

CURSOS POSTGRADOS

CIRCE - UZ

Minihidraulica. 5 Análisis Económico



ANÁLISIS ECONÓMICO

- Estudio hidrológico
- Potencia y energía a generar con distintos Q_e
- Costes de instalación y explotación con distintos Q_e
- Determinación de ingresos con distintos Q_e
- Comparación económica con distintos Q_e :
 - Valor actual neto (VAN) con distintos Q_e
 - Tasa interna de rendimiento (TIR) con distintos Q_e
- Mejor solución económica = Mejor caudal de equipamiento.
- Análisis de sensibilidad

ESTUDIO HIDROLÓGICO

- Conocimiento del caudal del aprovechamiento.
 - www.chebro.es (por ejemplo).
- Máximo número de años posible (10-15 últimos).
- Desarrollo diario del caudal durante estos años.
- Obtención de la media diaria de los años en estudio.
- Obtención de la curva de caudales clasificados.

ESTUDIO HIDROLÓGICO

Sin embargo, la posibilidad de que en el lugar en el que se desea realizar el aprovechamiento exista una estación de aforo es muy reducida, generalmente, si hay suerte, habrá una varios kilómetros aguas arriba y/u otra otros varios kilómetros aguas abajo. En estos casos, lo que conviene es realizar una campaña de medida de caudales en el punto en el que deseamos instalar la central y obtener una correlación con ambas estaciones de aforo, con lo que dispondremos de un número de datos de caudales tan elevado como los que dispongan las estaciones.

CAUDAL

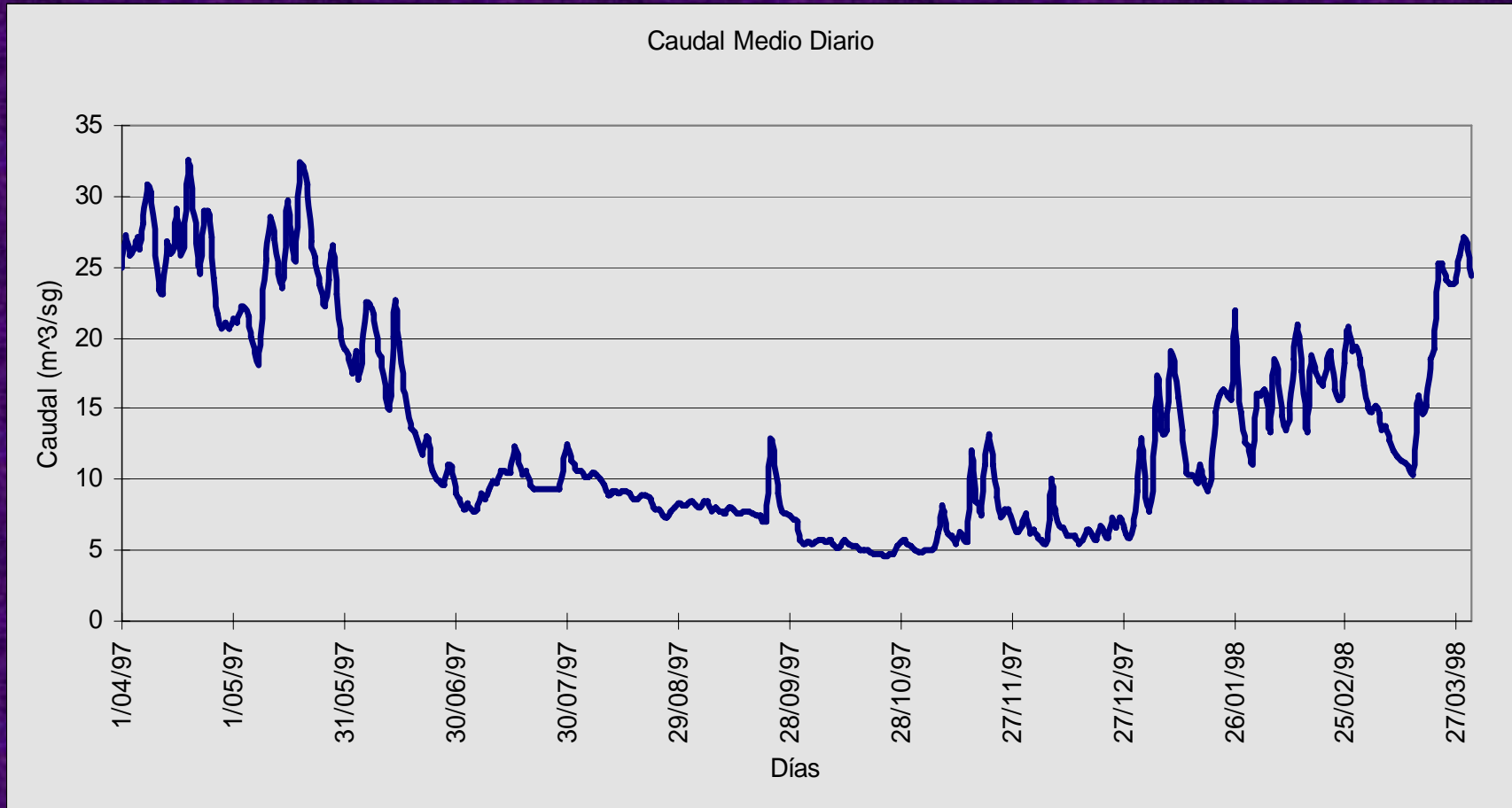
Curva de Caudales Medios Diarios

Para obtenerla basta con realizar la media de los caudales de cada uno de los días del año. Así, se obtendrá la media de todos los caudales de los días 1 de octubre de todos los años, obteniendo el caudal medio del día 1 de octubre del año medio.

Se repite dicha operación para todos los días del año haciendo la media con el número de años que tenemos en nuestra base de datos.

CAUDAL

Curva de Caudales Medios Diarios



ESTUDIO HIDROLÓGICO

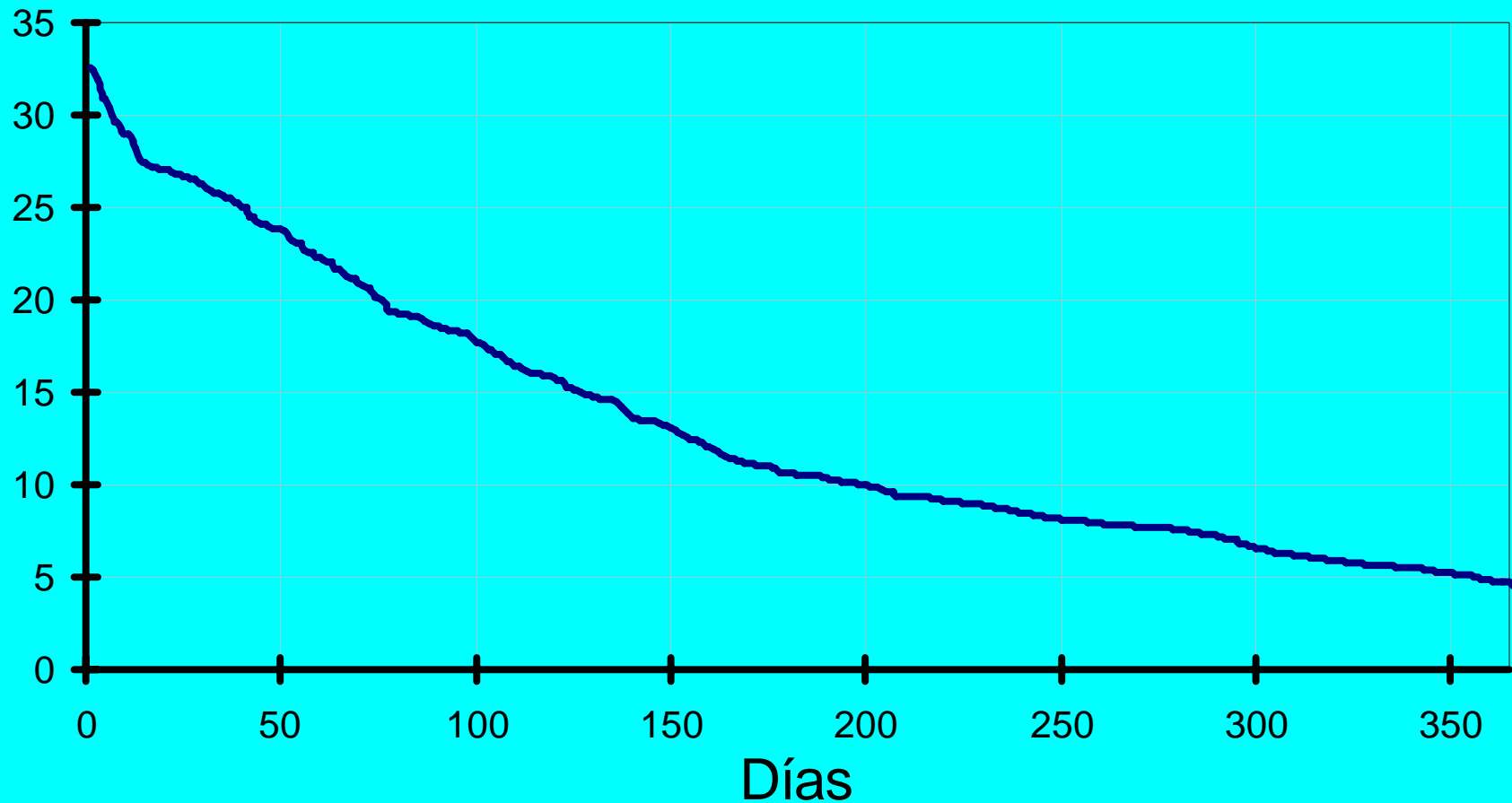
CURVA DE CAUDALES CLASIFICADOS

Organizando los datos anteriores de mayor a menor, y representándolos se obtiene la Curva de Caudales Medios Clasificados:

Esta curva indica el número de días en los que se supera determinado caudal, así en la curva anterior se observa que durante 200 días al año se superan $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

ESTUDIO HIDROLÓGICO

CURVA DE CAUDALES CLASIFICADOS

 m^3/sg 

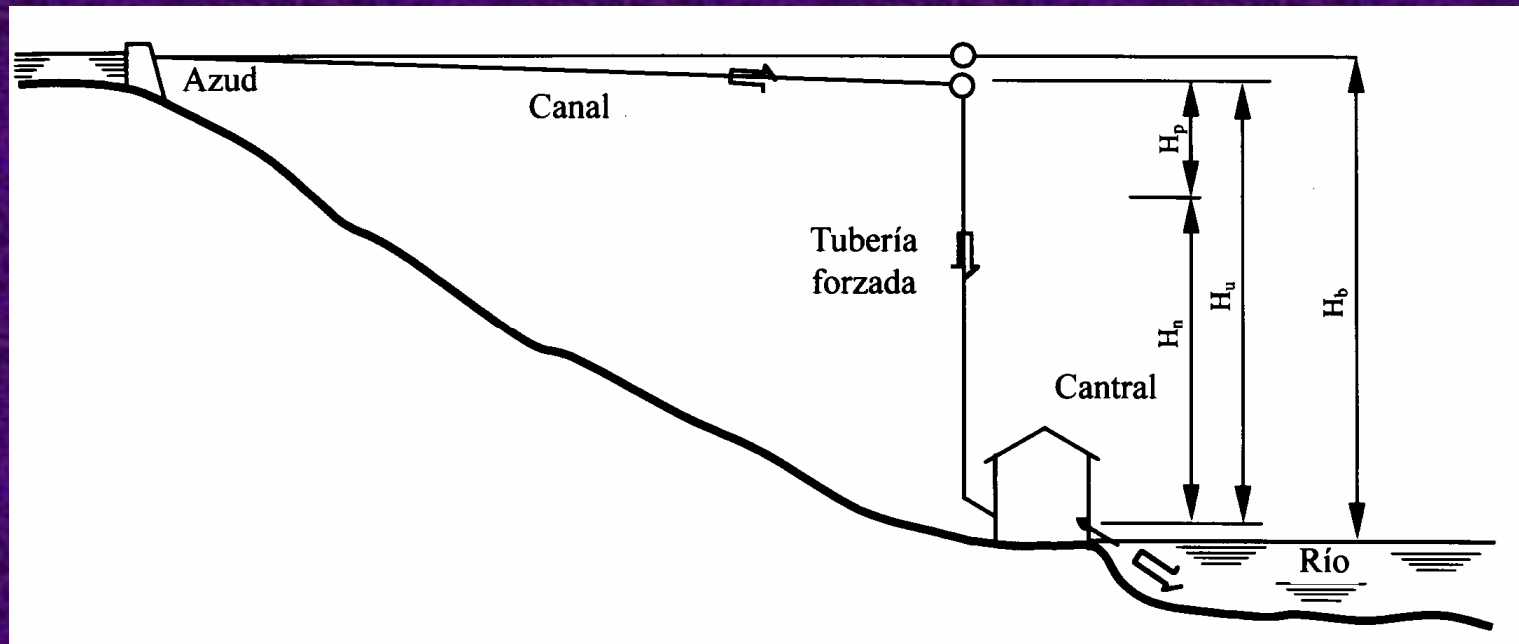
SALTO

Salto Bruto (H_b)

Salto Útil (H_u)

Pérdidas de carga (H_p)

Salto Neto (H_n) : $H_u - H_p$



SALTO

Dos opciones:

la primera, más sencilla, rápida y operativa, es considerar una pérdida de salto constante e independiente del caudal de equipamiento seleccionado;

la segunda consiste en calcular las pérdidas para cada caso (muy largo y laborioso).

En general, se considera aceptable una pérdida del orden del 4 % desde la cámara de carga, por lo que el salto neto será el 96% del salto útil

POTENCIA

$$P = 9,81 \cdot Q_e \cdot H_n \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} [kW]$$

P = Potencia útil nominal

Q_e = Caudal de equipamiento

H_n = Salto neto

η_t = Rendimiento de la turbina

η_m = Rendimiento del multiplicador

η_g = Rendimiento del generador

η_{tr} = Rendimiento del transformador

ENERGÍA ANUAL

Sin embargo, para el cálculo de la energía anual es necesario conocer la potencia media diaria generada, para ello deberá tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- El caudal mínimo técnico de la turbina: por debajo de este caudal no se produce potencia.
- La variación del rendimiento de los diversos elementos respecto al grado de carga: es necesario modelar matemáticamente el rendimiento de la turbina. El rendimiento del resto de los elementos puede considerarse constante, aunque conviene considerar la variación de rendimiento que presenta el generador.

ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO:

Partimos de los datos de caudales medios clasificados, son 365 datos de caudales ordenados de mayor a menor

A continuación modelamos matemáticamente la curva de rendimientos de la turbina en función del caudal (Excel)

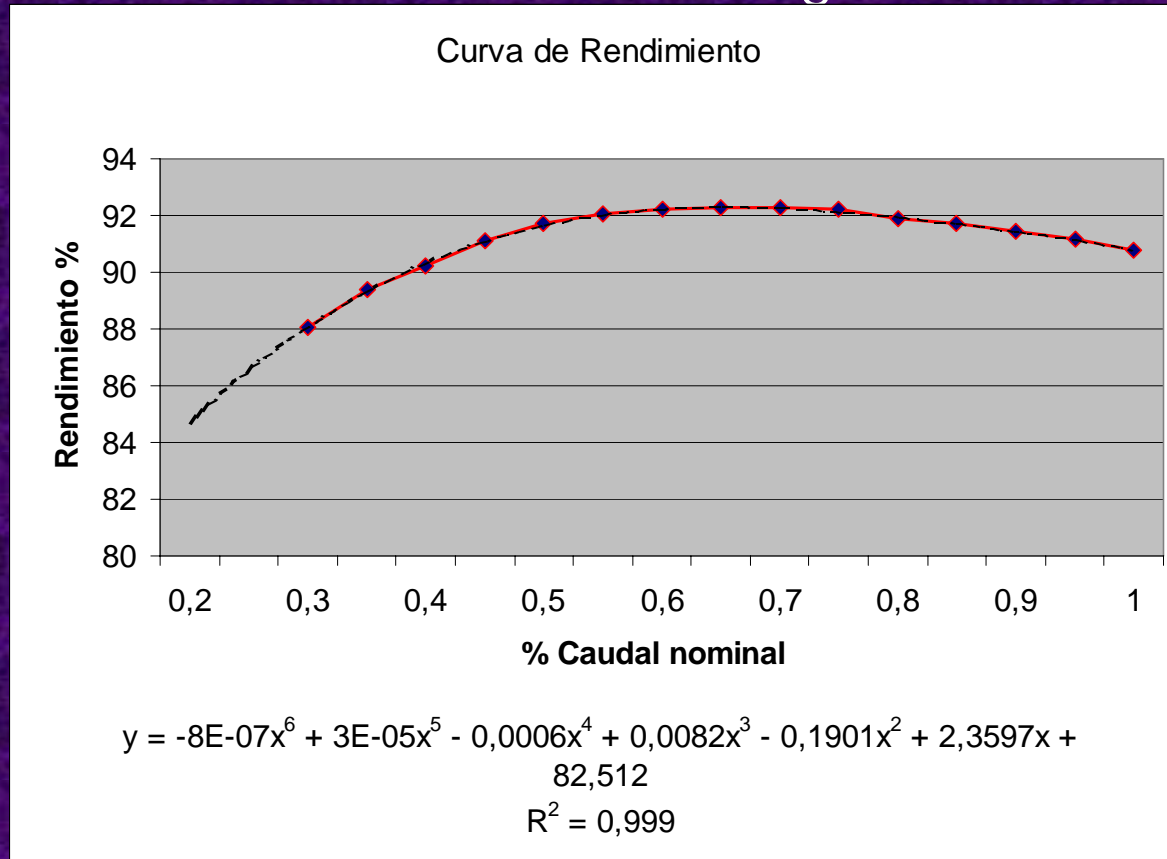
En la tabla siguiente se observa el rendimiento de una turbina semi-kaplan en función del caudal en Q/Q_1 , que según el fabricante presenta un caudal mínimo técnico del 40 %

Caudal... (Q/Q_1) α	Rendimiento- (%) α
0,40 α	90,25 α
0,45 α	91,10 α
0,50 α	91,70 α
0,55 α	92,05 α
0,60 α	92,21 α
0,65 α	92,29 α
0,70 α	92,28 α
0,75 α	92,20 α
0,80 α	91,90 α
0,85 α	91,75 α
0,90 α	91,45 α
0,95 α	91,15 α

ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO:

Utilizando *Excel*, representado la tabla y agregándole una línea de tendencia según una polinómica de sexto grado que será el rendimiento de la turbina, se obtiene el siguiente resultado gráfico:



ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO:

Para simplificar el estudio puede tomarse un rendimiento constante para el generador, de entre el 96 al 98% en caso de ser síncrono y de entre el 90 y el 92 % en caso de ser asíncrono.

El rendimiento del transformador y del multiplicador, si lo hubiere, puede tomarse entre el 99 y el 98 % para cada uno de ellos.

Hay fabricantes que incluyen el rendimiento del multiplicador junto con la turbina, e incluso quienes dan el rendimiento eléctrico directamente.

Con todo lo anterior, obtenemos la potencia media diaria para cada día del año medio.

ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO:

Una vez conocida la potencia media diaria, el cálculo de la energía diaria se obtiene multiplicando la potencia por el número de horas durante las que se obtiene dicha potencia, en nuestro caso 24h. La energía anual será la suma de la energía producida durante los 365 días del año.

En la tabla siguiente se observa un ejemplo en el que el caudal nominal es $16 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que da un mínimo técnico de $6,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Se ha considerado un rendimiento constante del 99% para el transformador y del 98 % para el generador :

ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO: En la tabla vemos que el caudal medio del día uno es 25,49 m³/s, la potencia bruta es de 1177,2 kW, para obtenerla se ha multiplicado 9,81 por el salto neto (7,5 m) y por el caudal que va a pasar por la turbina (16 m³/s), puesto que este es el caudal seleccionado como caudal de equipamiento

Día	Caudal clasificado	Potencia bruta	Caudal en tanto por uno	Rendimiento	Potencia útil media diaria	Energía diaria
1	25,49	1177,2	1,000	0,860	1012,9	24310,5
2	24,55	1177,2	1,000	0,860	1012,9	24310,5
...
36	16,03	1177,2	1,000	0,860	1012,9	24310,5
37	15,84	1165,5	0,990	0,860	1002,6	24062,7
...
223	9,98	734,0	0,624	0,853	626,0	15024,9
224	9,86	725,6	0,616	0,853	618,8	14851,1
...
343	6,41	471,3	0,400	0,848	399,7	9593,6
344	6,34	0,0	0,396	0,848	0,0	0,0
...
365	5,31	0,0	0,332	0,847	0,0	0,0

ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO: A continuación se observa que el caudal en tanto por uno es 1, en realidad es 1,59, sin embargo dado que hemos limitado el caudal a $16 \text{ m}^3/\text{s}$ en el paso anterior, significa que se turbinó el 100% del caudal permitido. En la columna siguiente se obtiene el rendimiento total de turbina, generador y transformador para el caudal turbinado.

En la sexta columna se obtiene la potencia útil media diaria a lo largo del día 1, mediante el producto de la potencia bruta por el rendimiento total.

En la séptima y última columna obtenemos la energía que se va a producir durante este día multiplicando la potencia útil por el número de horas durante las que se trabaja: 24. Esto mismo se indica en los días 2, 35 y 36.

ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO: A partir del día 37 el caudal es inferior a $16 \text{ m}^3/\text{s}$ ($15,84 \text{ m}^3/\text{s}$), por lo que el caudal en tanto por uno es ahora de 0,990. Además la potencia se reduce puesto que ésta es el producto de 9,81 por la altura y por el caudal que va a pasar a través de la turbina ($15,84 \text{ m}^3/\text{s}$) produciéndose una ligera reducción de la energía producida. Esto mismo se observa para los días 38, 223, 224, 342 y 343.

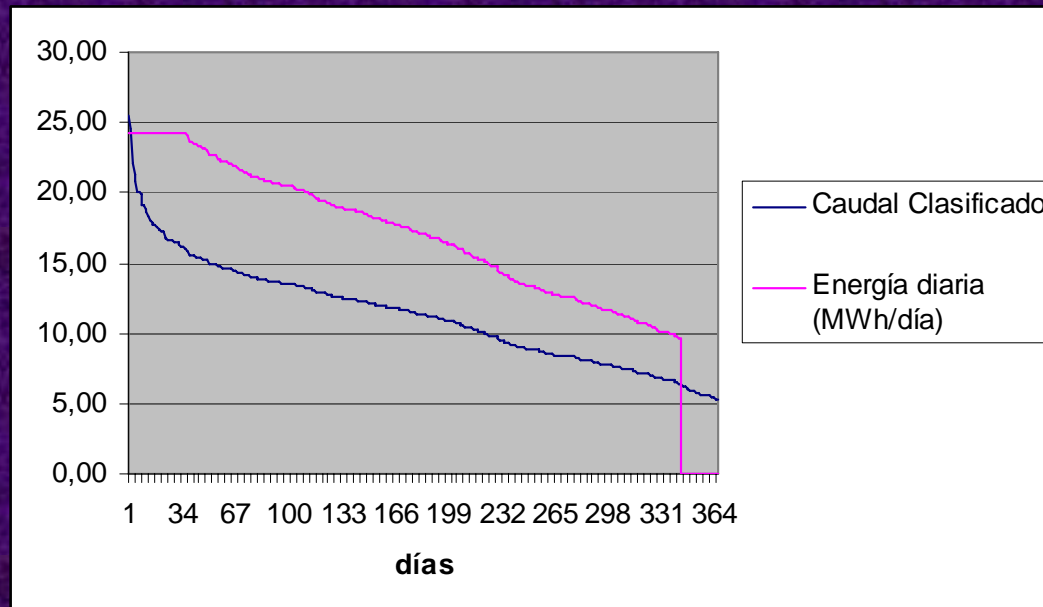
A partir del día 344 el caudal es inferior al mínimo técnico, por lo que la central debe parar haciéndolo hasta el día 365.

De esta forma obtenemos:

- La potencia bruta de la instalación es la máxima de la columna 3: 1177 kW
- La potencia útil es la máxima de la columna 6: 1013 kW
- La energía anual producida es la suma de todos los valores de la séptima columna, que en este caso da 5.927.990 kWh/año (sumando los valores no reflejados en la tabla)

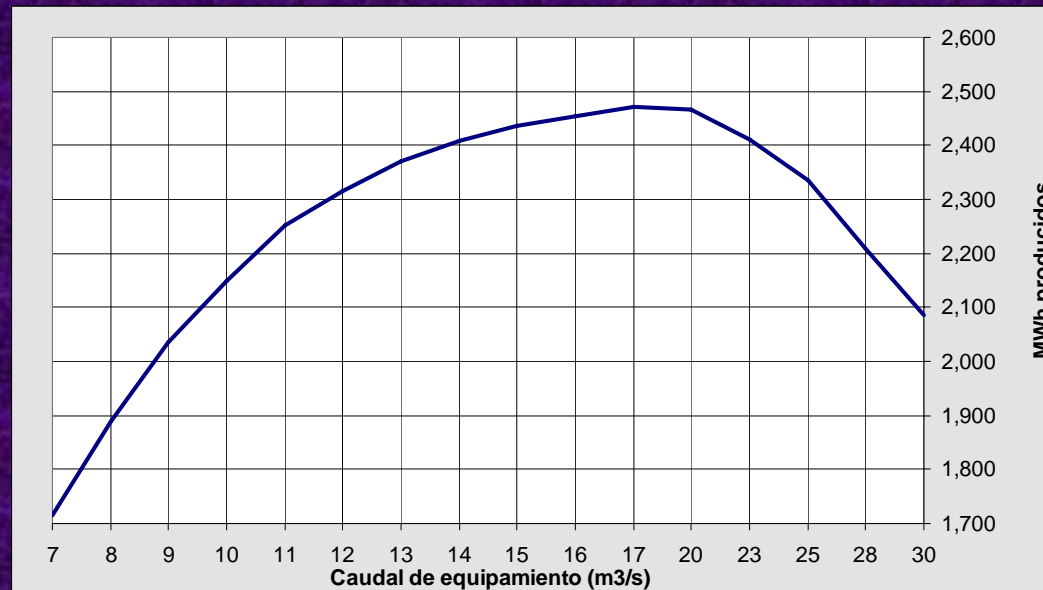
ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO: En la figura se aprecia un primer periodo de energía constante, correspondiente a los días en los que el caudal es mayor que el caudal de equipamiento (Q_e), un segundo periodo en el que la energía tiene la misma forma que la curva de caudales, en el que se turбина todo el caudal circulante, y un tercer periodo en el que el caudal es inferior al Caudal mínimo técnico (Q_{mt}), por lo que la energía producida es nula.



ENERGÍA ANUAL

EJEMPLO: Repitiendo este proceso para diferentes caudales, se obtiene una curva de energía-caudal. La energía anual producida va aumentando con el caudal de equipamiento alcanzando un máximo para 17 m³/s. Evidentemente a partir de este máximo no merece la pena seguir calculando puesto que una central de 23 m³/s produciría menos energía con un coste mayor.



ENERGÍA ANUAL

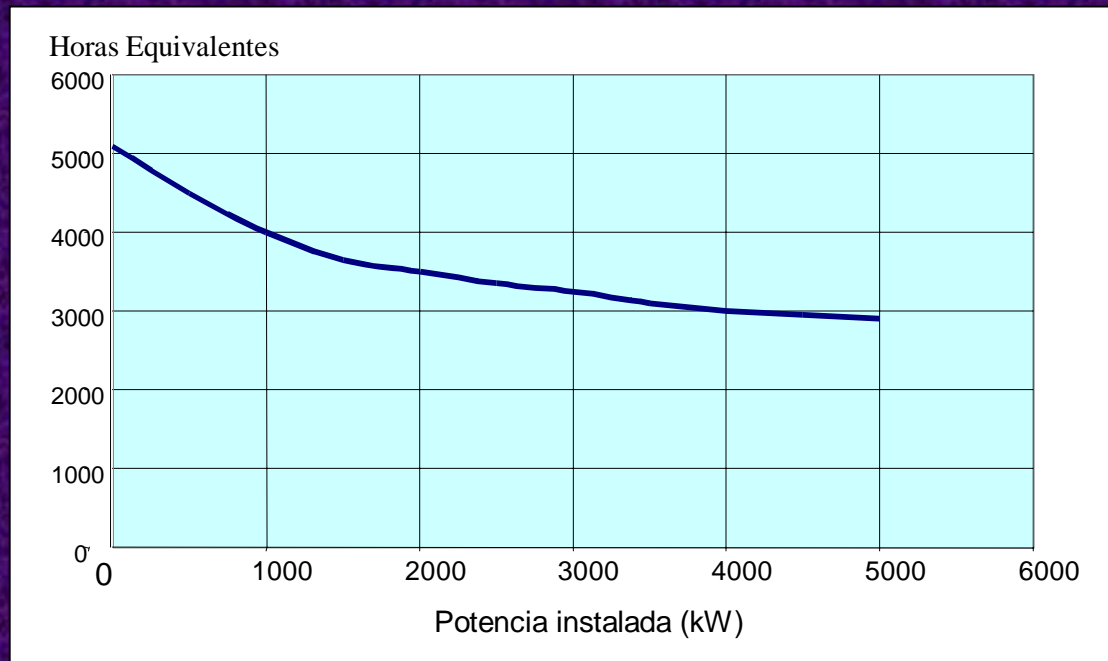
Esta evolución de la energía frente al caudal puede apreciarse también en la curva Energía-Potencia, o bien con las horas equivalentes. Las Horas Equivalentes (H_e) se obtienen de :

$H_e = \text{Energía anual generada} / \text{Potencia útil de la instalación}$

Su resultado indica el número de horas que funcionaría la central a plena potencia. Da idea del aprovechamiento de la central.

ENERGÍA ANUAL

Así, si el número de horas equivalentes es muy elevado indicaría que se puede aumentar la potencia instalada, y si por el contrario, el número de horas es bajo indicaría que la central está sobredimensionada .



ENERGÍA ANUAL

En la siguiente tabla se observan las horas equivalentes de las minicentrales españolas por comunidades autónomas en 1996

C.·Autónoma	Horas·equiv.
Galicia	3·910
Castilla-León	3·702
Cataluña	4·006
Aragón	4·563
Extremadura	2·240
Asturias	4·283
C.Valenciana	2·862
Andalucía	2·116
Castilla·la·Man.	3·290
Navarra	4·289
País·Vasco	4·473
Madrid	3·655
Cantabria	3·926

INGRESOS

Tal y como se vio en el apartado de Clasificación de las Centrales Hidroeléctricas, éstas se pueden incluir en tres grupos de acuerdo a la potencia:

- Centrales de más de 50 MW
- Centrales de entre 10 y 50 MW
- Centrales de menos de 10 MW

Las primeras tienen el mismo régimen retributivo que la centrales térmicas, sin embargo las otras dos se incluyen dentro del régimen especial del *"Real Decreto 2818/1998 sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables, residuos y cogeneración"*

INGRESOS

REAL DECRETO 2818/1998, de 23 de diciembre

Centrales Hidroeléctricas:

- Grupo b.4 $P < 10 \text{ MW}$
- Grupo b.5 $10 \text{ MW} < P < 50 \text{ MW}$

Retribución:

b4: Tarifa Regulada.

90% de TMR los 25
primeros años y el 80%
a partir de entonces

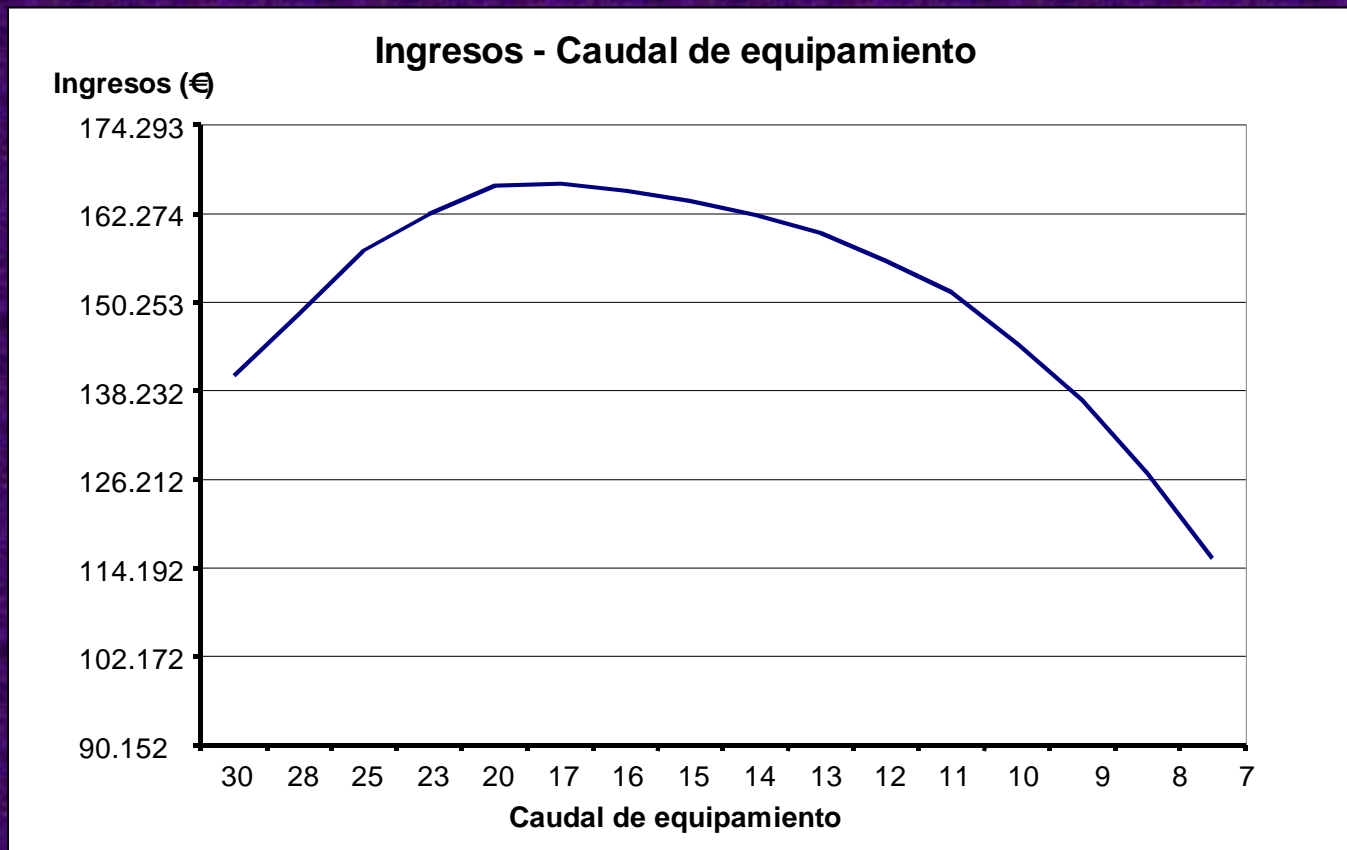


TMR: Tarifa media de
Referencia = 0.073304 €

Otra opción es ir a libre mercado

INGRESOS

A la hora de realizar el estudio económico, generalmente se aplica esta última opción por ser mucho más simple. Con los ingresos calculados para cada uno de los distintos caudales de equipamiento se obtiene la siguiente curva



COSTES DE EXPLOTACIÓN

Costes de Explotación

- Coste de personal de operación y mantenimiento
- Coste de reposición de material
- Licencias y seguros
- Consumo de energía

No existe una única regla que permita realizar una cuantificación de estos costes, así podemos encontrar casos en los que se considera que el coste anual de explotación alcanza del 3 al 5% del coste de instalación, en función del grado de automatización.

La operación y el mantenimiento de la central pueden negociarse con la compañía a la que se va a vender la producción, en general ésta se hace cargo de estos aspectos con un coste del orden del 10% de la producción, aunque, por supuesto, es negociable.

COSTES DE EXPLOTACIÓN

Costes de Explotación

- El vicepresidente de la ESHA, R. Miller, da como resultado de un trabajo en el que se valoraban los costes de instalación, explotación y mantenimiento de minicentrales hidroeléctricas en la Unión Europea, que aparece publicado el "Manual de la pequeña hidráulica", la siguiente valoración de costes en euros (€) :
- Seguros: $335 \cdot P^{1/2}$ instalada
- Impuestos locales $110 \cdot P^{1/2}$ instalada
- Auditoría $275 \cdot P^{1/2}$ instalada
- Ingeniería y supervisión $500 \cdot P^{1/2}$ instalada
- Administración y contabilidad $1595 \cdot P^{1/2}$ instalada
- Reparaciones, mantenimiento $600 \cdot P^{1/2}$ instalada

P instalada en kW

COSTES DE INSTALACIÓN

Costes de Instalación

Depende fundamentalmente de:

Caudal y la altura del salto
Potencia instalada.

Fuertemente influenciados por :

- Topografía.
- Tipo de central : agua fluyente , embalse.
- Distancia a la toma de agua.
- Instalación nueva o rehabilitación.....

COSTES DE INSTALACIÓN

Costes de Instalación

Determinación de costes €/kW

Tablas

POTENCIA INSTALADA (kW)	SALTO ÚTIL		
	60-20 m.	12-10 m.	5-3 m.
250	1292,20	1616,70	1941,30
500	1057,80	1322,20	1586,70
750	871,50	1087,80	1298,20
1.000	781,30	973,60	1166,00
1.500	649,10	811,40	979,60
2.000	589,00	739,20	883,50
2.500	510,90	643,10	769,30

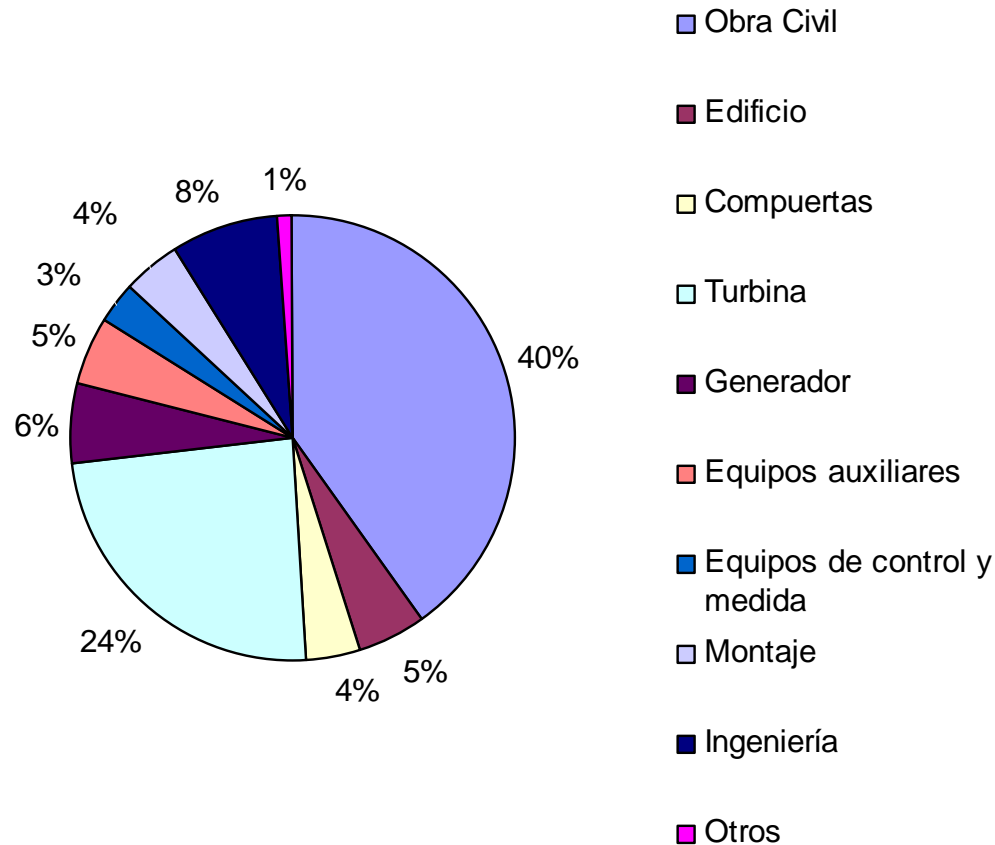
Curvas

Fórmulas
empíricas

COSTES DE INSTALACIÓN

Costes de Instalación

Reparto de costes



COSTES DE INSTALACIÓN

Costes de Instalación

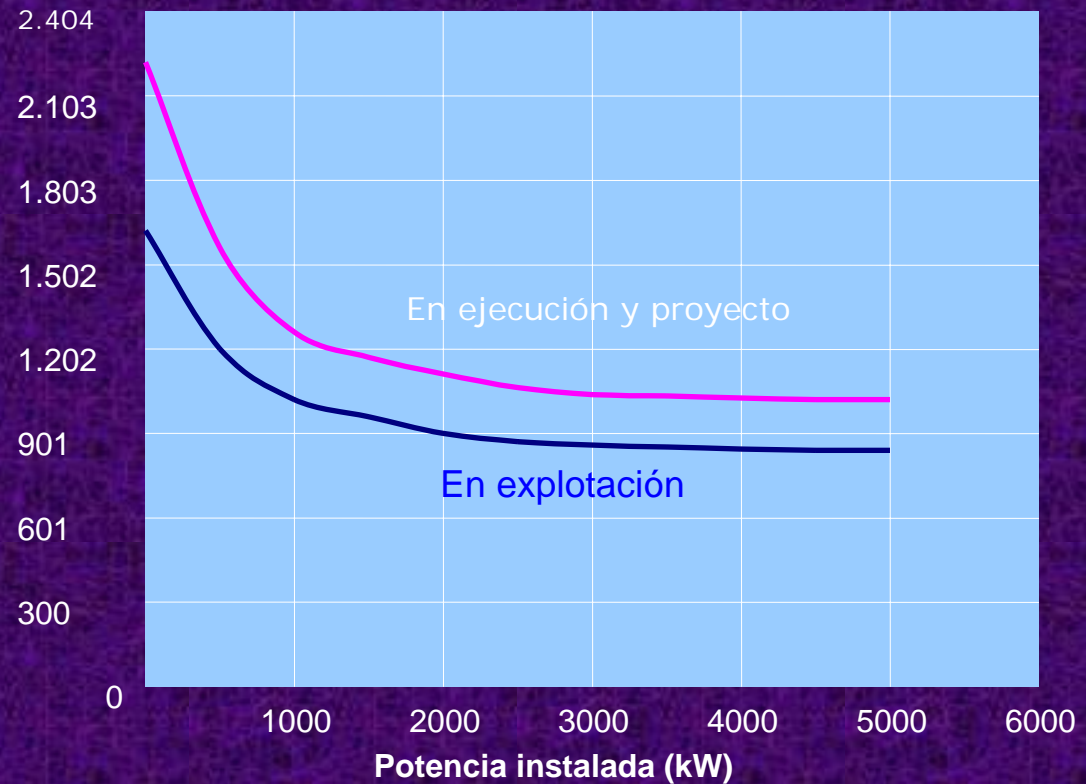
Determinación de costes

Tablas

Curvas

Fórmulas empíricas

Coste en €/kW instalado



COSTES DE INSTALACIÓN

Costes de Instalación: Existen otros estudios, como el realizado por R. Miller, (vicepresidente de la ESHA), que aparece publicado el "*Manual de la pequeña hidráulica*", según el cual el coste de la inversión se calcula de la siguiente tabla:

Potencia · (kW) ⌘	Coste · (en · €) ⌘
P > 200 ⌘	200 ··· 2250 · + · resto ··· 2250 ··· 0,548165 ⌘
P > 250 ⌘	250 ··· 2050 · + · resto ··· 2050 ··· 0.824336 ⌘
P > 500 ⌘	500 ··· 1870 · + · resto ··· 1870 ··· 0,817034 ⌘
P > 1000 ⌘	1000 ··· 1700 · + · resto ··· 1700 ··· 0.765111 ⌘
P > 2000 ⌘	2000 ··· 1500 · + · resto ··· 1500 ··· 0.777918 ⌘
10000 > P > 5000 ⌘	5000 ··· 1300 · + · resto ··· 1300 ··· 0,661133 ⌘

COSTES DE INSTALACIÓN

Así, una central de 500 kW tendrá un costes de 1.870 €/kW, haciendo un total de 935.000 €. El coste es bastante más elevado que el dado por el IDAE o por el MOPU, pero hay que tener en cuenta que el estudio del Dr. R. Miller se realizó para el conjunto de la Unión Europea.

Si la central fuera de 650 kW, su coste se calcularía de la siguiente forma: $500 \times 1870 + 150 \cdot 1870 \cdot 0,817034 = 1.164.178$ €, lo que da 1.791 €/kW.

COSTES DE INSTALACIÓN

Se pueden encontrar el coste de los siguientes elementos: (VER ANEXO)

- Azud de derivación
- Tomas, incluidas rejilla y compuertas
- Canal de derivación
- Cámara de carga
- Tubería forzada
- Edificio de central y canal de descarga
- Turbina
- Generador
- Transformador
- Sistema eléctrico general y automatización
- Línea eléctrica
- Accesos
- Ingeniería y dirección de obra.

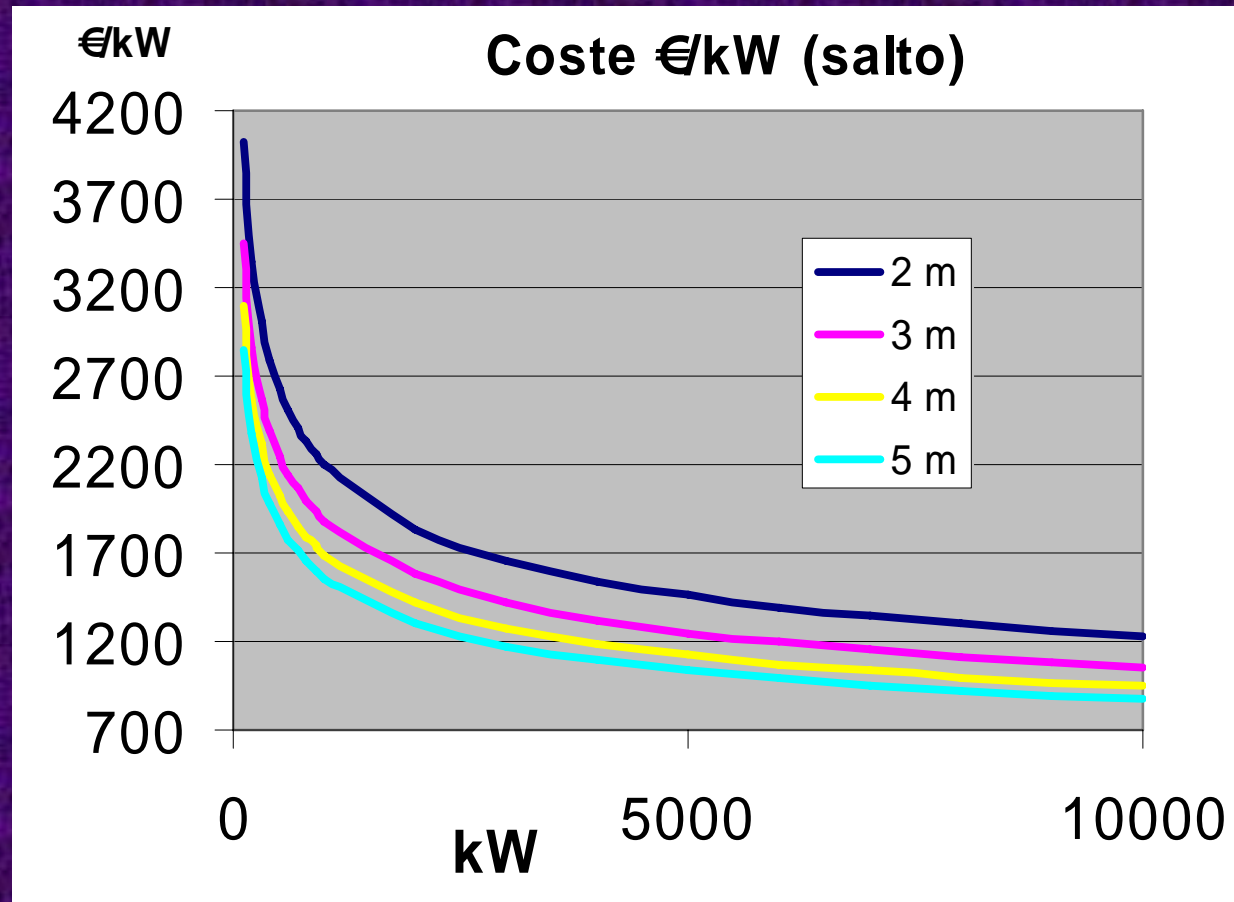
COSTES

Costes de Instalación

Tablas

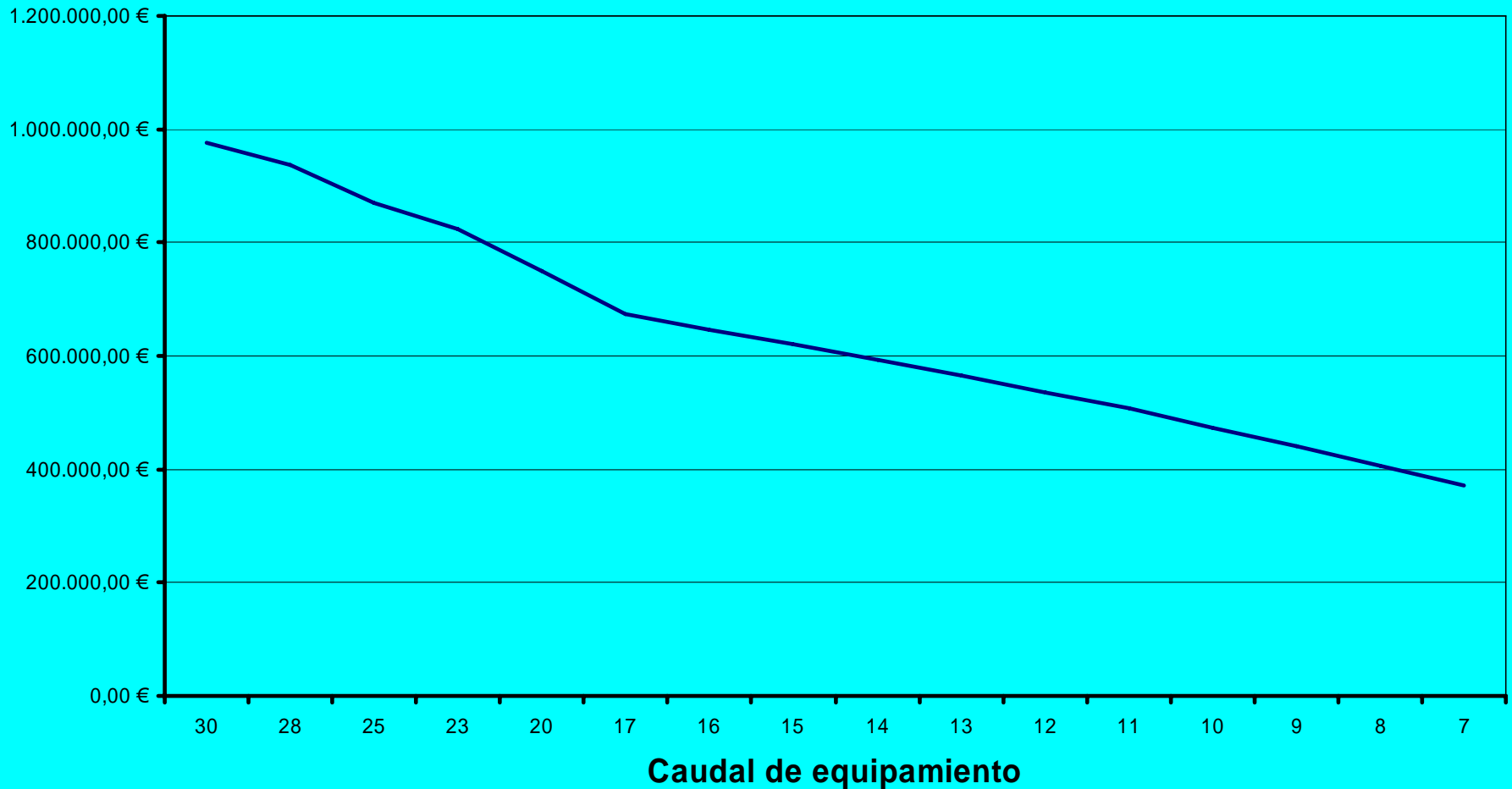
Curvas

Fórmulas empíricas



COSTES

Coste- Caudal de equipamiento



COSTES

Costes de Instalación

Ejecución Material

+ 13 % Gastos generales

+ 6 % Beneficio Industrial

+ 16 % IVA

Total Ejecución Material

Proyecto

3 % Ejecución Material

16 % IVA

Total Proyecto

Dirección de Obra

3 - 4 % Ejecución Material

16 % IVA

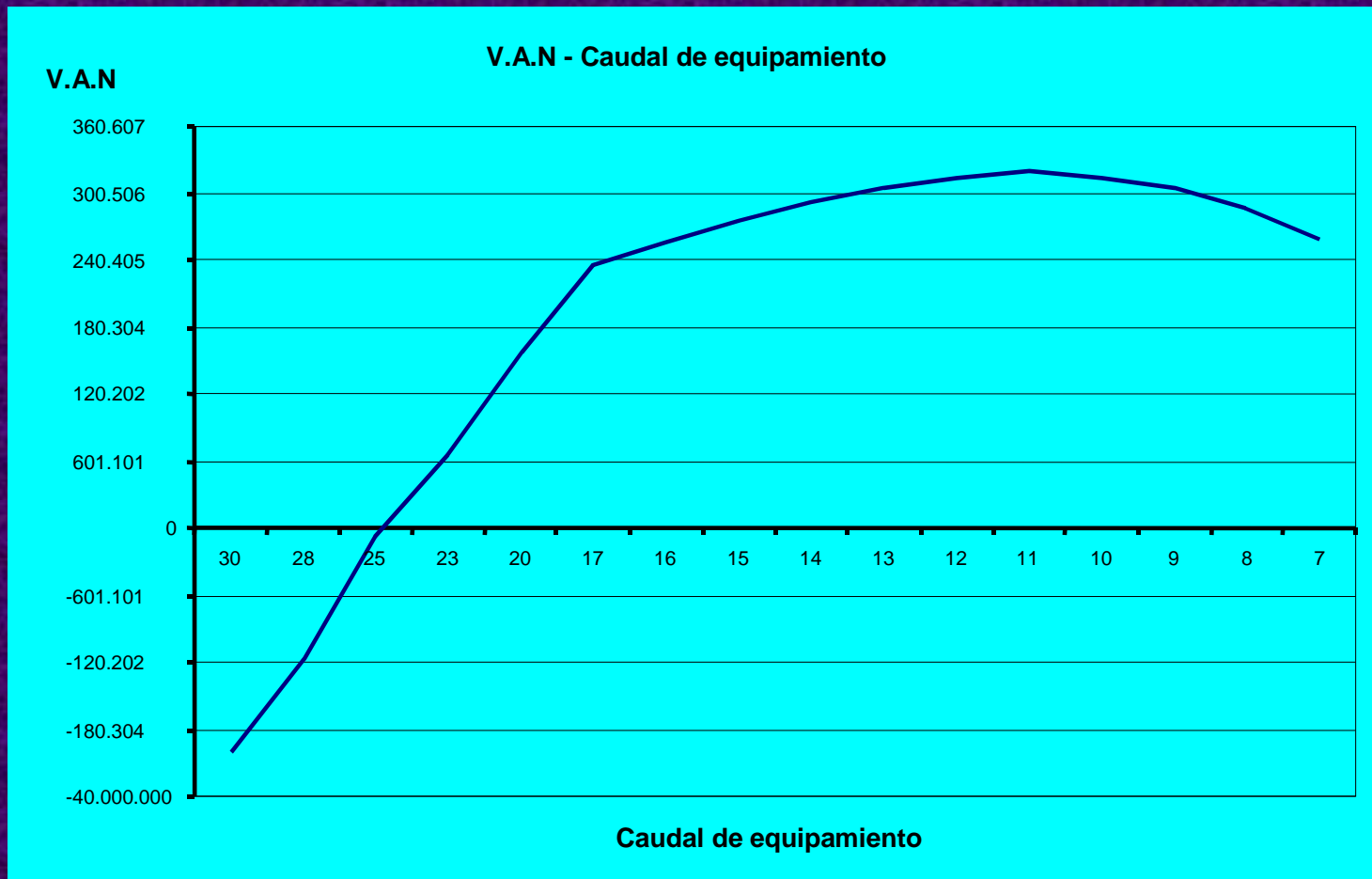
Total Dirección Obra



COSTE TOTAL DEL PROYECTO

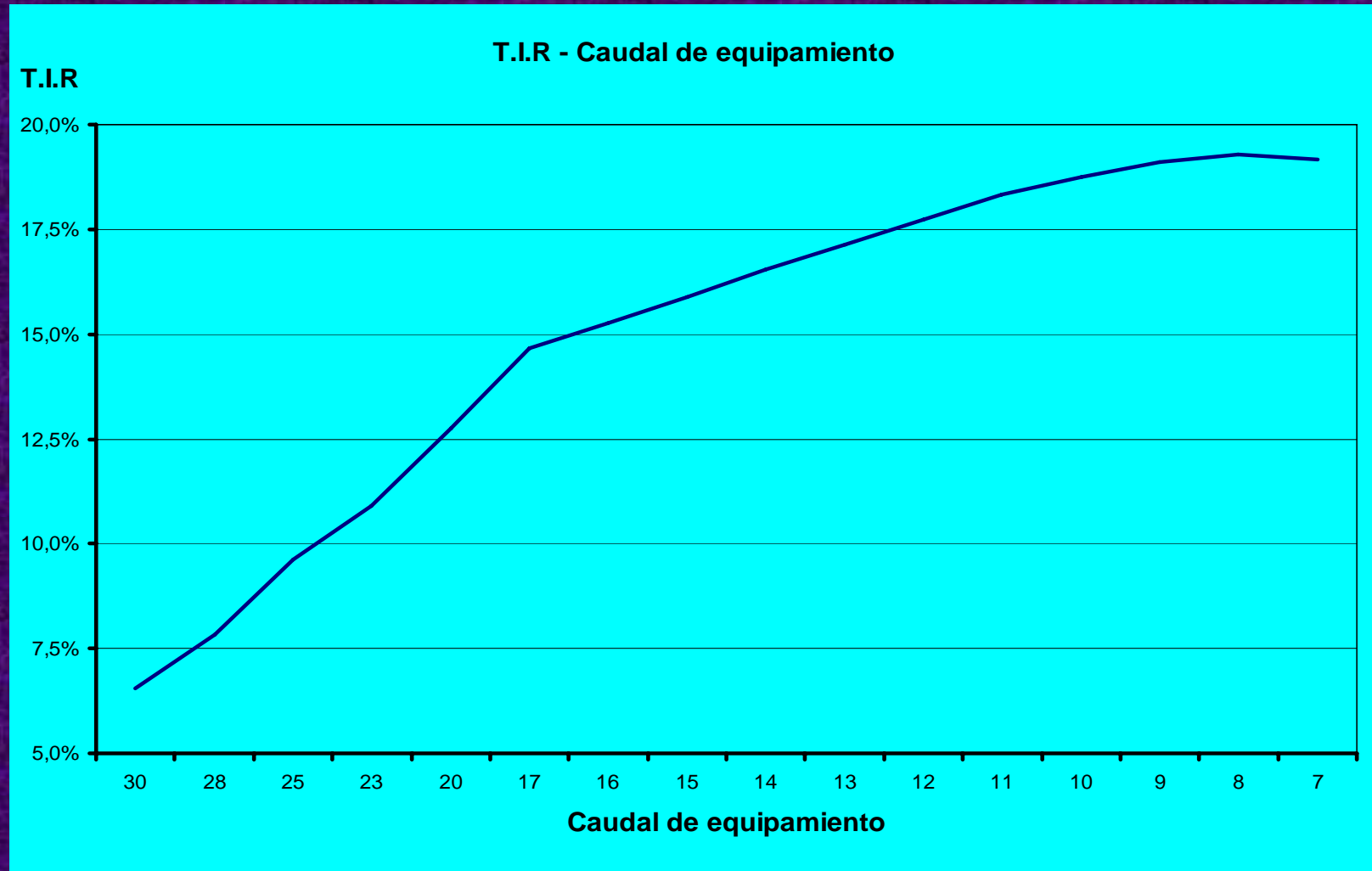
V.A.N - T.I.R

Como se ve, a pesar de que la máxima energía y, por tanto los máximos ingresos se obtenían con un caudal de 17 m³/s, el máximo VAN se obtiene para un caudal de 11 m³/s.



V.A.N - T.I.R

Como se aprecia en el ejemplo, el máximo TIR se obtiene para un caudal de equipamiento de 8 m³/s



DECISIÓN

Conocidos el VAN y el TIR de los distintos caudales de equipamiento, hay que decidir cual de ellos es la mejor inversión

- Si hay un caudal para el que el VAN y el TIR son los máximos, este es el mejor.
- Si un caudal da el máximo VAN y otro el máximo TIR se realiza un:

ANÁLISIS INCREMENTAL EN BASE AL T.I.R.

DECISIÓN

Este método permite elegir el caudal que mayor rentabilidad aporta entre el de máximo VAN y el de máximo TIR, suponiendo que se dispone de los fondos necesarios para realizar la inversión. Para realizarlo hay que calcular la diferencia de los flujos netos de caja actualizados de los dos casos que se analice y calcular el TIR de la diferencia.

A modo de ejemplo, en las curvas anteriormente presentadas el máximo VAN se obtenía para un caudal de $11 \text{ m}^3/\text{s}$, en tanto que el máximo TIR se ha obtenido para un caudal de $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Evidentemente la rentabilidad máxima la aporta el caso de $8 \text{ m}^3/\text{s}$, supongamos que el caso de $11 \text{ m}^3/\text{s}$, cuyo TIR es del 18 % tenga un coste de 980.000 €, en tanto que el caso de $8 \text{ m}^3/\text{s}$, con un TIR del 19 % tiene un coste de instalación de 710.000 €, la duda que se plantea es la siguiente: ¿qué es preferible, invertir 980.000 € al 18 % ó 710.000 € al 19%?

DECISIÓN

Aquí es donde el método antes indicado nos da la solución. El resultado es un valor de TIR cuya interpretación es la siguiente: Supongamos que en el caso analizado el TIR de la diferencia hubiera sido del 10 %, esto significaría que invertir los 980.000 € del caso de 11 m³/s al 18% equivale a invertir los 710.000 € del segundo caso al 19 % y la diferencia de 980.000-710.000= 270.000 € al 10 %. Por lo tanto, si se dispone de la posibilidad de invertir los 270.000 € a un interés superior al 10 % es preferible inclinarse por el caso de 8 m³/s, en caso contrario es preferible realizar la central de 11 m³/s.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

- Considerar un período inicial de años secos: es decir, tomar el peor de los años de caudales de los que se dispone y considerar que éste puede reproducirse durante un periodo de entre tres a cinco años, según sea el emplazamiento.
- Considerar un incremento de los impuestos.
- Considerar un aumento de los intereses, en caso de solicitar un préstamo
- Considerar un aumento del coste de la instalación
 - Considerar un descenso en el precio de la energía

CAMINO A RECORRER

- **Localización del aprovechamiento**
- **Estudios de viabilidad técnica y económica**
- **Proyecto de concesión**
- **Solicitud de la concesión**
- **Proyecto y análisis de impacto ambiental**
- **Concesión administrativa**
- **Proyecto de detalle**
- **Especificaciones técnicas para la obra y equipamiento**
- **Solicitud de ofertas**
- **Comparación de ofertas**

NORMATIVA ASOCIADA

- **UNE – EN 61116:97** Guía para el equipamiento electromecánico de pequeños aprovechamientos hidroeléctricos.
- **UNE 20168:85** Guía para la recepción, explotación y mantenimiento de las turbinas hidráulicas.
- **UNE-EN 60041:98** Ensayos de recepción en central de las turbinas hidráulicas, bombas de acumulación y turbinas-bombas, para determinar sus prestaciones hidráulicas.
- **UNE 206002 – 1 IN:99** Turbinas hidráulicas, bombas de acumulación y turbinas–bombas. Documentación de petición de ofertas. Parte 1: General y anexos.
- **UNE-EN 61362:99** Guía para la especificación de los sistemas de regulación de las turbinas hidráulicas.
- **UNE-EN 61364** Nomenclatura de la maquinaria de los aprovechamientos hidroeléctricos