



4.6 SELECCIÓN DEL TIPO DE TURBINA

Según la definición de turbina de Luis Cuesta y Eugenio Vallarino de turbina en su libro de aprovechamientos hidroeléctricos: ‘‘las turbinas son, en esencia, ruedas hidráulicas que giran con una velocidad constante accionadas por la energía potencial de un desnivel de una corriente de agua y que transmiten la energía mecánica obtenida a un eje de giro para su utilización por un equipo consumidor’’. Esta rueda hidráulica se conoce por el nombre de rodete, conectado a través de un eje transmisor al rotor, pieza rotativa que forma parte de dicho equipo consumidor.

Tal y como se mencionó en el apartado 2.3 se ha considerado la opción de aprovechar la turbina existente, no obstante, debido al estado en el que se encuentra y la falta de piezas, esta opción probablemente acabe siendo más costosa que comprar una máquina nueva.

Para la elección del tipo de turbina pueden emplearse diagramas que con las características del salto neto y del caudal de diseño ayuden a descartar un tipo de turbinas y, por consiguiente, den una idea del tipo de turbinas más adecuadas al caso de estudio. Por otro lado cabe mencionar que estimar el tamaño de la turbina es necesario para completar los diseños previos de obra civil y evaluar su costo. A continuación se muestra el diagrama mencionado anteriormente:

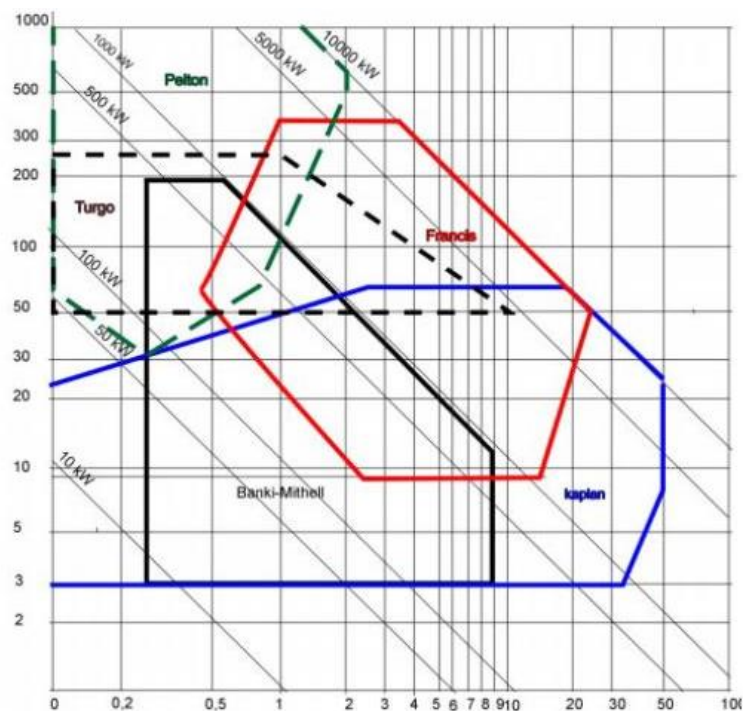


Figura 34 – Diagrama para la elección del tipo de turbina, Q (m^3/s) eje horizontal vs Salto neto(m) eje vertical

En el caso de estudio y para la alternativa propuesta tal y como se vio en el apartado 2.4.4 el caudal de diseño es $0,7-0,9 m^3/s$, y el salto neto variará dentro de los siguientes límites:

- $Q = 0,7 m^3/s$ y Salto neto = $13,18 m$
- $Q = 0,9 m^3/s$ y Salto neto = $13,035 m$

Según este gráfico podría utilizarse una Banki-Michel o una Kaplan, la turbina Francis quedaría fuera de la envolvente en la que caen ambos puntos de coordenadas (Q , Salto neto). Sin embargo, la decisión final debería de ser un proceso iterativo que iguale la producción anual de energía con el costo de adquisición y mantenimiento.

Tanto la Banki-Michel como la Kaplan tienen una buena adaptación a la variación de caudales. Según Celso Penche (1998), la Banki-Michel se usa con una gama muy amplia de caudales: $0,2 \sim 10 m^3/s$ y tiene un rendimiento máximo inferior al 87%, pero se mantiene casi constante cuando el caudal desciende hasta el 16% del nominal, y tiene un mínimo técnico inferior al 10% del caudal de diseño. Por otro lado, la Kaplan aporta un mejor rendimiento a costa de tener un rango de caudales algo menor:

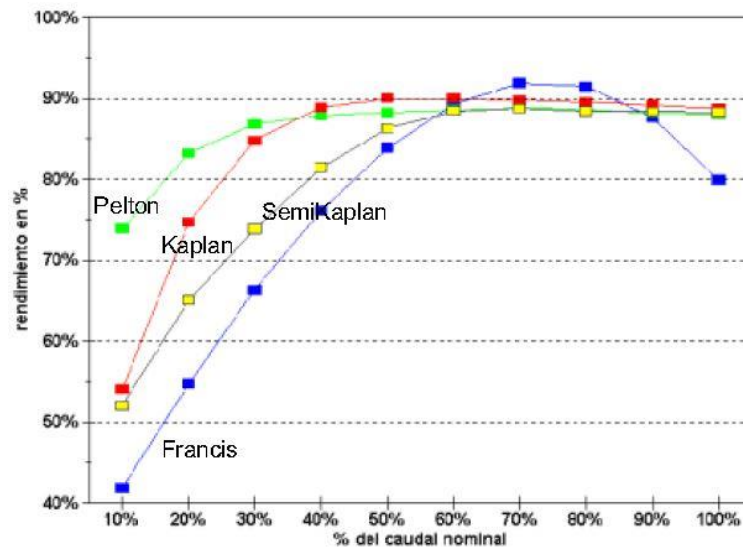


Figura 35 – Relación entre el caudal circulante y el rendimiento para diferentes tipos de turbina

Los álabes del rodete en las Kaplan son siempre regulables pero los álabes de distribución no tienen por qué serlo. Si ambos lo son, se trata de una pura Kaplan mientras que si sólo lo son los del rodete, es una semi-Kaplan. Las puras Kaplan de doble regulación comienzan a dar buenos rendimientos a partir del 20% del caudal nominal tal y como se ve en la gráfica anterior, mientras que las semi-Kaplan solo trabajan eficazmente a partir del 40% del caudal nominal. No obstante como cabe pensar, la implantación de una Kaplan con doble regulación es más costosa que la de una semi-Kaplan y habría que realizar un estudio para ver que opción durante la explotación del aprovechamiento acaba resultando más económica. La eficiencia de la turbina está relacionada con el caudal al que esté trabajando. Al tratarse de un aprovechamiento hidroeléctrico de tipo fluyente el caudal turbinado dependerá de del caudal real que lleve el río. Para el diseño de la turbina se tomará como caudal nominal $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$ y 13,035 m de salto neto.

Se ha utilizado el programa *TURBNPROTM Version 2.0* para el cálculo y dimensionamiento de la turbina hidráulica, este programa dadas las características del salto hidroeléctrico permite realizar un estudio preliminar de los tipos habituales de turbinas para seleccionar el diseño más adecuado para realizar un predimensionamiento. Los modelos no tienen por qué ser aquellos que se encontrarán en el mercado, no obstante, serán similares. Este programa admite el diseño de turbinas tipo Kaplan y Francis, el primer paso será decidir el tipo de turbina a elegir.

A continuación se muestran las condiciones de contorno comunes a las que estarán sometidas las turbinas que se estudiarán (debido a que el programa es estadounidense, se darán las unidades en ambos sistemas internacionales):

Caudal nominal	0,9 (m^3/s)	31,78 (cfs)
Salto Bruto	13,41(m)	44 (feet)
Salto neto	13,035 (m)	42,77 (feet)
Elevación del lugar	720 (m)	2362,2 (feet)
Temperatura del agua	15 ($^{\circ}C$)	59 (F)
Frecuencia	50 (Hz)	50 (Hz)

Figura 36 – Parámetros de cálculo para la selección de la turbina

Se han estudiado 2 posibles turbinas:

- Turbina Kaplan: Se estudiará para una eficiencia máxima para el caudal nominal y una eficiencia alta en un amplio rango de caudales.
- Turbina Francis: Se trata de una turbina del tipo Francis

A continuación, se muestran las soluciones que da el programa:

1. Turbina (Kaplan):

➤ 1.1 Eficiencia máxima para el caudal nominal.

Solution	Runner Diameter	Runner Diameter	Unit Speed	Specific Speed	Centerline Setting
Number	Inches	Milimeters	Rpm	NS	Feet
1	18.2	461	1000.0	109	11.7
2	21.2	539	750.0	82	20.3
0	0.0	0	0.0	0	0.0

Preliminary Output: **106 KW**

Performance at rated net head of: **42.8 ft**

CFS	%Eff	KW	%Rated
31.8	92.5	106	100.0
31.8	92.5	106	100.0*
23.8	91.6	79	75.0
15.9	89.2	51	50.0
7.9	82.0	24	25.0

Figura 37 – Solución para una turbina del tipo Kaplan con eficiencia máxima para el caudal nominal

*Best Efficiency Condition at Rated Net Head.

Esta turbina tiene un diámetro de 461 mm y su eficiencia máxima es del 92,5% para un caudal de $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

➤ 1.2 Eficiencia alta en un amplio rango de caudales.

Solution Number	Runner Diameter Inches	Runner Diameter Milimeters	Unit Speed Rpm	Specific Speed NS	Centerline Setting Feet
1	16.3	413	1000.0	107	8.9
0	0.0	0	0.0	0	0.0

Preliminary Output: **103 KW**

Performance at rated net head of: **42.8 ft**

CFS	%Eff	KW	%Rated
31.8	88.9	102	100.0
19.9	92.4	67	62.5*
23.8	91.9	79	75.0
15.9	91.8	53	50.0
7.9	87.9	25	25.0

Figura 38 – Solución para una turbina del tipo Kaplan con eficiencia alta en un amplio rango de caudales.

*Best Efficiency Condition at Rated Net Head.

Esta turbina tiene un diámetro de 413 mm y una eficiencia del 88,9% para el caudal nominal y presenta mayores eficiencias en un rango de caudales más amplio en comparación con la turbina 1.

2. Turbina (Francis):

➤ 2.1 Eficiencia máxima para el caudal nominal.

Solution Number	Runner Diameter Inches	Runner Diameter Milimeters	Unit Speed Rpm	Specific Speed NS	Centerline Setting Feet
1	19.8	502	600.0	65	22.6
2	21.1	537	500.0	54	24.8
3	22.4	569	428.6	46	26.4
4	23.6	599	375.0	41	27.3
5	24.7	627	333.3	36	28.0
6	25.7	654	300.0	33	28.3
7	26.6	677	272.7	30	28.7
8	27.5	700	250.0	27	28.9
9	28.3	720	230.8	25	29.1
10	29.0	738	214.3	23	29.2

Preliminary Output: **105 KW**

Performance at rated net head of: **42.8 ft**

CFS	%Eff	KW	%Rated
31.8	92.1	106	100.0
31.8	92.1	106	100.0*
23.8	86.1	74	75.0
15.9	69.0	40	50.0
7.9	40.2	12	25.0
22.9	84.8	70	72.1+

Figura 39 – Solución para una turbina del tipo Francis con eficiencia máxima para el caudal nominal

*Peak Efficiency Condition

+Draft Tube Surging peaks

Esta turbina tiene un diámetro de 502 mm y su eficiencia máxima es del 92,1% para un caudal de $0,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

➤ 2.2 Eficiencia alta en un amplio rango de caudales.

Solution Number	Runner Diameter Inches	Runner Diameter Milimeters	Unit Speed Rpm	Specific Speed NS	Centerline Setting Feet
1	17.2	437	750.0	80	18.6
2	18.7	474	600.0	64	21.5
3	20.0	507	500.0	54	23.8
4	21.2	538	428.6	46	25.4

5	22.3	567	375.0	40	26.4
6	23.4	594	333.3	36	27.0
7	24.3	617	300.0	32	27.5
8	25.2	640	272.7	29	28.0
9	26.0	659	250.0	27	28.2
10	26.7	677	230.8	25	28.3

Preliminary Output: 103 KW

Performance at rated net head of: 42.8 ft

CFS	%Eff	KW	%Rated
31.8	88.5	102	100.0
26.5	91.9	88	83.3*
23.8	90.3	78	75.0
15.9	74.3	43	50.0
7.9	41.8	12	25.0
20.3	85.3	63	63.8+

Figura 40 – Solución para una turbina del tipo Francis y con eficiencia alta en un amplio rango de caudales

*Peak Efficiency Condition

+Draft Tube Surging peaks

Esta turbina tiene un diámetro de 437 mm y una eficiencia del 88,5% para el caudal nominal y presenta mayores eficiencias en un rango de caudales más amplio en comparación con la turbina 1.

Las turbinas Francis suelen ser más caras que las Kaplan, por lo que, a igualdad de tamaño es preferible instalar la Kaplan. La Francis suele estar justificada si se va a trabajar con un rango muy amplio de caudales, pero no es el caso ya que pese a que se trate de una central de tipo fluyente y los caudales que se turbinen dependan del caudal real que lleve el río, el rango de caudales en los que se va a trabajar varía muy poco. Además, las dos turbinas Francis que el programa propone como soluciones para los dos casos planteados son de mayor tamaño que las turbinas Kaplan, también las eficiencias son menores. Por todo esto, se considera justificado la instalación de una turbina del tipo Kaplan.

Una vez se ha decidido que se instalará una turbina del tipo Kaplan, para las dos posibilidades planteadas al inicio se estimará la producción anual de energía, una vez hecho esto se comparará con el costo de adquisición y mantenimiento y en base a todo esto se tomará la decisión final.

A la hora de calcular la producción hay que tener en cuenta el caudal real que llevará el río. No obstante, puesto que el caudal de diseño, tal y como se dijo en el apartado 2.4.4 tiene un valor entre 0,7 y 0,9 m^3/s , como máximo se turbinarán 0,9 m^3/s . Esto quiere decir que, independientemente del caudal instantáneo que circule por el río, el caudal máximo de turbinación serán 0,9 m^3/s .

A partir de los datos publicados por el CEDEX¹ obtenidos en la estación foronómica 8104 de la ROEA² se han obtenido los caudales medios mensuales en m^3/s para cada mes del año:

	Caudal medio del río	Caudal medio-Caudal ecológico	Caudal turbinable
ENERO	1,382	1,232	0,9
FEBRERO	1,38	1,23	0,9
MARZO	1,434	1,284	0,9
ABRIL	1,48	1,33	0,9
MAYO	1,403	1,253	0,9
JUNIO	1,174	1,024	0,9
JULIO	0,983	0,833	0,833
AGOSTO	0,984	0,834	0,834
SEPTIEMBRE	0,998	0,848	0,848
OCTUBRE	1,04	0,89	0,89
NOVIEMBRE	1,101	0,951	0,9
DICIEMBRE	1,199	1,049	0,9

Figura 41 – Caudales medios mensuales para cada año desde el 2005 hasta el 2015

La eficiencia de la turbina está relacionada con el caudal al que se esté trabajando. El programa *TURBNPROTM Version 2.0* calcula directamente la potencia asociada a cada caudal:

¹ Centro De Estudios y eXperimentación de obras públicas.

² Red Oficial de Estaciones de Aforo

Mes	Caudal (m^3/s)	KAPLAN 461 mm		KAPLAN 413 mm	
		Potencia (KW)	Producción mensual (KWh/mes)	Potencia KW	Producción mensual (KWh/mes)
ENERO	0,9	106	79202	102	76120
FEBRERO	0,9	106	71537	102	68753
MARZO	0,9	106	79202	102	76120
ABRIL	0,9	106	76647	102	73664
MAYO	0,9	106	79202	102	76120
JUNIO	0,9	106	76647	102	73664
JULIO	0,83	98	73187	96	71325
AGOSTO	0,83	98	73275	96	71410
SEPTIEMBRE	0,85	100	72117	97	69486
OCTUBRE	0,89	106	78746	101	75443
NOVIEMBRE	0,9	106	76647	102	73664
DICIEMBRE	0,9	106	79202	102	76120

Producción anual (MWh)	916	Producción anual (MWh)	882
Facturación (€)	45781	Facturación (€)	44094

Diferencia de la facturación anual instalando una KAPLAN de 461 mm de diámetro o una KAPLAN 413 mm	1686 €
--	--------

Figura 42 – Estimación de las producciones para 2 turbinas Kaplan de diferentes tamaños

Los fabricantes de turbinas no suministran ninguna información sobre el costo ya que cada instalación es diferente y compleja. Puesto que no se tienen datos de precios, se han utilizado los tamaños como referencia del coste. El precio es linealmente proporcional al volumen de material. Respecto a diámetro sería un exponente de proporcionalidad mayor. Puesto que la diferencia de la facturación anual instalando una KAPLAN de 461 mm de diámetro o una KAPLAN 413 mm es tan solo de 1686 € y el coste de adquisición de una



turbina suele ser muy elevados en comparación con esta cifra, se considera justificada la instalación de una KAPLAN de eje vertical, diámetro del rodete 413 mm, velocidad de giro 1000 rpm y una potencia nominal de 103 KW.