/s
- 2ª alternativa: Caudal intermedio  $Q_2 = 900$  l/s
- 3ª alternativa: Caudal de equipamiento igual a la máxima capacidad de transporte del canal  $Q_3 = 1.000$  l/s

### Producción media anual

En las tablas siguientes se indica para cada alternativa las horas de funcionamiento previstas, la potencia y los rendimientos de la turbina, así como la producción media esperada anual.

Los rendimientos y las potencias para los distintos caudales son facilitados y garantizados por el fabricante de la turbina.



Las horas de funcionamiento para cada caudal se obtienen a partir de la curva de caudales clasificados:

1ª Alternativa: Caudal de equipamiento  $Q_1 = 800 \text{ l/s}$

Caudal (l/s)	Rendimiento (%)	Potencia (kW)	Nº de horas de funcionamiento	Producción media anual (kWh/año)
> 800	87,6	1.168	2.592	3.027.456
800 - 700	88,4	1.105	264	291.720
700 - 600	89,5	970	312	302.640
600 - 500	89,6	821	336	275.856
500 - 400	88	660	192	126.720
400 - 300	88,8	518	384	198.912
300 - 200	88	367	696	255.432
200 - 100	84	210	1.152	241.920
100 - 80	80,4	121	408	49.368
<b>PRODUCCIÓN MEDIA ANUAL (kWh/año)</b>				<b>4.770.024</b>



2ª Alternativa: Caudal de equipamiento Q2 = 900 l/s

Caudal (l/s)	Rendimiento (%)	Potencia (kW)	Nº de horas de funcionamiento	Producción media anual (kWh/año)
> 900	87,6	1.314	2.352	3.090.528
900 - 800	88,4	1.252	240	300.480
800 - 700	89,5	1.119	264	295.416
700 - 600	89,6	971	312	302.952
600 - 500	87,6	803	336	269.808
500 - 400	88,5	664	192	127.488
400 - 300	88,8	518	384	198.912
300 - 200	87,2	363	696	252.648
200 - 100	84	210	1.152	241.920
100 - 90	80	127	192	24.384
<b>PRODUCCIÓN MEDIA ANUAL (kWh/año)</b>				<b>5.104.536</b>

3ª Alternativa: Caudal de equipamiento Q3 = 1.000 l/s

Caudal (l/s)	Rendimiento (%)	Potencia (kW)	Nº de horas de funcionamiento	Producción media anual (kWh/año)
> 1.000	87,6	1.460	2.184	3.188.640
1.000 - 900	88,4	1.340	168	225.120
900 - 800	89,5	1.268	240	304.320
800 - 700	89,6	1.120	264	295.680
700 - 600	89,6	971	312	302.952
600 - 500	87,6	803	336	269.808
500 - 400	88,5	664	192	127.488
400 - 300	88,8	518	384	198.912
300 - 200	87,2	363	696	252.648
200 - 100	84	210	1152	241.920
<b>PRODUCCIÓN MEDIA ANUAL (kWh/año)</b>				<b>5.407.488</b>



## 7. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES Y SU REHABILITACIÓN

Una vez definidos el caudal de equipamiento y el salto neto, se realiza una inspección del estado de las instalaciones siguiendo el curso del agua desde la toma hasta el canal de salida, y se definen las obras que será necesario llevar a cabo para adecuar las instalaciones a las nuevas condiciones del aprovechamiento.

### OBRA CIVIL

#### Azud

Está construido en mampostería revestida de hormigón en masa y situado perpendicularmente al río. Su anchura es de 5 m y su altura de 3 m. el estado de conservación es bueno, aunque habrá que nivelar la rasante de su coronación.

#### Obra de toma

En la margen derecha del río, y como prolongación del azud, se sitúa la toma de agua equipada con una rejilla de gruesos y una compuerta manual de madera que regula la entrada de agua al canal. La rejilla de gruesos presenta un buen estado de conservación, si bien la compuerta es necesario rehabilitarla: se sustituirá el tablero de madera por uno de acero, con junta tipo nota musical y se aprovecharán las guías y el mecanismo de accionamiento.

#### Canal de derivación

El canal tiene una longitud de 1.000 m y una sección rectangular 1,5 x 0,95 m. Está construido en mampostería y se encuentra cubierto de maleza y parcialmente aterrado debido a los desprendimientos y arrastres de agua. Habrá que proceder a su limpieza y a la impermeabilización total del canal (reparación de grietas con resina epoxi + malla metálica + inyecciones de mortero de cemento en muros y solera).

#### Cámara de carga

Al final del canal, separada de éste por una compuerta y una rejilla, se inicia la cámara de carga. Antes del comienzo de la cámara de carga, existe también otra compuerta lateral que permite el vaciado del canal. Será necesario sustituir estos equipos por otros nuevos, siendo las nuevas compuertas de accionamiento oleohidráulico e incorporando una nueva reja con un limpiarrejas automático.

#### Tubería forzada

La tubería forzada está totalmente inservible y por tanto habrá que reemplazarla por una nueva tubería, aunque se aprovechará su actual trazado, los puntos de anclaje y los macizos de refuerzo.

La tubería tendrá una longitud de 550 m.; en cuanto a su diámetro, éste puede predimensionarse teniendo en cuenta la limitación de la velocidad del agua que debe existir a la entrada de la válvula de guarda de la turbina.

- Para válvulas de mariposa:  $v \leq 4m/s$
- Para válvulas esféricas:  $v \leq 7m/s$

De forma aproximada también se puede adoptar como criterio que, para saltos inferiores a 200 m se suelen instalar válvulas de mariposa y en saltos superiores a 300 m, esféricas.

Conocidos el caudal a turbinar y la máxima velocidad permitida a la entrada de la válvula de guarda de turbina puede obtenerse la sección de esta válvula y por tanto, su diámetro:

$$S = \frac{Q}{V}$$

Siendo: Q = caudal (m<sup>3</sup>/s) // V = velocidad (m/s) // S = sección (m<sup>2</sup>)

El diámetro de la válvula da idea del diámetro de tubería a instalar, aunque hay que tener en cuenta que es conveniente que éste sea mayor, con el objeto de disminuir las pérdidas de carga:

Diámetro tubería menor  $\Rightarrow$  Mayor velocidad del agua  $\Rightarrow$  Mayor pérdida de carga  $\Rightarrow$  Disminución del salto neto

Diámetro tubería mayor  $\Rightarrow$  Menor velocidad del agua  $\Rightarrow$  Menor pérdida de carga  $\Rightarrow$  Menor disminución del salto neto

En este ejemplo (salto inferior a 200 m), se instalará una válvula de mariposa automática.

El diámetro de la válvula será:

$$Q = 800 \text{ l/s}; \quad 0,8 = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times 4 \text{ m/s}; \quad D = 505 \text{ mm}; \text{ diámetro normalizado } 550 \text{ mm}$$

$$Q = 900 \text{ l/s}; \quad 0,9 = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times 4 \text{ m/s}; \quad D = 535 \text{ mm}; \text{ diámetro normalizado } 550 \text{ mm}$$

$$Q = 1000 \text{ l/s}; \quad 1 = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times 4 \text{ m/s}; \quad D = 564 \text{ mm}; \text{ diámetro normalizado } 600 \text{ mm}$$

La tubería forzada se dimensiona buscando conseguir el mayor salto neto posible, es decir, las menores pérdidas de carga. Para ello se utilizan programas informáticos que calculan el diámetro de tubería que proporciona un compromiso óptimo entre el coste de la tubería (mayor diámetro  $\Rightarrow$  mayor coste económico) y las pérdidas de carga (mayor diámetro  $\Rightarrow$  menores pérdidas de carga  $\Rightarrow$  mayor salto neto  $\Rightarrow$  mayor producción eléctrica).

En este ejemplo, la tubería forzada será de acero al carbono y tendrá un diámetro variable entre 600 mm y 700 mm según la alternativa elegida.

Para poder aislar en caso necesario la cámara de carga de la tubería, se instalará al inicio de ésta una válvula.

### Edificio

El edificio de la central tiene una sola planta de 7 m de altura y unas dimensiones interiores de 15 m de longitud por 7 m de altura. Es capaz de albergar todo el equipamiento electromecánico. Se encuentra en muy mal estado.

Su rehabilitación consistirá en construir el tejado completamente nuevo, instalar todos los cerramientos nuevos (ventanas y puertas), acondicionar el interior (paredes y solado) para la implantación de los equipos y sanear y revocar todas las fachadas exteriores.

## 7.2. EQUIPAMIENTO ELECTROMECAÁNICO

De acuerdo con el caudal y el salto neto del aprovechamiento, se instalará una turbina Pelton. La potencia en eje de turbina y del generador al que ésta se acople, dependerán de la alternativa seleccionada. En todos los casos, el generador será síncrono con una tensión de generación de 380 V y con las siguientes potencias en eje:

	Potencia en eje de turbina (kW)	Potencia del generador (kW)
1ª Alternativa $Q_1 = 800$ l/s	1.168	1.115
2ª Alternativa $Q_2 = 900$ l/s	1.314	1.250
3ª Alternativa $Q_3 = 1.000$ l/s	1.460	1.390

## 7.3. INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Estará constituida por un transformador de 1.600 kVA, con relación de transformación 13.200/380 V, armarios de medida, armarios de potencia, control y protecciones.

La central estará totalmente automatizada incorporando todos los equipos de control y gobierno necesarios.

El acoplamiento a la línea eléctrica se realizará, según las indicaciones de la compañía eléctrica, en la línea de alta tensión de 13,2 kV situada a 200 m de la central, por lo que será necesario construir 200 m de línea.

## 8. PRESUPUESTO

El presupuesto debe incluir la valoración de las siguientes partidas:

- Obra Civil
- Equipos mecánicos
- Equipos eléctricos
- Elementos auxiliares

Se obtiene el Presupuesto de Ejecución Material. Aplicándole un porcentaje en concepto de Gastos Generales (13%), otro en concepto de Beneficio Industrial (6%) y el Impuesto sobre el Valor Añadido (16%), se obtiene el Presupuesto de Ejecución por Contrata.

<b>PRESUPUESTO (€)</b>	<b>1ª Alternativa Q = 800 l/s</b>	<b>2ª Alternativa Q = 900 l/s</b>	<b>3ª Alternativa Q = 1000 l/s</b>
Obra civil y tubería forzada	330.000	330.000	430.000
Equipos mecánicos	300.000	325.000	385.000
Equipos eléctricos	150.000	200.000	250.000
Línea eléctrica	15.000	15.000	15.000
Elementos auxiliares	60.000	60.000	60.000
Proyectos y dirección de obra	100.000	100.000	100.000
<b>PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)</b>	<b>955.000</b>	<b>1.030.000</b>	<b>1.240.000</b>
Gastos Generales (13%)	124.150	133.900	161.200
Beneficio Industrial (6%)	57.300	61.800	74.400
<b>PRESUPUESTO TOTAL</b>	<b>1.136.450</b>	<b>1.225.700</b>	<b>1.475.600</b>
IVA (16%)	181.832	196.112	236.096
<b>PRESUPUESTO EJECUCIÓN POR CONTRATA (PEC)</b>	<b>1.318.282</b>	<b>1.421.812</b>	<b>1.711.696</b>

## 9. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

Una vez conocida la producción media anual y el valor de la inversión, se analizará la rentabilidad del proyecto en base al Período de retorno (P.R.), el Índice de Energía (I.E.) y el Índice de Potencia (I.P.).

Los ingresos anuales previstos se obtienen a partir de la producción media anual considerando un precio de venta del kWh: 90 % TMR = 0,9 \* 0,076588 €/KwH = 0,0689292 €/kWh.

ANÁLISIS DE RENTABILIDAD	1ª Alternativa Q = 800 l/s	2ª Alternativa Q = 900 l/s	3ª Alternativa Q = 1000 l/s
Inversión (IVA no incluido)	955.000	1.030.000	1.240.000 €
Ingresos por venta de energía	328.794	351.852	372.734
Período de retorno (años)	2,90	2,93	3,32
Índice de energía	0,20	0,20	0,23
Índice de potencia	817	783	849

## 10. CONCLUSIONES

Como puede apreciarse en el análisis de rentabilidad, tanto el Período de retorno como los Índices de Energía y potencia son bastante similares en todos los casos, por lo que, en principio, **cualquiera de las tres alternativas sería viable y rentable.**

La primera alternativa Q=800 l/s, tiene la ventaja de que la inversión a realizar es menor y de que al coincidir este caudal con el caudal concesional, los trámites para poner en funcionamiento la central se reducen considerablemente.

Para las otras dos alternativas Q = 900 l/s y Q=1000 l/s, la inversión es algo superior. De hecho, la inversión crece a medida que aumenta el caudal de equipamiento. Sin embargo, el tiempo de recuperación de la inversión varía en medio año, y hay que tener en cuenta que una vez recuperada la inversión, los ingresos anuales previstos para las alternativas 2ª y 3ª son mayores. El inconveniente que presenta estas dos alternativas es la necesidad de solicitar un aumento de caudal concesional, puesto que este trámite puede durar entre dos y tres años.

Desde el punto de vista de los tres índices de rentabilidad analizados, la mejor alternativa sería la de 900 l/s, pero teniendo en cuenta la problemática en la tramitación administrativa de las concesiones, lo más lógico sería mantenerse en la concesión actual (800 l/s).