



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

Alumno: María del Pilar Rodríguez Moreno

Tutor: Prof. D. Blas Ogayar Fernández
Dpto: Ingeniería Eléctrica

septiembre, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería eléctrica

Don Blas Ogayar Fernandez , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: diseño de una herramienta para el dimensionado de obra civil en centrales minihidráulicas, que presenta María Del Pilar Rodríguez Moreno, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, septiembre de 2023

El alumno:

El tutor:

María Del Pilar Rodríguez Moreno

Blas Ogayar Fernández

RESUMEN

En las últimas décadas se ha ido desarrollando cada vez más las energías renovables. En concreto, la energía minihidráulica cuenta con grandes ventajas al aprovechar el uso de una tecnología muy conocida y tener escaso impacto ambiental, costes de inversión no muy elevados y costes bajos de explotación. Por este motivo se encuentra ante una oportunidad de desarrollo única.

Este trabajo abarca el estudio del diseño y explicación de una herramienta excel para el dimensionamiento de obra civil en centrales minihidráulicas, También llamadas minicentrales hidroeléctricas.

Se ha diseñado una herramienta para poder diseñar desde cero una central minihidráulica.

Comenzando con una introducción en la que se tratan los antecedentes, historia, estado del arte y objetivos del proyecto. Se explican los elementos y Se explican los tipos de turbinas y métodos de selección. Por último Todo esto se pone en práctica en la herramienta, la cual nos permite evaluar todos los elementos de obra civil de las minicentrales hidroeléctricas y su correcto dimensionado.

ABSTRACT

In recent decades, renewable energy has been increasingly developed. Specifically, mini-hydro power has great advantages by taking advantage of the use of a well-known technology and having little environmental impact, not very high investment costs and low operating costs. For this reason, it is facing a unique development opportunity.

This work covers the study of the design and explanation of an Excel tool for the sizing of civil works in mini-hydraulic plants, also called mini-hydroelectric plants.

A tool has been designed to be able to design a mini-hydraulic plant from scratch.

Starting with an introduction that covers the background, history, state of the art and objectives of the project. The elements are explained and the types of turbines and selection methods are explained. Finally, all of this is put into practice in the tool, which allows us to evaluate all the civil works elements of the mini hydroelectric plants and their correct sizing.

Índice

1. Introducción.....	10
1.1. Objetivos	10
1.2. Antecedentes	10
1.2.1. Energía minihidráulica.....	12
1.2.1.1. Contexto mundial	12
1.2.1.2. A nivel Europeo	12
1.2.1.3. A nivel nacional, España	13
1.2.1.4. A nivel autonómico, Andalucía	13
1.2.1.5. A nivel provincial, Jaén	13
2. Tipología de minicentrales.....	14
2.1. Agua fluyente	14
2.1.1. Alta presión	15
2.1.2. Media presión	15
2.1.3. Baja presión	15
2.2. Agua embalsada	15
2.3. Canal de riego.....	15
2.4. Conducciones	15
2.5. En estaciones de tratamiento de aguas residuales	16
3. Elementos de obra civil que integra una minicentral hidroeléctrica.....	16
3.1. Azudes y presas.....	17
3.1.1. Presas de fábrica	18
3.1.1.2. Presas de arco	19
3.1.1.3. Presas aligeradas o de contrafuertes	21
3.1.2. Presas de materiales sueltos	21
3.1.2.1. Presas homogéneas	21
3.1.2.2. Presas de núcleo	22
3.1.2.3. Presas de pantalla	23
3.1.3. Tipos de azudes.....	23
3.1.3.1. Escollera	24
3.1.3.2. Estacada	24
3.1.3.3. Tablas de madera	24

3.1.3.4.	Azudes de mampostería	25
3.1.3.5.	Azudes de cantería	25
3.1.3.6.	Azudes de gaviones	25
3.1.3.7.	Azudes de hormigón armado	26
3.1.3.8.	Azudes de hormigón	26
3.2.	Desarenador	27
3.2.1.	Tipología de desarenadores	27
3.2.1.1.	Según su operación	27
3.2.1.2.	Según su velocidad	27
3.2.1.3.	Según su disposición	27
3.2.2.	Partes de un desarenador	28
3.3.	Toma	29
3.3.1.	Tipología de tomas	29
3.4.	Canal de derivación	31
3.4.1.	Tipología de canales	31
3.4.1.1.	Canales abiertos	31
3.4.1.2.	Canales cerrados	33
3.5.	Cámara de carga	33
3.6.	Tubería forzada	33
3.6.1.	Tipología de tubería forzada	34
3.7.	Rejas y limpiarrejas	35
3.7.1.	Partes de un limpiarrejas	35
3.7.1.1.	Bastidor	35
3.7.1.2.	Peine	35
3.7.1.3.	Accionamiento	35
3.7.1.4.	Cinta transportadora	35
3.7.1.5.	Cuadro eléctrico	36
3.7.2.	Tipología de limpiarrejas	36
3.7.2.1.	Limpiarrejas articulados	36
3.7.2.2.	Limpiarrejas telescópicos	37
3.7.2.3.	Limpiarrejas de cadenas	37
3.8.	Canal de desagüe	38
3.9.	Compuertas	38
3.9.1.	Aliviaderos de superficie	39
3.9.2.	Desagües de fondo o medio fondo	39

3.10.	Edificio.....	39
4.	Herramienta	40
4.1.	Descripción	40
4.2.	Utilización de la herramienta	40
4.2.1.	Datos principales.....	40
4.2.1.1.	Caudal de diseño	40
4.2.1.2.	Salto bruto	41
4.2.2.	Presa-azud.....	41
4.2.3.	Toma.....	42
4.2.3.1.	Pendiente del cauce	42
4.2.3.2.	Planta del cauce	42
4.2.4.	Desarenador	42
4.2.5.	Canal de derivación	47
4.2.5.1.	Superficie de la sección transversal	48
4.2.5.2.	Perímetro mojado	49
4.2.5.3.	Radio hidráulico	50
4.2.5.4.	Anchura de la parte superior	51
4.2.5.5.	Altura mínima del canal de derivación	52
4.2.5.6.	Gradiente hidráulico y pérdidas de carga	53
4.2.6.	Tubería forzada.....	54
4.2.6.1.	Salto útil	55
4.2.6.2.	Diámetro de la tubería	56
4.2.6.3.	Velocidad de flujo	56
4.2.6.4.	Espesor mínimo de la tubería	57
4.2.7.	Cámara de carga	58
4.2.7.1.	Aliviadero	60
4.2.8.	Rejas.....	61
4.2.8.1.	Tipo de turbina	62
4.2.8.2.	Dimensionamiento de las barras y pérdidas de carga	65
4.2.9.	Compuertas	69
4.2.9.1.	Pérdidas de carga	70
4.2.10.	Resumen.....	71
5.	Cálculo del dimensionado de la obra civil de una central minihidráulica	71
5.1.	Datos principales.....	72
5.2.	Presa-azud	73

5.3. Toma	74
5.4. Desarenador	75
5.5. Canal de derivación	76
5.6. Tubería forzada	77
5.7. Cámara de carga	78
5.8. Rejas	79
5.9. Compuertas	80
5.10. Resumen	80
6. Conclusiones.....	83
7. Bibliografía	84

Ilustración 1: Objetivo Pacto Verde Europeo	11
Ilustración 2: Estructura de generación de energía en 2023	13
Ilustración 3: Azud de la Cerrada de Utrero	17
Ilustración 4: Presa la Almendra (Salamanca)	18
Ilustración 5: Presa de gravedad	19
Ilustración 6: Actuación de las fuerzas en presa de gravedad	19
Ilustración 7: Actuación de las fuerzas en presa de arco	19
Ilustración 8: Presa de arco	20
Ilustración 9: Presa de contrafuertes	21
Ilustración 10: Actuación de las fuerzas en presas de materiales sueltos	21
Ilustración 11: Sección tipo de una presa homogénea de materiales sueltos	22
Ilustración 12: Sección tipo de una presa de materiales sueltos con núcleo impermeable ...	22
Ilustración 13: Sección tipo de una presa de materiales sueltos con pantalla impermeable .	23
Ilustración 14: Azud tipo escollera	24
Ilustración 15: Azud tipo estacada	24
Ilustración 16: Azud elaborado con tablas de madera	25
Ilustración 17: Azud de mampostería	25
Ilustración 18: Azud de cantería	25
Ilustración 19: Azud de gaviones	26
Ilustración 20: Azud de hormigón armado	26
Ilustración 21: Azud de hormigón	26
Ilustración 22: Partes de un desarenador	29
Ilustración 23: Toma lateral	29
Ilustración 24: Toma frontal	30
Ilustración 25: Toma tirolesa	30
Ilustración 26: Canal de derivación tipo abierto	31
Ilustración 27: Canal de derivación tipo cerrado	31
Ilustración 28: Canal abierto de tierra simple	32
Ilustración 29: Canal abierto de roca o piedra	32
Ilustración 30: Canal abierto de mampostería húmeda	32
Ilustración 31: Canal abierto de hormigón	32
Ilustración 32: Cámara de carga	33
Ilustración 33: Tubería forzada en Sierra de Cazorla	34
Ilustración 34: Rejas	35
Ilustración 35: Limpiarrejas articulado	37
Ilustración 36: Limpiarrejas telescópico	37
Ilustración 37: Limpiarrejas de cadenas	38
Ilustración 38: Canal de desagüe	38
Ilustración 39: Leyenda de la herramienta Excel	40
Ilustración 40: Esquema de un desarenador	47
Ilustración 41: Tipología de canal	51
Ilustración 42: Cámara de carga	58
Ilustración 43: Tipos de turbina en función del caudal y salto	63
Ilustración 44: Tipos de turbina en función de la velocidad y la altura	64
Ilustración 45: Tipo de turbina en función del caudal y el rendimiento	65

Ilustración 46: Barras de las rejas	69
Ilustración 47: Compuertas.....	69
Ilustración 48: Dimensionamiento del desarenador	75
Ilustración 49: Dimensionamiento de la tubería forzada	77
Ilustración 50: Dimensionamiento de la cámara de carga.....	78
Ilustración 51: Dimensionamiento de las rejas.....	79
Ilustración 52: Dimensionamiento de las compuertas.....	80
Ilustración 53: Resumen general	80

Tabla 1: Selección de presa o azud	41
Tabla 2: Selección tipo de toma	42
Tabla 3: Diámetro de la partícula en función del salto bruto	43
Tabla 4 : Dimensiones mínimas y recomendadas del desarenador.....	43
Tabla 5: Diámetro máximo de las partículas en función del salto bruto	44
Tabla 6: Valores de la velocidad de sedimentación según el valor de k_p	44
Tabla 7: Valor del parámetro k_e en función del diámetro de las partículas	45
Tabla 8: Coeficiente de Manning de los materiales	48
Tabla 9: Coeficiente de Manning para materiales de tubería forzada	55
Tabla 10: Módulo de Young de materiales para la tubería forzada.....	55
Tabla 11: Máxima carga de tracción admisible de materiales para la tubería forzada	55
Tabla 12: Parámetro k' en función de su soldadura.....	57
Tabla 13: Coeficiente de descarga según la tipología del aliviadero.....	61
Tabla 14: Separación entre barras en función de la turbina.....	62
Tabla 15: Tipo de turbina en función del salto	62
Tabla 16: Tipo de turbina en función de su rendimiento	64
Tabla 17: Coeficiente de Strouhal para el tipo de barra.....	65
Tabla 18: Coeficiente de seguridad para mejorar el coeficiente de Strouhal.....	66
Tabla 19: Coeficiente de pérdidas	67
Tabla 20: coeficiente según el ángulo de la reja con el sentido del flujo	68
Tabla 21: Coeficiente K_v para compuertas rectangulares.....	69
Tabla 22: Coeficiente K_v para compuertas circulares.....	70
Tabla 23: Coeficiente K_v para otro tipo de válvulas	70
Tabla 24: Datos principales de la central minihidráulica	72
Tabla 25: Cálculo de la presa o azud de la Central	73
Tabla 26: Datos de la toma de la central	74
Tabla 30: Dimensionamiento del canal de derivación.....	76

Ecuación 1: Parámetro k_p	44
Ecuación 2: Velocidad de arrastre	45
Ecuación 3: ancho mínimo del desarenador	46
Ecuación 4: Tiempo de sedimentación	46
Ecuación 5: Longitud mínima del desarenador (2).....	46
Ecuación 6: Ancho del canal de derivación	47
Ecuación 7: Superficie de sección transversal.....	48
Ecuación 8: Perímetro mojado	49
Ecuación 9: Radio hidráulico	50
Ecuación 10: Anchura de la parte superior	51
Ecuación 12: Parámetro de aspecto.....	52
Ecuación 13: Coeficiente de forma k	52
Ecuación 14: Coeficiente dinámico.....	52
Ecuación 15: Altura mínima del canal de derivación.....	53
Ecuación 16: Gradiente hidráulico	53
Ecuación 17: Pérdidas de carga en el canal.....	54
Ecuación 18: Salto útil	55
Ecuación 19: Diámetro de la tubería.....	56
Ecuación 20: Velocidad de flujo.....	57
Ecuación 21: espesor de la tubería	57
Ecuación 22: Longitud de la cámara de carga.....	60
Ecuación 23: Longitud del aliviadero	61
Ecuación 24: Frecuencia inducida.....	66
Ecuación 25: Frecuencia estructural de la barra.....	66
Ecuación 26: Pérdidas de carga en las rejas.....	68
Ecuación 27: Pérdidas de carga de las compuertas	70
Ecuación 28: Pérdidas de carga totales en la compuerta	70

1. Introducción

1.1. Objetivos

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de una herramienta Excel para el dimensionado de obra civil en centrales minihidráulicas, con ello se pretende renovar, actualizar y desarrollar una herramienta que facilite el cálculo y diseño de los distintos elementos de obra civil que integra una central hidroeléctrica.

Con este proyecto se visualizará el estudio de viabilidad previo a la realización del proyecto de ejecución tanto rehabilitación como nueva construcción de una minicentral.

Más adelante describiré los elementos de la obra civil de una minicentral junto a sus ecuaciones.

Además, analizaremos un caso concreto.

1.2. Antecedentes

Debido al desarrollo de las ciudades cada vez aumentamos la necesidad del consumo energético. Actualmente a nivel mundial el más utilizado es el que se genera a partir de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón). Sin embargo, son recursos limitados ya que se encuentran en puntos concretos de la Tierra, su utilización tiene graves efectos en el medio ambiente y salud de las personas. Además, se están agotando las reservas naturales.

Cada vez somos más conscientes de proteger el medio ambiente y usar tratamientos para producir energías no contaminantes.

La energía no contaminable, limpia, renovable es usada desde hace miles de años por sus buenas características:

- Es inagotable
- Se puede almacenar

- Bajo impacto ambiental

Se ha confirmado una subida de temperatura de 1.1°C en los últimos 50 años aproximadamente, un aumento de desastres naturales (huracanes, sequías, lluvias torrenciales...) y un descenso del hielo ártico debido al cambio climático.

Todos estos sucesos han hecho que en los últimos 30 años se hayan firmado una serie de compromisos internacionales apostando por un futuro sostenible:

- Cumbre de las Naciones Unidas de Río de Janeiro (1992) –donde surgió el plan de acción Agenda 21– y de Johannesburgo (2002).
- Protocolo de Kioto, adoptado en la Convención Marco del Cambio Climático de las Naciones Unidas de 1997 y ratificado en febrero de 2005.
- Declaración del Milenio (2000)
- Plan de acción de la Conferencia de Bonn sobre Energías Renovables de junio de 2004.

Actualmente la ley Europa de Clima establece un objetivo como Pacto Verde Europeo y es la reducción las emisiones de gases de efecto invernadero al menos un 55% para 2030 y lograr la neutralidad climática es decir compensar toda emisión residual con una cantidad que equivale a la eliminación de dióxido de carbono para 2050.

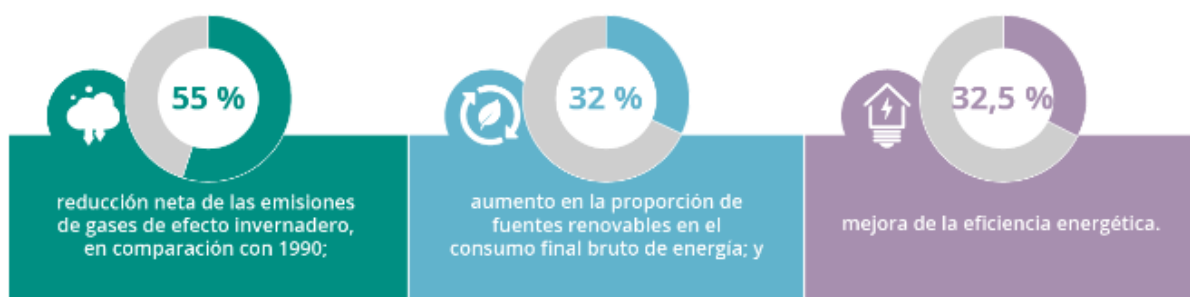


Ilustración 1: Objetivo Pacto Verde Europeo

1.2.1. Energía minihidráulica

Se considera energía minihidráulica aquellas centrales hidroeléctricas con una potencia inferior o igual a 10MW.

La energía hidroeléctrica es limpia e inagotable al igual que las demás energías renovables.

Las centrales hidroeléctricas tienen una vida de unos 40 años, con las nuevas tecnologías se podría aumentar hasta un 10%.

Para el caso de la minihidráulica, el coste de reforma de una central es casi la mitad que el de obra nueva, en coste por kW; y en ambos casos mayor coste por kW que en una central de gran potencia. Por lo que es muy buena opción la implantación de centrales minihidráulicas.

1.2.1.1. Contexto mundial

La producción de energía hidroeléctrica mundial es de 4418 TWh.

Actualmente, China encabeza la lista como mayor productor de energía hidroeléctrica del mundo, pero le siguen Brasil, Estados Unidos, Canadá y Rusia.

En los países más desarrollados la mayoría de ríos ya cuentan con centrales y en los países en vías de desarrollo esto proyectos cuesta que salgan adelante debido a temas financieros, ambientales y sociales, por lo que esta fuente de producción de energías tiene un campo de extensión limitado.

Sin embargo, a una escala menor la producción de energía con minicentrales hidroeléctricas ofrecen posibilidades de crecimiento, ya que se puede aprovechar más diversidad de caudales gracias a las nuevas tecnologías.

Se prevee que la minihidráulica aumente un 5% (11GW) entre el 2021 y el 2030, según la IEA. Un 66% del potencial minihidráulico se estima que esta sinvaprovechar (50 GW).

1.2.1.2. A nivel Europeo

Se estima que se espera un crecimiento de 18GW de energía minihidráulica en el periodo de 2021-2030 en cuanto a la potencia instalada en Europa.

1.2.1.3. A nivel nacional, España

España cuenta con 1350 centrales hidroeléctricas, siendo 1200 minicentrales generando uno 23000MWh. Esto supone en España un 18% del total de electricidad producida.

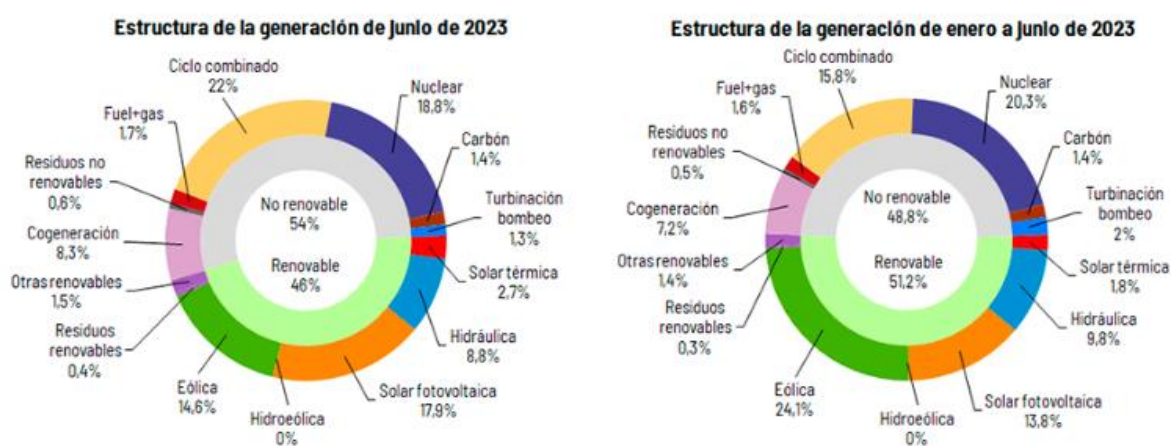


Ilustración 2: Estructura de generación de energía en 2023

En el gráfico se observa un 2,4% más de generación de energía renovable frente a la no renovable en los 6 primeros meses del año.

En el mes de junio la generación de energía hidráulica fue de un 8,8%.

1.2.1.4. A nivel autonómico, Andalucía

En los cinco primeros meses de año 762 GWh energía renovable provienen de 48 centrales hidroeléctricas, 13 eólicas y 10 fotovoltaicas en Andalucía. Andalucía ha producido 229 GWh hidroeléctrica hasta el mes de mayo.

1.2.1.5. A nivel provincial, Jaén

En Jaén existen 65 centrales fuera de servicio (13.653 kW), de las cuales 25 (6.492 kW) son irre recuperables, 19 (5.117 kW) tienen posibilidad de recuperación y 21 (2.044 kW) de ellas posibilidad muy escasa; todas las fuera de servicio son de menos de 10 MW. (Energía, Potencial Minihidráulico en Andalucía Estudio de Potencial y Viabilidad para la Recuperación de Centrales Minihidráulicas en Andalucía, 2008)

2. Tipología de minicentrales

Cuando se vaya a construir y poner en marcha una minicentral hidroeléctrica debe tenerse en cuenta el terreno donde se vaya a construir.

Dependiendo del emplazamiento podemos hacer la siguiente clasificación:

- Agua fluyente
- Agua embalsada
- Canal de riego
- Conducciones

2.1. Agua fluyente

Estas centrales son las que desvían parte del agua del río mediante una toma y llega hasta la central para ser turbinada. Tras obtener la energía eléctrica el agua es devuelta al río.

Son construidas en lugares donde la energía hidráulica debe ser utilizada en el instante en que se dispone de ella, para accionar las turbinas hidráulicas.

Este tipo de centrales no cuenta prácticamente con reserva de agua, oscilando el caudal suministrado dependiendo de las estaciones del año. En temporada de abundantes precipitaciones, desarrollan su potencia máxima, y dejan pasar el agua sobrante. En épocas de más escasez, la potencia disminuye en función del caudal, llegando a ser casi nulo en algunos ríos en la época del verano. Su construcción se

realiza mediante presas sobre el cauce de los ríos, para mantener un desnivel constante en la corriente de agua

2.1.1. Alta presión

Son aquellas donde el salto neto es mayor de 200 metros. Desvían caudales pequeños inferiores a $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Este tipo de minicentrales se encuentran en zonas de alta montaña y tienen conducciones muy largas.

2.1.2. Media presión

Son aquellas donde el salto neto varía entre los 10 y 200 metros. Su caudal mide alrededor de los $200 \text{ m}^3/\text{s}$, suelen encontrarse en zonas de baja y media montaña utilizando agua embalsada.

2.1.3. Baja presión

Su salto neto es menor a 20 metros y cuenta con caudales que pueden llegar hasta los $300 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.2. Agua embalsada

Las centrales de agua embalsada cuentan con un embalse de agua el cual regula la cantidad de agua que llega a la turbina. Este tipo de centrales suelen tener poco caudal y grandes caídas de agua.

2.3. Canal de riego

Dentro de estas podemos distinguir dos tipos de centrales

- Utilizan el desnivel que existe en el canal instalando así una tubería forzada paralela a la vía rápida del canal conduciendo a la central y devolviéndola después a su curso normal.
- Aprovecha el desnivel que hay entre el canal y el curso de un río cercano. La central es instalada cerca del río y en esta se turbinan el agua sobrante en el canal.

2.4. Conducciones

Cabe la posibilidad de insertar una central hidroeléctrica, para generar electricidad, en una red de agua, existente o en proyecto. En una primera aproximación se contemplan las redes de distribución de agua potable, los canales de irrigación y, eventualmente, de navegación, y las estaciones de tratamiento de aguas residuales. Estos aprovechamientos tienen la ventaja de que muchas de las estructuras ya existen, lo que disminuye el coste de la inversión; el impacto ambiental suplementario es prácticamente nulo, y las gestiones burocráticas para la obtención de permisos se simplifican.

2.5. En estaciones de tratamiento de aguas residuales

Dependiendo de la tipología de la estación de tratamiento de aguas residuales, la central puede ser ubicada aguas arriba o aguas debajo de la estación. En el primer caso será necesario hacer pasar las aguas grises a través de un sistema de rejillas y una instalación de decantación para eliminar los sólidos; en el segundo se trata de una instalación prácticamente convencional.

3. Elementos de obra civil que integra una minicentral hidroeléctrica

La función de los elementos que forman la obra civil es derivar, conducir y restituir el agua turbinada, estos son:

- Azudes y presas
- Desarenador
- Toma
- Canal de derivación
- Cámara de carga
- Tubería forzada
- Rejas y limpiarrejas
- Canal de desagüe
- Compuertas
- Edificio

3.1. Azudes y presas

Estos elementos se construyen en el curso del agua, transversalmente al mismo, para el retenimiento y desvío hacia la toma del caudal que se deriva hacia la minicentral.

En los azudes se produce una retención del agua sin que haya una variación importante del salto de agua hasta la central, normalmente están dispuestos para que el agua vierta por ellos mediante vertederos denominados también aliviaderos de coronación.

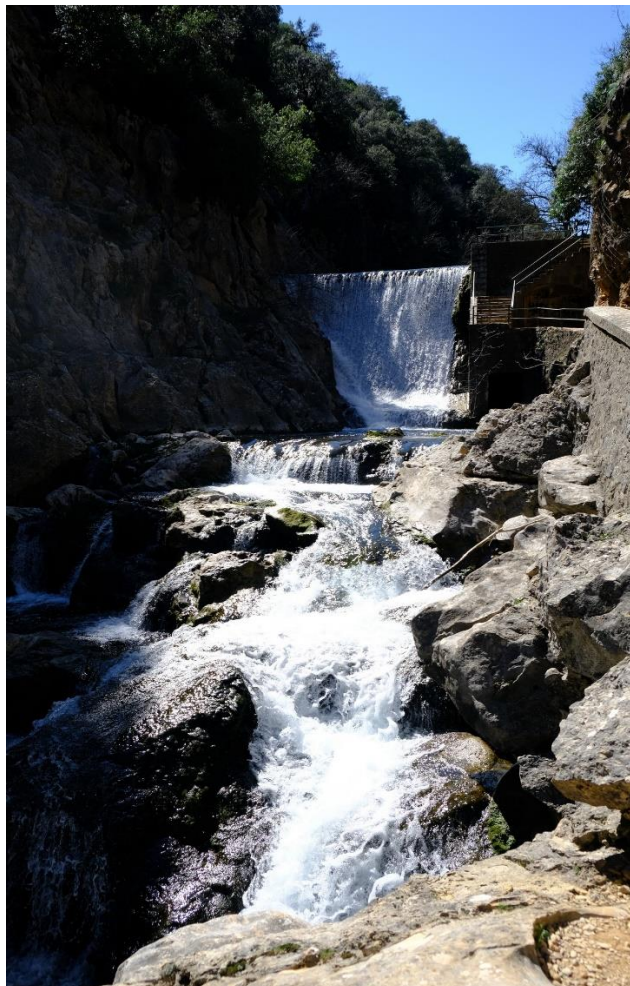


Ilustración 3: Azud de la Cerrada de Utrero

Sin embargo, en las presas el muro se construye para elevar la superficie libre y así crear un embalse de agua



Ilustración 4: Presa la Almendra (Salamanca)

Las presas cumplen dos funciones: retener y aumentar la lámina del agua. Por lo tanto, tienen que ser impermeables, para que no pase el agua y resistentes a los empujes que ésta ejerce sobre el cuerpo de la presa.

Podemos clasificarlas en dos grupos:

- Presas de fábrica
- Presas de materiales sueltos

3.1.1. Presas de fábrica

Estas presas están construidas de hormigón. Y dentro de estas podemos diferenciar tres tipos:

3.1.1.1. Presas de gravedad

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

Debido a su gran tamaño están destinadas para albergar grandes cantidades de agua. Está construida con hormigón en masa, trabajan en compresión. Para evitar el vuelco, tienen un peso adecuado para contrarrestar el momento del vuelco.



Ilustración 5: Presa de gravedad

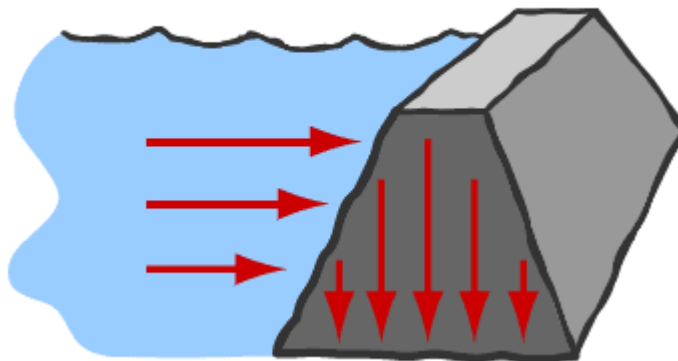


Ilustración 6: Actuación de las fuerzas en presa de gravedad

3.1.1.2. Presas de arco

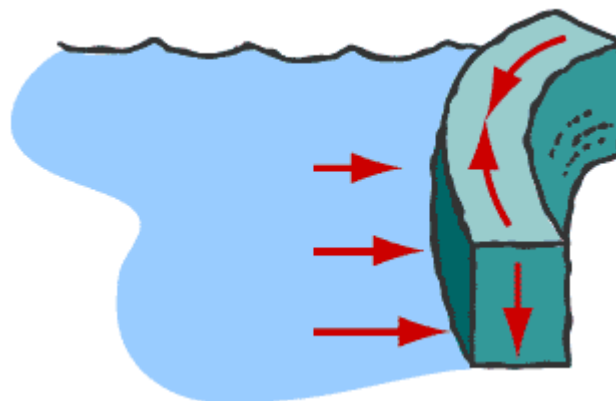


Ilustración 7: Actuación de las fuerzas en presa de arco

Su forma geométrica hace que la estructura trabaje a compresión, así como indica la ilustración.

Dentro de este grupo pueden ser de tres tipos

- Presa arco: con una sección trapezoidal de planta curva
- Presa de doble curvatura: con una sección curva de planta curva
- Arco-gravedad: que se distinguen por tener un cuerpo de presa más pequeño para que el peso de la propia presa ayude a resistir los esfuerzos



Ilustración 8: Presa de arco

Se construyen en zonas de valles rocosos, los materiales disponibles, como la altura del dique aconsejan este perfil.

3.1.1.3. Presas aligeradas o de contrafuertes

Formada por unos contrafuertes resistentes aguas abajo



Ilustración 9: Presa de contrafuertes

3.1.2. Presas de materiales sueltos

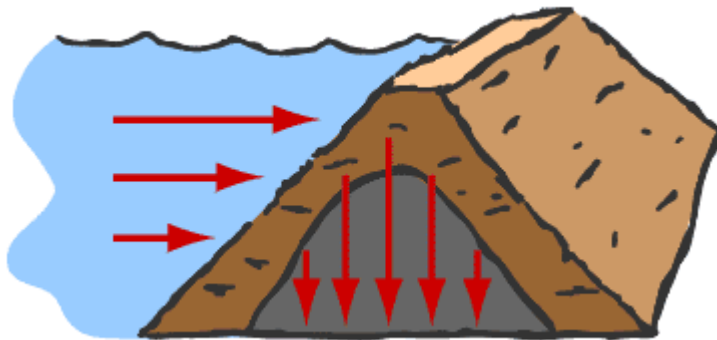


Ilustración 10: Actuación de las fuerzas en presas de materiales sueltos

3.1.2.1. Presas homogéneas

Este tipo de presa utilizan un material impermeable en toda la presa, por lo que toda la infraestructura quedará en buenas condiciones de impermeabilidad.

El tamaño de la base de estas presas suele ser de unas 6 a o veces la altura de esta.

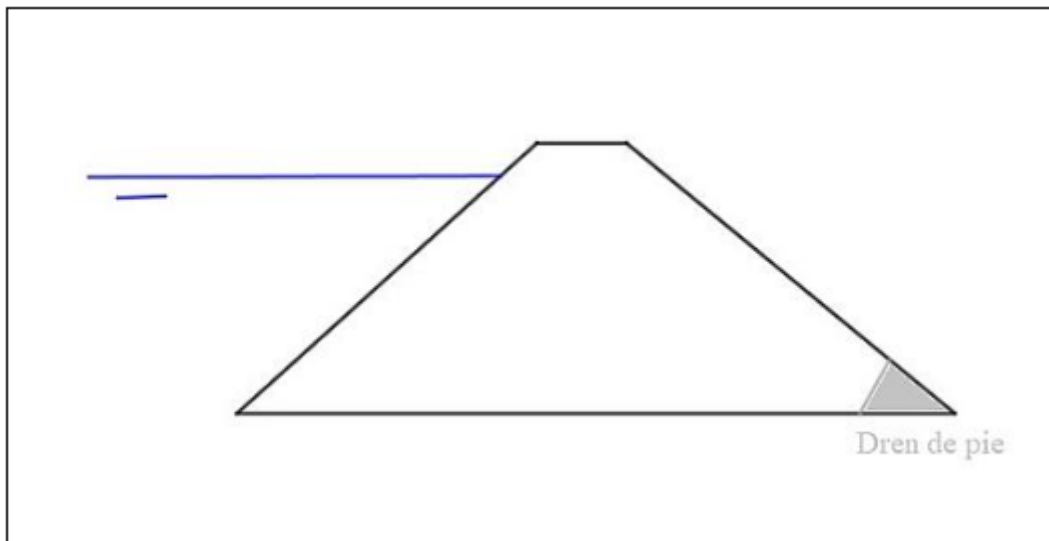


Ilustración 11: Sección tipo de una presa homogénea de materiales sueltos

3.1.2.2. Presas de núcleo

Estas presas llevan en su interior un núcleo impermeable. Este núcleo puede encontrarse o en una franja central en la presa o ligeramente inclinado.

El núcleo queda envuelto en una capa de materiales resistentes.

Estas presas podemos encontrarlas de cualquier altura y con una base de entre 4 y 6 veces la altura de presa.

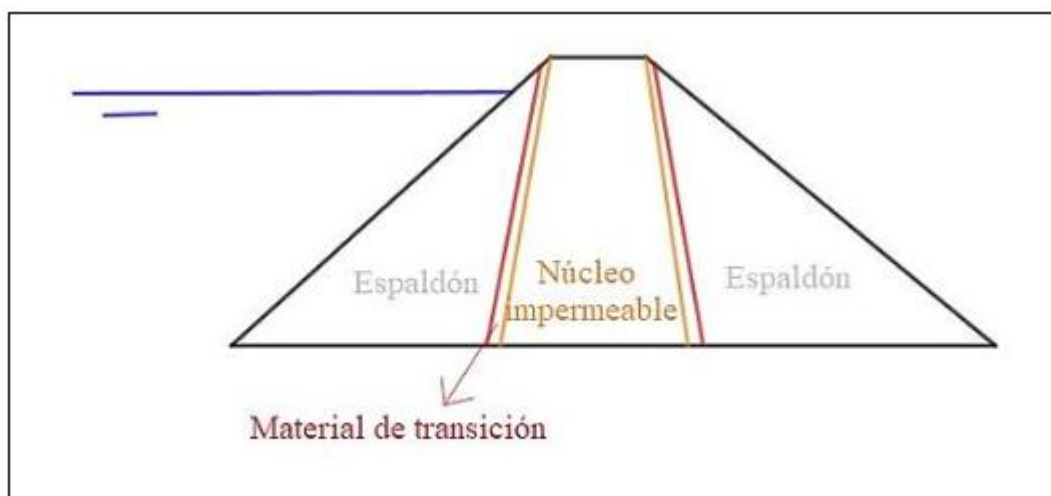


Ilustración 12: Sección tipo de una presa de materiales sueltos con núcleo impermeable

3.1.2.3. Presas de pantalla

Están compuestas por una pantalla impermeable apoyada aguas arriba de la presa. Esta pantalla puede estar construida por hormigón, pantalla asfáltica o pantalla plástica dependiendo de la altura. Siendo así de hormigón para cualquier tamaño, de pantalla asfáltica para presas medianas y pequeñas y pantalla plástica para presas pequeñas.

El ancho de la base suele tener un tamaño del triple de la altura.

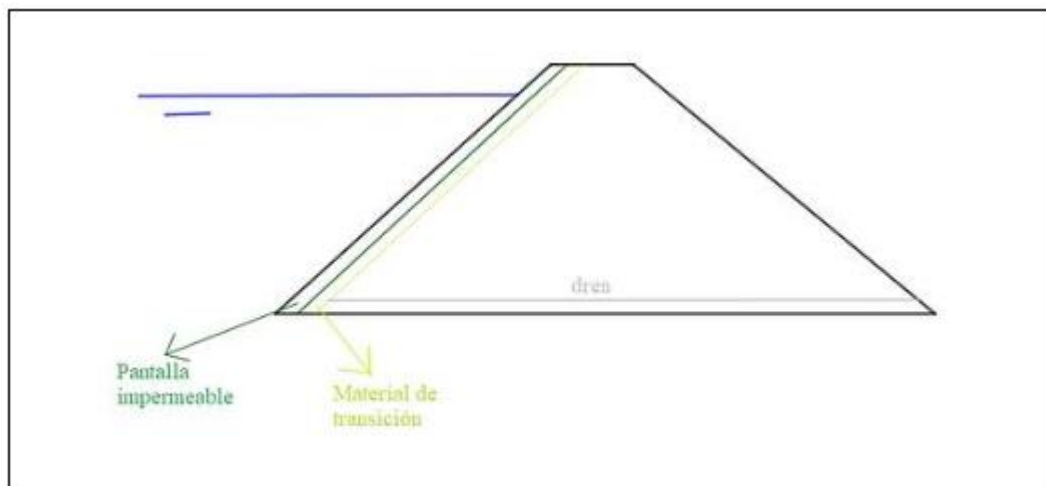


Ilustración 13: Sección tipo de una presa de materiales sueltos con pantalla impermeable

Las presas de materiales sueltos son las más utilizadas en todo el mundo. Sin embargo, en España hay un mayor número de presas de fábrica debido a la cantidad y calidad de cerradas.

3.1.3. Tipos de azudes

Tal y como hemos hablado anteriormente los azudes se pueden dividir en varios grupos:

- Escollera

- Estacada
- Tablas de madera
- Azudes de mampostería
- Azudes de cantería
- Azudes de gaviones
- Azudes de Hormigón armado (de gaviones)
- Azudes de Hormigón

3.1.3.1. Escollera

Estas se construyen entrelazando piedras sueltas que se encuentran en la corriente del río. Sus elementos son poco resistentes. Son útiles en los ríos con flujo suave y fácil de afrontar inundaciones.

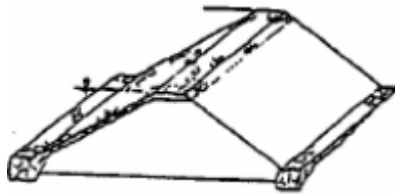


Ilustración 14: Azud tipo escollera

3.1.3.2. Estacada

Son aquellos que apoyan con troncos el fondo de un río. Además de los troncos se insertan ramas, tablas u otros elementos de la corriente. Son poco resistentes, por lo tanto, se usan en ríos con corrientes muy escasas.

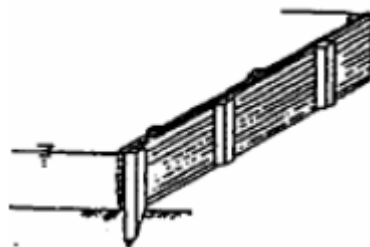


Ilustración 15: Azud tipo estacada

3.1.3.3. Tablas de madera

A diferencia del anterior los troncos y elementos van encajados en las rocas del suelo entre los que se insertan tablas.

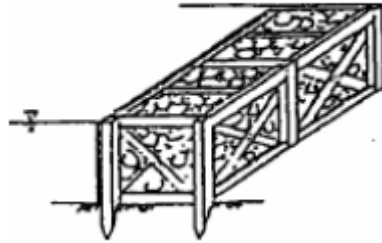


Ilustración 16: Azud elaborado con tablas de madera

3.1.3.4. Azudes de mampostería

Estos suelen tener una planta recta en el lado contrario a la dirección del flujo de agua.

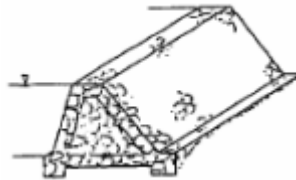


Ilustración 17: Azud de mampostería

3.1.3.5. Azudes de cantería

Son iguales que los anteriores, pero están fabricados de grava



Ilustración 18: Azud de cantería

3.1.3.6. Azudes de gaviones

En esta tipología la grava del azud está envuelta por una red metálica.

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

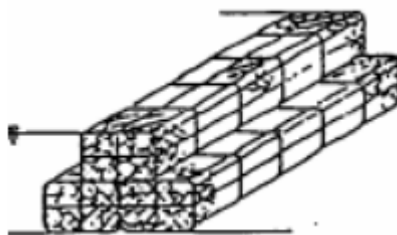


Ilustración 19: Azud de gaviones

3.1.3.7. Azudes de hormigón armado

Estos azudes son igual que los azudes de gaviones, pero reforzados con hormigón. Suelen usarse para los ríos de fuerte corriente.

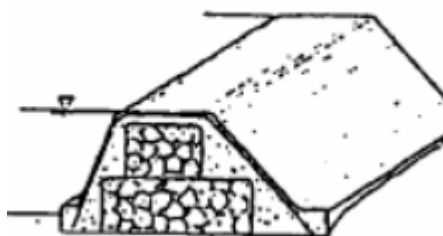


Ilustración 20: Azud de hormigón armado

3.1.3.8. Azudes de hormigón

Todo el cuerpo del azud está compuesto de hormigón.



Ilustración 21: Azud de hormigón

Para la construcción del azud habrá que tener varios factores en cuenta como puede ser la ubicación del sitio del azud (perpendicular a la dirección del río, topográfica y condiciones geológicas, fácil acceso...), la estabilidad estructural (resistencia y capacidad del suelo contra la resultante deslizando fuerza externa), sedimentación (fácil lavado, deslizamiento de tierra existente, los desechos, la erosión, la deriva maderas, etc) y el agua estancada (influencia en la zona de aguas arriba durante las inundaciones).

3.2. Desarenador

Este elemento de la obra de las centrales hidroeléctricas garantiza que el agua que fluye esté libre de partículas sólidas que arrastra el río.

Los desarenadores acumulan en el fondo todos los sólidos y posteriormente son eliminados.

Estos elementos los podemos clasificar según tres criterios

- Dependiendo de su operación
- Según la velocidad de escurrimiento
- Según su disposición

3.2.1. Tipología de desarenadores

3.2.1.1. Según su operación

Dentro de estos se diferencian dos: purga continua y purga discontinua

- Desarenadores de purga continua: En estos los sólidos que almacena son inmediatamente retirados por un caudal fijo de lavado
- Desarenadores de purga discontinua: En estos los sedimentos son almacenados temporalmente en la nave de desarenación y más adelante periódicamente son retirados con operación de purga

3.2.1.2. Según su velocidad

Podemos encontrar de baja velocidad y de alta velocidad

- Desarenadores de baja velocidad: oscila entre 0.2 y 0.6 m/s. Son preferibles para partículas finas.
- Desarenadores de alta velocidad: la velocidad oscila entre 0.6 y 1.5 m/s. Son ideales para las partículas medias o gruesas.

3.2.1.3. Según su disposición

- En serie: tienen varios depósitos contruidos de forma que uno está a continuación del siguiente.
- En paralelo: los depósitos se encuentran colocados paralelamente y cada uno trabaja con una fracción del caudal total.

3.2.2. Partes de un desarenador

Los desarenadores están formados por varias partes o tramos

- Transición de entrada: es la parte que une el canal con la nave.
- Cámara de sedimentación: es la parte que alberga las partículas sólidas debido a la disminución de la velocidad del flujo por el aumento de la sección transversal.
- Vertedero: se encuentra al final de la cámara. Sobre el vertedero pasa el agua limpia hacia el canal de conducción que llegará a la casa de máquinas. Debe trabajar con descarga libre y con una velocidad igual o inferior a 1 m/s, por lo tanto, la carga no podrá ser de más de 25 cm. Si la carga fuese mayor tendría que aumentarse el número de naves.
- Sistema o compuerta de purga: Retira los materiales acumulados en el fondo del desarenador. Así, facilita el camino de los sedimentos hasta la compuerta.
- Canal directo o by-pass: Este canal estará en servicio cuando la nave de desarenación se encuentre en limpieza o mantenimiento en un largo tiempo. Cuando el desarenador tiene dos o más naves este elemento no será necesario, ya que puede trabajar una nave cuando la otra esté fuera de servicio.

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

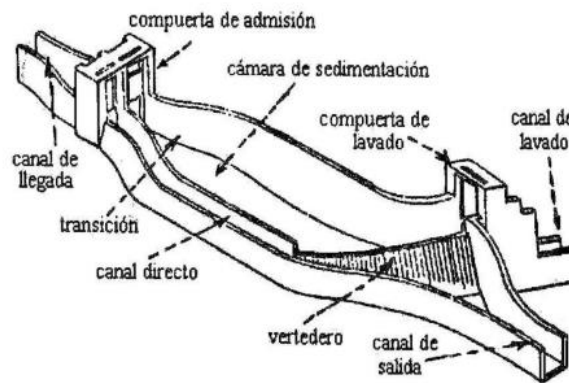


Ilustración 22: Partes de un desarenador

3.3. Toma

La toma permite desviar parte del agua del cauce del río para desviarla a la presa o azud y llevarla hasta las máquinas a través de canales o tuberías.

3.3.1. Tipología de tomas

- Toma lateral (es la más común)



Ilustración 23: Toma lateral

- Toma frontal



Ilustración 24: Toma frontal

- Toma de montaña o tirolesa



Ilustración 25: Toma tirolesa

Además de estos tres tipos existe otro menos usual que consiste en un canal excavado atravesando horizontalmente el cauce del río, de manera que el agua entre a través de unas rejillas y sale al curso del río para incorporarse al canal de derivación.

Las tomas tienen una rejilla para impedir la entrada de sólidos al canal y una compuerta para interrumpir la entrada del agua cuando se vaya a vaciar, limpiar y/o reparar las conducciones.

3.4. Canal de derivación

Su función es canalizar el agua desde la toma hasta la cámara de carga, podemos diferenciar dos tipos:

3.4.1. Tipología de canales

- Canal abierto



Ilustración 26: Canal de derivación tipo abierto

- Canal cerrado



Ilustración 27: Canal de derivación tipo cerrado

3.4.1.1. Canales abiertos

Dentro de los canales abiertos, según el material que se utilice para su construcción podemos encontrar:

- Canal de tierra simple: es fácil de construir y reparar y un coste bajo, sin embargo, tiene un riesgo de colapso mayor que otros, no es apto para tierras permeables y la eliminación de sedimentos es dificultoso.

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS



Ilustración 28: Canal abierto de tierra simple

- Canal alineado de roca o piedra: Presenta las mismas ventajas que la tipología anterior es decir fácil construcción y reparación, además más resistente que otros, sin embargo, tampoco es apto para tierras permeables.



Ilustración 29: Canal abierto de roca o piedra

- Canal de mampostería húmeda: Canal resistente y apto para tierra permeable y de fácil construcción. Esta tipología aumenta el coste por lo que sería más caro que los anteriores y necesita mano de obra.

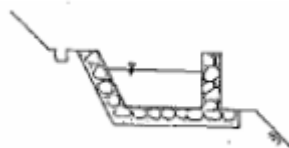


Ilustración 30: Canal abierto de mampostería húmeda

- Canal de hormigón: Como beneficio respecto al resto tiene gran flexibilidad en cruces, pero como desventajas no es aplicable para pequeños diámetros y su construcción se lleva a cabo en un largo periodo de tiempo.

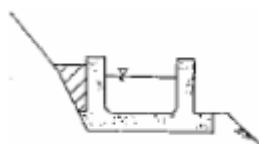


Ilustración 31: Canal abierto de hormigón

3.4.1.2. Canales cerrados

Podemos encontrarlos en forma de sifones, acueductos o túneles.

Los acueductos ofrecen las ventajas frente a los sifones de una menor pérdida de carga, menor longitud mientras que como desventaja tiene un coste mayor por disponer de estructura y cimentación.

La construcción de túneles permite un menor coste y una mayor seguridad frente a los agentes externos. Estos se utilizan cuando tienen una fuerte pendiente, mayor longitud y/o secciones grandes. Como desventaja esta tipología tiene una menor conservación.

3.5. Cámara de carga

Es un depósito localizado al final del canal del que empieza la tubería forzada.

Este elemento regula la fluctuación de descarga provocada entre la compuerta y la fluctuación de la carga.



Ilustración 32: Cámara de carga

3.6. Tubería forzada

En las centrales hidroeléctricas, la tubería forzada dirige el agua a presión desde la cámara de carga hasta la turbina. Debe de estar fabricada para soportar la presión de dicha agua.

3.6.1. Tipología de tubería forzada

El trazado de estas dependerá del terreno

- Acero: En este tipo de tuberías los problemas de tensiones y deformaciones serán mínimos.
- Tuberías de poliéster reforzado con fibra de vidrio: Estas tienen muy buenas características tanto mecánicas como técnicas.
- PVC: Son muy utilizadas. Estas se combinan con otros materiales para mejorar sus propiedades.
- Polietileno: Estas proporcionan buenas propiedades que dificultan el paso de la humedad, son apropiadas en varias aplicaciones de empaquetamiento.



Ilustración 33: Tubería forzada en Sierra de Cazorla

3.7. Rejas y limpiarrejas

Las rejas se instalan a la entrada de la toma de agua y en la cámara de carga para impedir que pase la broza.



Ilustración 34: Rejas

Los limpiarrejas son equipos automáticos que se colocan sobre las rejas.

3.7.1. Partes de un limpiarrejas

Los limpiarrejas suelen componerse de las siguientes partes

3.7.1.1. Bastidor

El bastidor o brazo es el elemento más importante ya que soporta todo el conjunto y la carga que evacue.

3.7.1.2. Peine

Es el elemento de limpieza, tiene unas hendiduras o dientes que se introducen entre las rejas para eliminar los sólidos. Va unido a un vástago.

3.7.1.3. Accionamiento

El movimiento del peine aparece gracias a un reductor que va unido a un motor eléctrico o grupo de presión de aceite.

3.7.1.4. Cinta transportadora

Recoge los residuos hasta expulsarlos al exterior del canal.

3.7.1.5. Cuadro eléctrico

Los limpiarrejas además constan de un cuadro eléctrico para su alimentación, control, protección y señalización.

3.7.2. Tipología de limpiarrejas

Dependiendo de las características de la toma, podemos clasificar los limpiarrejas.

3.7.2.1. Limpiarrejas articulados

Esta tipología de limpiarrejas dispone de un brazo hidráulico capaz de articularse. Dentro de este grupo podemos distinguir varios subtipos:

- Fijo articulado: El brazo hidráulico acaba en un rastro que permite la evacuación de residuos fácilmente.
- Fijo articulado giratorio: El brazo hidráulico tiene la posibilidad de girar sobre sí mismo para evacuar así los residuos.
- Móvil articulado: El brazo dispone de movimiento lateral.
- Móvil articulado y giratorio: Este tipo de limpiarrejas dispone de desplazamiento lateral mediante guías y es giratorio facilitando así la descarga de sólidos a un contenedor.

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS



Ilustración 35: Limpiarrejas articulado

3.7.2.2. Limpiarrejas telescópicos

Es un modelo fabricado para tomas que tengan diseño especial.



Ilustración 36: Limpiarrejas telescópico

3.7.2.3. Limpiarrejas de cadenas

Esta tipología tiene dos cadenas fijas laterales sobre el bastidor. Estas cadenas permiten la apertura del peine el movimiento de bajada. Al acercarse el final del trayecto el peine se acerca a la reja arrastrando toda la broza.



Ilustración 37: Limpiaarreas de cadenas

3.8. Canal de desagüe

Recoge el agua a la salida de la turbina y la conduce hasta el exterior, normalmente hasta el río para que siga su recorrido. Al salir del desagüe el agua lleva una velocidad elevada por lo que el canal tiene que estar construido y estudiado para que aguante la fuerza de la salida del agua y evitar la erosión y socavaciones del piso o paredes.



Ilustración 38: Canal de desagüe

3.9. Compuertas

Permiten regular el nivel del embalse. Estas pueden ser manuales, eléctricas, de doble husillo, de fondo (eléctrica o manual), longitudinal (eléctrica o manual).

Para evacuar el caudal se dispone de varios elementos.

3.9.1. Aliviaderos de superficie

Formado con elementos de regulación y control del nivel del embalse, pueden ser:

- Compuertas verticales: elemento de cierre. Suele estar formado por un tablero de chapa que sube y baja verticalmente debido a unas ranuras en los pilares contiguos.
- Compuertas de segmento: Formado por una estructura metálica con una superficie cilíndrica giratoria alrededor de un eje unido a través de brazos radiales.
- Compuertas del sector: Son como las compuertas de segmento con la diferencia del movimiento de apertura, este movimiento de arriba hacia abajo, dejando libre el paso para que el agua pase por encima de la compuerta.
- Clapeta o compuerta basculante: Instaladas alrededor de un eje que vierte el agua por arriba. Pueden ser mecánicas o neumáticas.

3.9.2. Desagües de fondo o medio fondo

Usan válvulas y compuertas como elementos de cierre.

3.10. Edificio

El edificio acogerá el equipamiento electromecánico de la minicentral.

Sus dimensiones dependerán del tipo de turbina y esta dependerá del caudal de equipamiento y salto de aprovechamiento

El emplazamiento del edificio dependerá de estudios topográficos, geológicos y geotécnicos, y el acceso a él, ya que podemos encontrar esta obra civil contiguo a el azul o presa, aguas abajo, bajo tierra...

4. Herramienta

Esta herramienta, realizada con Microsoft Excel, permite realizar el dimensionado de la obra civil en centrales minihidráulicas, así como el cálculo de los elementos principales.

4.1. Descripción

La herramienta Excel consta de 10 pestañas en las que deberemos de introducir determinados datos sobre la central minihidráulica que queramos calcular. Cada pestaña calculará un elemento diferente hasta completar el dimensionamiento de la central.

A continuación, se explica detenidamente todos los procedimientos y cálculos llevados a cabo para la central.

4.2. Utilización de la herramienta

4.2.1. Datos principales

Para empezar, tenemos una leyenda donde se explica el significado del color de la casilla, es decir las casillas de un color indicarán que el usuario debe introducir un valor o dato, las de otro color indica que el usuario debe elegir una opción de una lista desplegable y otro color las que automáticamente dan un resultado.

LEYENDA	
COLOR AZUL	a rellenar
COLOR AMARILLO	desplegable
COLOR MORADO	autorrellenable

Ilustración 39: Leyenda de la herramienta Excel

Tenemos una pestaña donde introduciremos los datos principales como el nombre y la localización de la central.

Además de estos datos, insertaremos los datos de partida más importantes para iniciar el cálculo que serán el caudal de diseño, el salto bruto y la profundidad media del río.

4.2.1.1. Caudal de diseño

El caudal de diseño o también llamado caudal de equipamiento, es el resultado del caudal medio menos el caudal ecológico.

El caudal medio es la sumatoria de todos los caudales en un periodo de tiempo divididos entre el número de caudales sumados.

El caudal ecológico que es el flujo mínimo de agua necesaria para conservar los datos ecológicos del cauce, así como los hábitats naturales que existen en una determinada fauna y flora, conservación del paisaje, etc. Este caudal es estudiado mediante análisis de las necesidades mínimas del ecosistema. En resumen, es el caudal mínimo de agua que debe mantenerse al construir una presa sin que se alteren las condiciones naturales y se asegure una vida natural igual que antes de la construcción.

4.2.1.2. Salto bruto

El salto bruto de un río es la diferencia de cota entre la lámina de agua en la toma y el nivel del río en el lugar donde se vaya a turbinar el agua.

Conocidos estos datos podemos comenzar ya a calcular los elementos para la obra civil de la central hidroeléctrica.

4.2.2. Presa-azud

En esta pestaña la herramienta hace una selección de presa o azud y el tipo a partir de los siguientes criterios.

Creación de embalse	Caudal del río	Tipo de presa o azud
Sí	Suave	Presa de materiales sueltos
Sí	Fuerte	Presa de hormigón
No	Suave	Escollera
No	Fuerte	Azud de hormigón

Tabla 1: Selección de presa o azud

Es decir, se elige si se va a crear un embalse o no y si el caudal del río es suave o fuerte y la herramienta te proporciona el tipo de presa o azud tal y como aparece en la Tabla 1.

4.2.3. Toma

Lo siguiente es saber el tipo de toma que es conveniente para esta central hidroeléctrica. Los valores que se introducen aquí son la pendiente del cauce y la planta del cauce.

4.2.3.1. Pendiente del cauce

La pendiente del cauce es la relación entre el desnivel del cauce y su longitud. Habrá que indicar la pendiente del cauce, que mediante una lista desplegable se elige entre “menos del 10%” o “más del 10%”.

4.2.3.2. Planta del cauce

Como último a preguntar en este apartado elegimos la planta del cauce, es decir, la forma de su trayectoria, que mediante la lista desplegable se elige entre “rectilíneo con contramedidas”, “curvo con contramedidas” o “rectilíneo”.

Con estos dos datos el programa mostrará el tipo de toma a elegir según la siguiente tabla:

Pendiente del cauce	Planta del cauce	Tipo de toma
Menos del 10%	Rectilíneo con contramedidas	Toma lateral
Menos del 10%	Curvo con contramedidas	Toma frontal
Menos del 10%	Rectilíneo	Toma lateral
Más del 10%	Rectilíneo con contramedidas	Toma de montaña
Más del 10%	Curvo con contramedidas	Toma de montaña
Más del 10%	Rectilíneo	Toma de montaña

Tabla 2: Selección tipo de toma

4.2.4. Desarenador

En este apartado se tiene dos opciones de calcular el desarenador, bien la herramienta lo dimensiona automáticamente a partir del caudal de diseño o en función de las características de la partícula.

En primer lugar, tenemos el procedimiento por el cual la herramienta dimensiona el desarenador a partir del caudal de diseño, sin pedir al usuario ningún

valor nuevo, el programa hará todos los cálculos necesarios para calcular el diámetro de las partículas y las dimensiones del desarenador.

La herramienta está diseñada de forma que el diámetro de las partículas será el siguiente mediante fórmulas de Excel.

Salto bruto (m)	Diámetro de las partículas (mm)
<200	0.6
200-300	0.5
300-500	0.3
>500	1

Tabla 3: Diámetro de la partícula en función del salto bruto

Caudal (m ³ /s)	Dimensiones				Ht mín(m)
	Mínimas		Recomendadas		
	Bd	Ld	Bd	Ld	
0,10<Q<0,70	2,0	4,0	3,0	5,0	0,5
0,80<Q<1,60	3,0	4,5	3,5	6,0	0,6
1,70<Q<3,00	3,5	5,0	4,0	7,0	0,7
3,10<Q<6,50	7,0	4,0	11,5	5,0	0,9
6,60<Q<10,00	8,0	5,0	15,0	6,5	1,1
10,1<Q<13,50	9,5	6,0	16,5	7,5	1,3
13,60<Q<17,00	11,0	7,0	18,0	8,0	1,5
17,10<Q<20,00	12,0	8,0	21,0	9,0	1,7

Tabla 4 : Dimensiones mínimas y recomendadas del desarenador

Sin embargo, si queremos un cálculo a partir de las características de las partículas, la herramienta lo calcula de la siguiente forma.

Primero aparece el diámetro máximo de las partículas, que la herramienta lo calcula en función del salto bruto.

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

Salto bruto (m)	Diámetro máximo de las partículas
$h < 10$	0,35
$10 < h < 100$	0,13
$h > 100$	0,03

Tabla 5: Diámetro máximo de las partículas en función del salto bruto

Para los valores de la densidad y la viscosidad, tenemos 2500 Kg/m³ para la densidad de la partícula y 0,0000101 m²/s para la viscosidad cinemática del agua a unos 20°C.

A partir de los datos anteriores, la herramienta calcula el valor del parámetro k_p que sirve para más adelante calcular la velocidad de sedimentación de los sólidos en suspensión.

$$k_p = \left(\frac{9,81 * \left(\frac{\rho}{1000} - 1 \right)}{v^2} \right)^{\frac{1}{3}} * d;$$

Ecuación 1: Parámetro k_p

Siendo,

k_p : parámetro

ρ : densidad de los sólidos en suspensión (kg/m³)

v : viscosidad cinemática del agua (m²/s)

d : diámetro de las partículas (mm)

k_p	v_s
$k_p < 3,3$	$v_s = \frac{\left(\frac{\rho}{1000} - 1 \right) * 9,81 * d^2}{18 * v}$
$3,3 < k_p < 44$	$v_s = \frac{0.152 * \left(9,81 * \left(\frac{\rho}{1000} - 1 \right) \right)^{0,714} * d^{1,14}}{v^{0,428}}$
$k_p > 44$	$v_s = (3 * 9,81 * d * \left(\frac{\rho}{1000} - 1 \right))^{0,5}$

Tabla 6: Valores de la velocidad de sedimentación según el valor de k_p

Siendo,

k_p : parámetro

ρ : densidad de los sólidos en suspensión (kg/m³)

v_s : velocidad de sedimentación (m/s)

ν : viscosidad cinemática del agua (m²/s)

d : diámetro de las partículas (mm)

A continuación, la herramienta calcula el parámetro ke que sirve para dar valor a la velocidad de arrastre.

d	Ke
$d > 1$	36
$0,1 < d < 1$	44
$d < 0,1$	51

Tabla 7: Valor del parámetro ke en función del diámetro de las partículas

Siendo,

d : diámetro de las partículas (mm)

ke : parámetro

$$v_{ar} = 0,32 * ke * d^{0,5}$$

Ecuación 2: Velocidad de arrastre

Siendo,

v_{ar} : velocidad de arrastre (m/s)

ke : parámetro

d : diámetro de las partículas (m)

Conocidos los valores citados anteriormente, se calcula la altura del desarenador que es un 10% mayor que la del canal de derivación.

Por último, el programa calcula el ancho mínimo y la longitud mínima del desarenado.

$$a_{min} = \frac{Q}{v_{ar} * prof}$$

Ecuación 3: ancho mínimo del desarenador

Siendo,

a_{min} : ancho mínimo del desarenador (m)

Q: caudal de diseño (m³/s)

v_{ar} : velocidad de arrastre (m/s)

$prof$: profundidad del desarenador (m)

Para que la herramienta del valor de la longitud mínima recomendada primero calcula el tiempo de sedimentación mediante la siguiente ecuación:

$$t_s = \frac{prof}{v_s}$$

Ecuación 4: Tiempo de sedimentación

Siendo,

t_s : tiempo de sedimentación (s)

$prof$: profundidad del desarenador (m)

v_s : velocidad de sedimentación (m/s)

Finalmente, la longitud mínima recomendada se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$L_{min} = v_{ar} * t_s$$

Ecuación 5: Longitud mínima del desarenador (2)

Siendo,

L_{min} : Longitud mínima del desarenador (m)

t_s : tiempo de sedimentación (s)

v_{ar} : velocidad de arrastre (m/s)

A continuación, una imagen con el esquema de un desarenador para entender algunos de los parámetros calculados en este apartado.

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

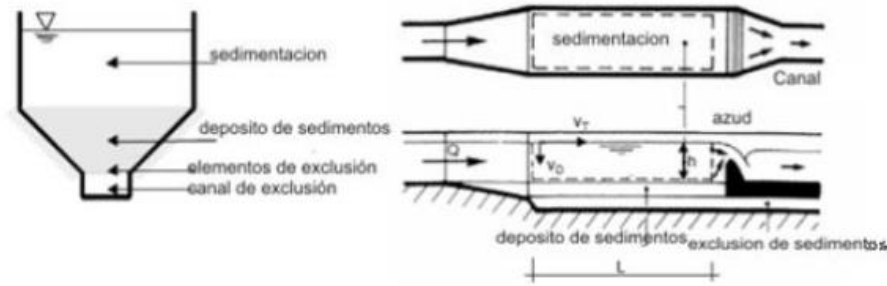


Ilustración 40: Esquema de un desarenador

4.2.5. Canal de derivación

En primer lugar, nos aparece el caudal de diseño y el usuario elige la pendiente y la longitud de este.

El ancho del canal es un parámetro difícil de calcular, por lo que suponiendo una velocidad de 0,5 m/s, se calcula el ancho del canal con la siguiente ecuación:

$$ancho_{canal} = 1,416 * \sqrt{\frac{Q}{0,5}}$$

Ecuación 6: Ancho del canal de derivación

Siendo,

$ancho_{canal}$: ancho del canal de derivación (m)

Q : caudal de diseño (m³/s)

El tipo de canal de derivación se puede elegir mediante un desplegable entre “triangular”, “rectangular” o “trapezoidal” y del material de que se construya.

Hay una casilla “Coeficiente de Manning” donde dependiendo del material que se utilice aparecerá un valor u otro, este valor representa la capacidad hidráulica del sistema.

Material	Coeficiente de Manning
Acero liso sin pintar	0.012
Acero liso pintado	0.013
Hormigón terminado con lechada	0.015

Hormigón sin terminar	0.017
Hormigón gunitado	0.019
Cemento limpio	0.011
Cemento con mortero	0.013
Madera cepillada sin tratar	0.012
Madera cepillada creosotada	0.012
Madera planchas con listones	0.015
Mampostería piedra partida cementada	0.025
Mampostería piedra partida suelta	0.032
Mampostería fondo cemento	0.03
Tierra limpia ultimada recientemente	0.018
Tierra limpia con uso	0.022
Tierra con musgo corto	0.027

Tabla 8: Coeficiente de Manning de los materiales

Los datos que nos da el programa son los siguientes en cada tipo de canal.

4.2.5.1. Superficie de la sección transversal

Esto es la profundidad máxima del canal que se calculará con las siguientes fórmulas

- Rectangular

$$A = bh$$

- Trapezoidal

$$A = (b + zh)h$$

- Triangular

$$A = zh^2$$

Ecuación 7: Superficie de sección transversal

Siendo,

A: superficie transversal (m²)

b: anchura del fondo (m)

h: altura máxima del agua en el centro del canal (m)

z: pendiente latera, cambio horizontal por cambio vertical unitario

4.2.5.2. Perímetro mojado

Esto es la longitud del perímetro de la sección transversal que está en contacto con el agua excluyendo la anchura.

- Rectangular

$$P = b + 2h$$

- Trapezoidal

$$P = b + 2h\sqrt{1 + z^2}$$

- Triangular

$$P = 2h\sqrt{1 + z^2}$$

Ecuación 8: Perímetro mojado

Siendo,

P: perímetro mojado (m)

b: anchura del fondo (m)

h: altura máxima del agua en el centro del canal (m)

z: pendiente lateral, cambio horizontal por cambio vertical unitario

4.2.5.3. Radio hidráulico

El radio hidráulico es el cociente entre el área de la sección transversal y el perímetro mojado.

- Rectangular

$$R = \frac{bh}{b + 2h}$$

- Trapezoidal

$$R = \frac{(b + zh)h}{b + 2h\sqrt{1 + z^2}}$$

- Triangular

$$R = \frac{zh}{2\sqrt{1 + z^2}}$$

Ecuación 9: Radio hidráulico

Siendo,

R : radio hidráulico (m)

b : anchura del fondo (m)

h : altura máxima del agua en el centro del canal (m)

z : pendiente lateral, cambio horizontal por cambio vertical unitario

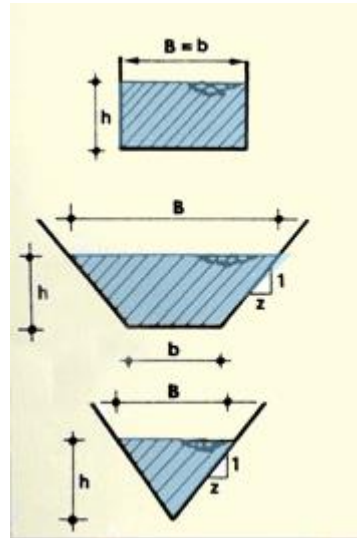


Ilustración 41: Tipología de canal

4.2.5.4. Anchura de la parte superior

Esta anchura es la distancia entre los extremos de la superficie transversal del agua.

- Rectangular

$$B = b$$

- Trapezoidal

$$B = b + 2zh$$

- Triangular

$$B = 2zh$$

Ecuación 10: Anchura de la parte superior

Siendo,

B : anchura de la parte superior (m)

b : anchura del fondo (m)

h : altura máxima del agua en el centro del canal (m)

z : pendiente lateral, cambio horizontal por cambio vertical unitario

4.2.5.5. Altura mínima del canal de derivación

Para calcular dicha altura se debe realizar una serie de cálculos anteriores.

En primer lugar, se calcula el parámetro de aspecto, este valor se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$m = 2 * ((1 + z^2)^{\frac{1}{2}} - z)$$

Ecuación 11: Parámetro de aspecto

Siendo,

m : parámetro de aspecto

z : pendiente lateral, cambio horizontal por cambio vertical unitario

Una vez obtenido el valor de m , se puede proceder al cálculo del coeficiente de forma k con la siguiente ecuación:

$$k = [(m + z)^{\frac{5}{3}} / (m + 2 * ((1 + z^2)^{\frac{1}{2}}))^{\frac{2}{3}}]^{\frac{3}{8}}$$

Ecuación 12: Coeficiente de forma k

Siendo,

k : coeficiente de forma k

m : coeficiente de Manning

z : pendiente lateral, cambio horizontal por cambio vertical unitario

Tras tener la solución de otro coeficiente, se procede a calcular el coeficiente dinámico M a través de la siguiente ecuación:

$$M = (n * Q / I_0^{\frac{1}{2}})^{\frac{3}{8}}$$

Ecuación 13: Coeficiente dinámico

Siendo,

M : coeficiente dinámico

n : coeficiente de Manning

Q : caudal de diseño (m³/s)

I_0 : pendiente

Finalmente se puede obtener la altura mínima del canal de derivación de la siguiente forma:

$$H = \frac{M}{k}$$

Ecuación 14: Altura mínima del canal de derivación

Siendo,

H : Altura mínima del canal (m)

M : Coeficiente dinámico

k : Coeficiente de forma k

4.2.5.6. Gradiente hidráulico y pérdidas de carga

El gradiente hidráulico es la pérdida de carga por unidad de longitud recorrida.

Que se calcula con la siguiente ecuación:

$$S = \left(Q * n * \frac{P^{\frac{2}{3}}}{A^{\frac{5}{3}}} \right)^2$$

Ecuación 15: Gradiente hidráulico

Siendo,

S : gradiente hidráulico (pérdida carga/ ud de longitud)

Q : caudal (m³/s)

n : coeficiente de Manning

P : perímetro mojado (m)

A : área (m²)

Para el cálculo de las pérdidas de carga el programa multiplica el gradiente hidráulico por la longitud de la toma de derivación, es decir:

$$h_{ca} = S * L$$

Ecuación 16: Pérdidas de carga en el canal

Siendo,

h_{ca} : pérdida de carga (m)

S : gradiente hidráulico (pérdida de carga/ ud de longitud)

L : longitud (m)

4.2.6. Tubería forzada

En primer lugar, como en pestañas anteriores aparece el caudal de diseño y el salto bruto.

Para el dimensionado de la tubería forzada introduciremos la longitud que queramos que tenga en metros y elegiremos el material del que queramos que se haga que saldrá de una lista desplegable pudiendo elegir entre “PVC”, “acero”, “fundición”, “hierro” y “polietileno”.

Automáticamente aparecerán el coeficiente de Manning, el módulo de Young (N/m²) y la máxima carga de tracción admisible (N/m²). Estos datos son los que aparecen en las siguientes tablas.

Material	Coefficiente de Manning
PVC	0.009
Acero	0.012
Fundición	0.015
Hierro	0.015
polietileno	0.009

Tabla 9: Coeficiente de Manning para materiales de tubería forzada

Material	Módulo de Young
PVC	2.75E+09
Acero	2.06E+11
Fundición	7.85e+10
Hierro	1.67E+10
Polietileno	5.50E+08

Tabla 10: Módulo de Young de materiales para la tubería forzada

Material	Máxima carga de tracción admisible
PVC	1.30E+07
Acero	4.00E+08
Fundición	1.40E+08
Hierro	3.40E+08
Polietileno	5.00E+06

Tabla 11: Máxima carga de tracción admisible de materiales para la tubería forzada

4.2.6.1. Salto útil

El salto útil es el desnivel existente entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe de la turbina.

Para calcular el salto útil la herramienta opera la siguiente ecuación

$$H_u = H_b - h_{ca}$$

Ecuación 17: Salto útil

Siendo,

H_u : salto útil (m)

H_b : salto bruto (m)

h_{ca} : pérdidas de carga (m)

4.2.6.2. Diámetro de la tubería

Para el diámetro de la tubería se da la opción de utilizar el que la herramienta calcula automáticamente o de que se escoja libremente.

El diámetro lo calcula con la siguiente ecuación

$$D = 2.69 * \left(\frac{n^2 * Q^2 * L}{H_u} \right)^{0.1875}$$

Ecuación 18: Diámetro de la tubería

Siendo,

D : diámetro interior (mm)

n : coeficiente de Manning

Q : caudal (m³/s)

H_u : salto útil (m)

L : Longitud de la tubería (m)

4.2.6.3. Velocidad de flujo

Se define como la cantidad de agua que circula a través de la tubería.

La herramienta lo calcula automáticamente con la siguiente expresión:

$$v = \frac{Q}{\frac{\pi * D^2}{4}}$$

Ecuación 19: Velocidad de flujo

Siendo,

v : velocidad del flujo (m/s)

Q : caudal (m³/s)

D : diámetro interior (m)

4.2.6.4. Espesor mínimo de la tubería

En este último paso se calculará el espesor mínimo de la tubería, para ello primero el programa calcula una serie de valores.

En primer lugar, se calcula H' que es el salto bruto más su 30%.

Además de ese valor, se calcula el valor de la constante k' que depende de la eficiencia de la soldadura y se basa en los valores de la siguiente tabla:

Tipo de soldadura	K'
Tubería sin soldadura	1
Tubería con costura soldada con protección contra tirones	0,9
Soldadura con alivio de tensión	0,85
Sin alivio de tensión	0,8

Tabla 12: Parámetro k' en función de su soldadura

Por último, el programa da el valor es que es el espesor para la corrosión que normalmente es 1mm.

Con estos valores descritos anteriormente la herramienta ya puede calcular el espesor de la tubería con la siguiente ecuación:

$$e = \left(\frac{0.1 * H' * D}{k' * \sigma_{adm}} \right) + e_s$$

Ecuación 20: espesor de la tubería

Siendo,

e : espesor de la tubería (mm)

H' : altura total ascendida al 30 %

D : Diámetro interno de la tubería (mm)

k' : parámetro en función del tipo de soldadura utilizada para la tubería

σ_{adm} : tensión máxima admisible del material (KN/mm²)

e_s : espesura para la corrosión (mm)

4.2.7. Cámara de carga

Para calcular la cámara de carga se debe calcular los valores que aparecen en la siguiente imagen:

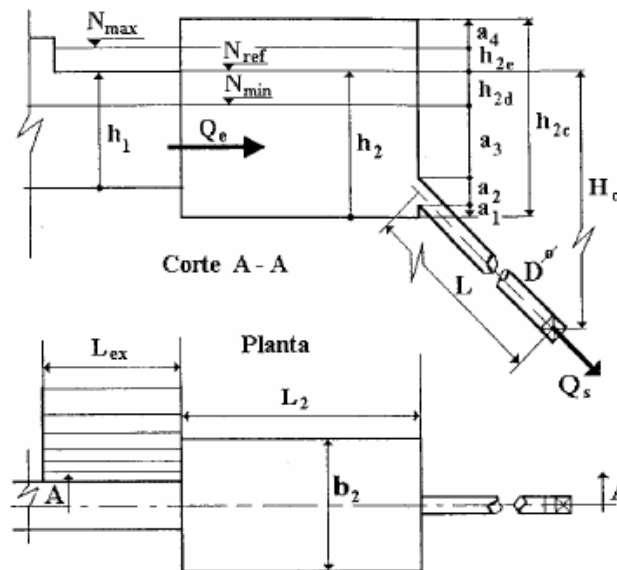


Ilustración 42: Cámara de carga

- a_1 : es la altura mínima para impedir que entren partículas sólidas en la tubería forzada. Ya que en el caso de que se depositase algo en el fondo de la cámara de carga, esto impediría que llegase a la turbina.
- a_2 : diámetro de la propia tubería.

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

- a_3 : es la altura mínima para asegurar la sumergencia mínima. Esto garantiza que no entre aire en la turbina.
- a_4 : esto es la altura mínima que garantiza el correcto funcionamiento de la cámara de carga en el caso de que aumente el caudal.
- h_2 : es la altura mínima de referencia que se utiliza para calcular el ancho mínimo.

$$h_2 = 1.01 * (a_1 + a_2 + a_3)$$

- b_2 : es el ancho mínimo de la cámara de carga.

$$b_2 = \frac{Q}{h_2}$$

- h_{2d} :

$$h_{2d} = \frac{Q}{7 * b_2 * \sqrt{h_2}}$$

- h_{2e} :

$$h_{2e} = \frac{0.25 * Q}{b_2 * h_2^{0.5}}$$

- h_{2c} : este valor será el mayor de los dos siguientes valores

$$h_{2c} = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + h_{2e} + h_{2d}$$

$$h_{2c} = h_2 + h_{2e} + a_4$$

Estos valores los da la herramienta tomando unos valores recomendados.

A continuación, se calcula la longitud y anchura de la cámara de carga con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{Q * 120}{b_2 + h_{2c}}$$

Ecuación 21: Longitud de la cámara de carga

Siendo,

L : longitud de la cámara de carga (m)

Q : caudal (m³/s)

120: tiempo de reacción, expresado en segundos. Este valor señala el tiempo necesario para modificar las condiciones de operación de la turbina en el posible caso de aparecer alguna incidencia. Normalmente, se tarda unos 2 minutos.

b_2 : ancho mínimo cámara de carga (m)

h_{2c} : altura cámara de carga (m)

4.2.7.1. Aliviadero

La herramienta Excel te da a elegir el tipo de aliviadero entre 'Creager' u 'pared gruesa'.

- Creager: este tipo de aliviaderos es el que el agua empieza a verter con una cierta capacidad de desagüe, apropiado para desaguar a una altura de lámina lo más pequeña posible sin producir presiones negativas.
- Pared gruesa: es aquel con suficiente longitud, como para que se establezca sobre él un régimen prácticamente paralelo, es decir, admite la distribución hidrostática de presiones.

Tras elegir la tipología de aliviaderos se indica el coeficiente de descarga correspondiente, que es la relación que existe entre el caudal real y el caudal teórico

que pasa a través del orificio. Dependiendo el tipo de aliviadero este coeficiente tomará un valor u otro.

Tipología del aliviadero	Coficiente de descarga
Creager	2.2
Pared gruesa	1.51

Tabla 13: Coficiente de descarga según la tipología del aliviadero

A continuación, se calcula la longitud del aliviadero con la siguiente ecuación:

$$L_{ex} = \frac{8}{K_{ex}} * \frac{b_2^{\frac{3}{2}} * h_2^{\frac{3}{4}}}{Q^{\frac{1}{2}}}$$

Ecuación 22: Longitud del aliviadero

Siendo,

L_{ex} : longitud del aliviadero (m)

K_{ex} : coeficiente de descarga

b_2 : ancho mínimo de la cámara de carga (m)

h_2 : es la altura mínima de referencia que se utiliza para calcular el ancho mínimo (m)

Q : caudal (m³/s)

4.2.8. Rejas

En este apartado para definir las rejas, se ha de elegir el tipo de turbina que se vaya a instalar.

Dependiendo de la turbina seleccionada se darán unos parámetros u otros, siendo:

Tipo de turbina	Francis	Pelton	Kaplan
Separación entre barras	0,08	0,04	0,125

Tabla 14: Separación entre barras en función de la turbina

4.2.8.1. Tipo de turbina

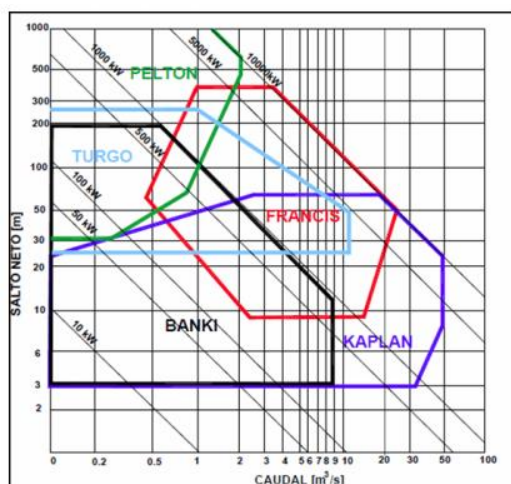
Para elegir el tipo de turbina, podemos orientarnos mediante la altura del salto, ábacos, velocidad específica o por el rendimiento.

- Según la altura del salto: Según el criterio de la siguiente tabla:

Tipo de turbina	Horquilla de salto en metros
Kaplan y hélice	$2 < H < 20$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1300$
Flujo cruzado	$3 < H < 200$
Turgo	$50 < H < 250$

Tabla 15: Tipo de turbina en función del salto

- Ábacos: Mediante estos ábacos, dependiendo el caudal y el salto neto, se puede ver que turbina sería la adecuada.



DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

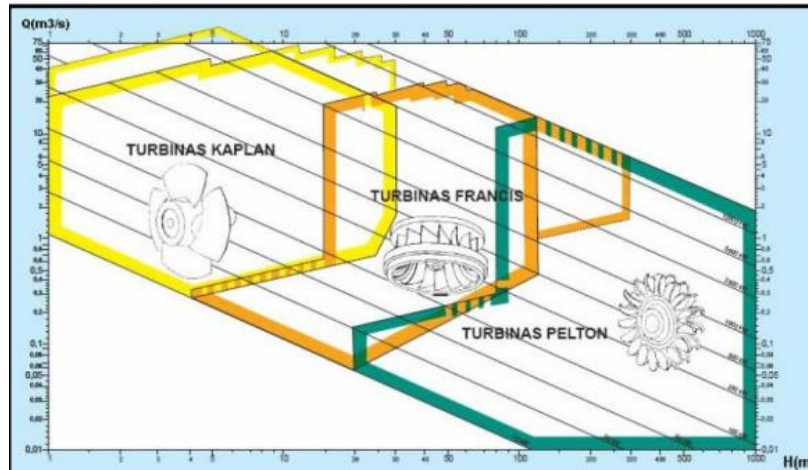
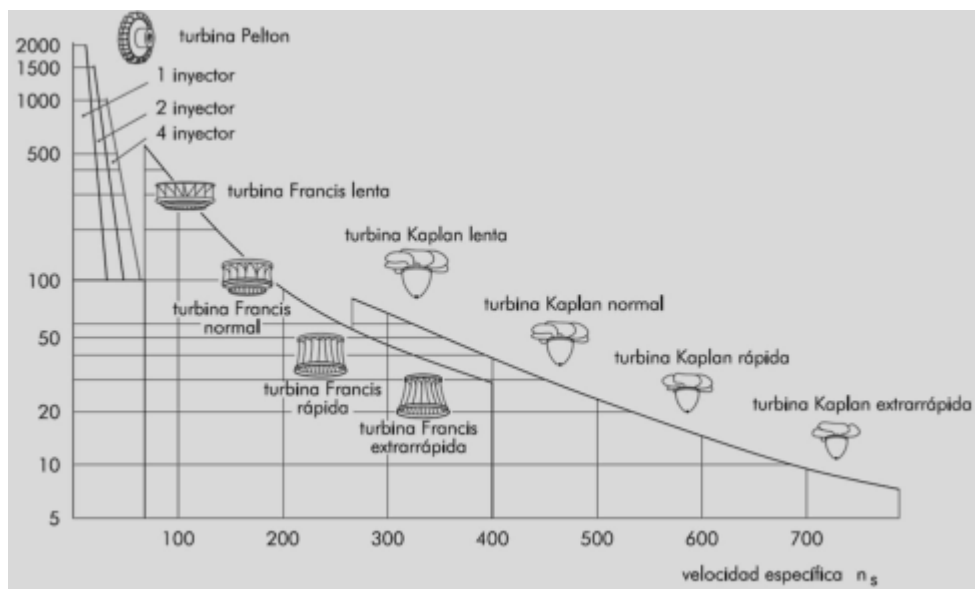


Ilustración 43: Tipos de turbina en función del caudal y salto

Podemos ver que cuando se tiene un salto mayor y poco caudal, la idónea sería una turbina Pelton, sin embargo, si tenemos un salto neto más pequeño, pero con más caudal, será más conveniente tomar por elección una turbina Kaplan o Francis.

- Velocidad específica: dependiendo de la velocidad, es aconsejable una u otra turbina.



DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

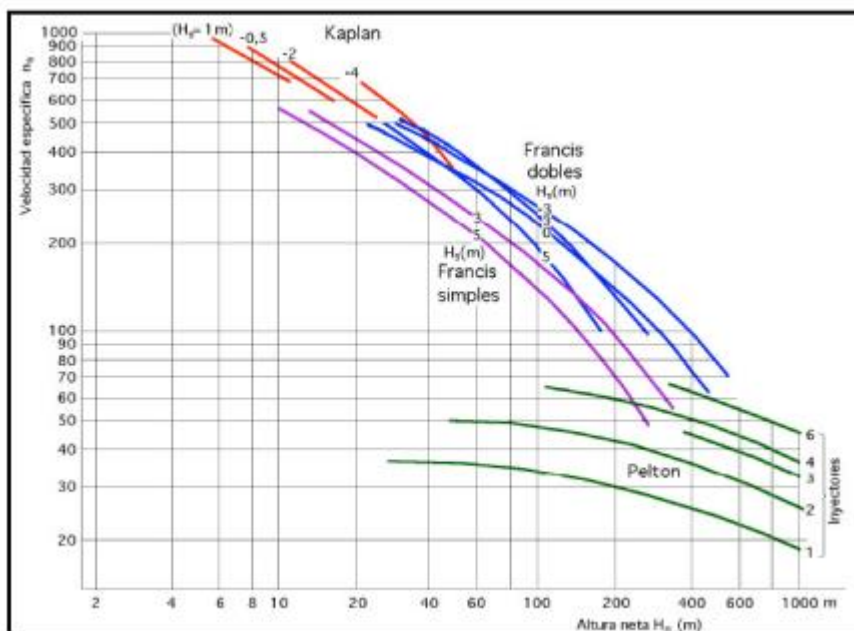


Ilustración 44: Tipos de turbina en función de la velocidad y la altura

Mediante este criterio se aprecia que a mayor velocidad la turbina Kaplan sería buena opción, sin embargo, si se tiene una velocidad más baja convendría una turbina Pelton.

- Rendimiento: Dependiendo del rendimiento podemos clasificarlas en la siguiente tabla:

Tipo de turbina	Mejor rendimiento
Kaplan simple regulación	0,91
Kaplan doble regulación	0,93
Francis	0,94
Pelton	0,90
Turgo	0,85

Tabla 16: Tipo de turbina en función de su rendimiento

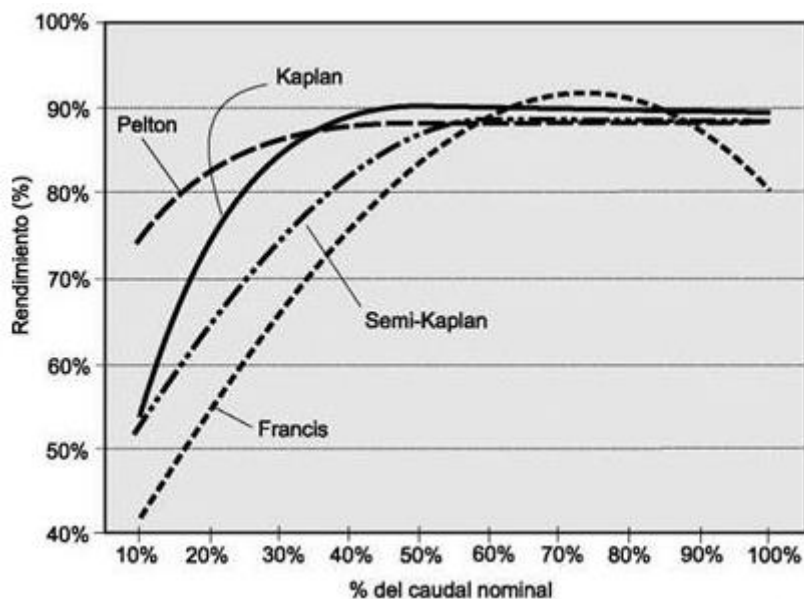


Ilustración 45: Tipo de turbina en función del caudal y el rendimiento

4.2.8.2. Dimensionamiento de las barras y pérdidas de carga

El paso siguiente para el dimensionamiento de las barras es elegir la sección que puede ser 'circular', 'rectangular', 'cuadrada', 'ovalada', 'triangular' o 'redondeada'. Dependiendo del tipo de sección se tendrá un espesor de la barra y un coeficiente de Strouhal.

Tipo de barra	Espesor de la barra	Coefficiente de Strouhal
Cuadrada	c	0,130
Rectangular	2,8c	0,155
Circular	c	0,200
Triangular	2,8c	0,255
Ovalada	2,8c	0,265
Redondeada	5c	0.275

Tabla 17: Coeficiente de Strouhal para el tipo de barra

Siendo c el grosor de la barra.

El coeficiente de Strouhal es utilizado para calcular la frecuencia de turbulencia resultante de la colocación de las rejillas en un flujo constante, por lo que, describe el

flujo de inestabilidad como resultado de una inestabilidad del flujo aguas debajo de las rejas. La frecuencia descrita se calcula con la siguiente ecuación:

$$f_s = \frac{S_t * v}{c}$$

Ecuación 23: Frecuencia inducida

Siendo,

f_s : frecuencia inducida (Hz)

S_t : coeficiente de Strouhal

v : velocidad del flujo (m/s)

c : grosor de la barra (m)

Sin embargo, el coeficiente de Strouhal puede ser mejorado por un coeficiente de seguridad:

(a+c)/c	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
F	2.15	1.70	1.40	1.20	1.05	1.01

Tabla 18: Coeficiente de seguridad para mejorar el coeficiente de Strouhal

Por lo tanto, el coeficiente de Strouhal mejorado será el producto del factor de seguridad por el coeficiente de Strouhal inicialmente.

Conocidos ya los datos anteriores, se calcula la frecuencia estructural de la barra a partir de la siguiente ecuación:

$$f_b = 3.6 * \frac{c}{3.46 * L} * \sqrt{\frac{9.81 * E}{\gamma + \frac{a}{b} * 9800}}$$

Ecuación 24: Frecuencia estructural de la barra

Siendo,

f_b : frecuencia estructural de la barra (Hz)

c : grosor de la barra (m)

L : longitud entre apoyos de las barras (m)

E : módulo de elasticidad (N/m²)

γ : peso específico de la barra (N/m³)

a : separación entre barras (mm)

b : espesor de la barra (mm)

Para que la reja sea estable tenemos que tener en cuenta que la frecuencia inducida sea menor que la resistente, si esto no ocurre es necesario modificar la longitud entre apoyos de las barras, bien introduciendo refuerzos transversales o reduciendo la longitud de la barra.

Tras calcular la reja, calcularemos los siguientes parámetros para calcular las pérdidas de carga en dicha reja.

En primer lugar, calcularemos el coeficiente de pérdidas que dependerá del tipo de sección de barra que tengamos, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Sección	cuadrada	rectangular	circular	redondeada	ovalada	triangular
k	2.4	1.8	1.8	1.7	1.0	0.8

Tabla 19: Coeficiente de pérdidas

A continuación, se debe indicar el ángulo que forma la reja con el sentido del flujo, para calcular el producto de k por los valores de la siguiente tabla:

θ (°) \ t/b	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,12	1,14	1,50
20	1,14	1,16	1,18	1,21	1,24	1,31	1,43	2,25
30	1,25	1,28	1,31	1,35	1,44	1,64	1,90	3,60
40	1,43	1,48	1,55	1,64	1,75	2,10	2,56	5,70
50	1,75	1,85	1,96	2,10	2,30	3,00	3,80	8,62
60	2,25	2,41	2,62	2,90	3,26	4,40	6,05	12,90

70	2,91	3,34	3,32	3,02	6,18	6,33	10,77	18,66
80	3,90	4,52	4,53	4,11	8,84	9,01	15,93	26,15
90	5,22	6,06	6,14	5,58	12,35	12,53	22,75	3,59

Tabla 20: coeficiente según el ángulo de la reja con el sentido del flujo

Tras calcular todos los parámetros anteriores, se calcularán las pérdidas de carga con la siguiente ecuación:

$$H_f = k * \left(\frac{t}{b}\right)^{\frac{4}{3}} * \left(\frac{v_0^2}{2 * g}\right) * \text{sen}\beta$$

Ecuación 25: Pérdidas de carga en las rejás

Siendo,

H_f : pérdidas de carga (mm)

k : coeficiente de pérdidas

θ : ángulo de incidencia

t : espesor de barras (mm)

b : separación entre barras (mm)

v_0 : velocidad del agua (m/s)

g : constante de gravedad (m/s)

β : ángulo de inclinación con la horizontal

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

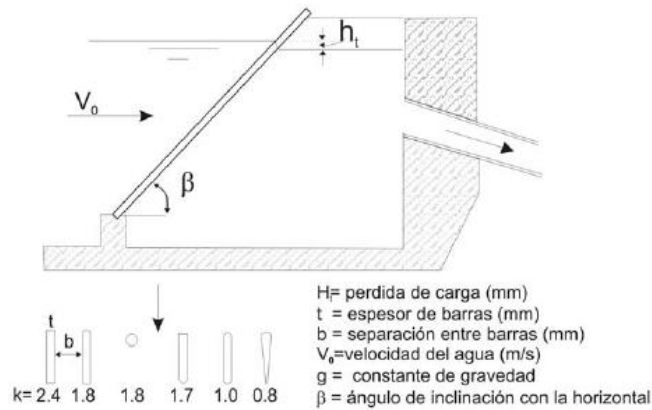


Ilustración 46: Barras de las rejas

4.2.9. Compuertas

Para las compuertas, en primer lugar, la herramienta nos da la opción de elegir el tipo de válvula entre ‘rectangular’, ‘circular’, ‘esférica’, ‘excéntrica’, ‘mariposa’ o ‘compuerta’.

Para calcular el coeficiente necesitamos saber el valor D y d tal y como aparece en la siguiente imagen.

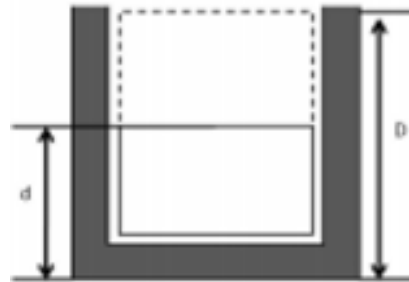


Ilustración 47: Compuertas

Una vez elegido el tipo de válvula y las dimensiones el valor que tomará el coeficiente k_v será:

- Rectangular:

d/D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1
k_v	193	44,5	17,8	8,12	4,02	2,08	0,09	0

Tabla 21: Coeficiente K_v para compuertas rectangulares

- Circular

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

d/D	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9
k_v	48	12	4,4	2,06	1,1	0,5	0,4

Tabla 22: Coeficiente K_v para compuertas circulares

- Otras válvulas

Tipo	Compuerta	Mariposa	Esférica	Excéntrica
k_v	0,20	0,60	0,05	1,00

Tabla 23: Coeficiente K_v para otro tipo de válvulas**4.2.9.1. Pérdidas de carga**

Una vez obtenido el coeficiente calcularemos las pérdidas de carga a través de la siguiente ecuación:

$$h_v = k_v * \frac{V^2}{2 * g}$$

Ecuación 26: Pérdidas de carga de las compuertas

Siendo,

h_v : pérdida de carga en una compuerta (mm)

k_v : coeficiente

V : velocidad (m/s)

g : constante de gravedad (m/s)

La herramienta pide el número de compuertas, para calcular el número de pérdidas totales, calculando el producto del número de compuertas por las pérdidas de carga de una reja, es decir:

$$k_{vT} = n^{\circ} \text{ compuertas} * k_v$$

Ecuación 27: Pérdidas de carga totales en la compuerta

Siendo,

k_{vT} : pérdidas de carga en total (mm)

n° compuertas: número total de compuertas

k_v : pérdidas de carga en una compuerta (mm)

4.2.10. Resumen

En esta pestaña de la herramienta se puede ver varias tablas con los datos finales de cada una de las pestañas que hemos descrito anteriormente.

Por lo que la herramienta Excel mostrará los materiales y dimensiones de cada parte de la obra civil de la central hidroeléctrica tras rellenar todos los datos que pide.

5. Cálculo del dimensionado de la obra civil de una central minihidráulica

En este apartado vamos a dimensionar la obra civil de una central minihidráulica.

Tras haber realizado un estudio de una antigua central hidroeléctrica (actualmente en desuso) en la cerrada de utrero, aprovecharemos para calcular su dimensionamiento civil. Algunos de los datos que el programa pide al usuario son estimados.

5.1. Datos principales

En primer lugar, introducimos los datos que se nos pide en cada casilla. Así como el nombre y localización y los primeros datos con los que la herramienta va a calcular más datos para el dimensionamiento de los elementos de la obra civil siendo el caudal de diseño que anteriormente se habrá estudiado de 6,552 m³/s, un salto bruto de 6 metros y una profundidad media del río de 2 metros.

DATOS PRINCIPALES DE LA CENTRAL MINIHIDRÁULICA		LEYENDA	
Nombre	Cerrada de Utrero	COLOR AZUL	a rellenar
Localización	A-319, 3, 23479 Cazorla, Jaén	COLOR AMARILLO	desplegable
Caudal de diseño (m ³ /s)	6,552	COLOR MORADO	autorrellenable
Salto bruto(m)	6		
Profundidad media del río (m)	2		



Alumna: María del Pilar Rodríguez Moreno
 Tutor: Prof. Dr. Blas Ogayar Fernández

Tabla 24: Datos principales de la central minihidráulica

5.2. Presa-azud

Para calcular la presa o azud se da respuesta a las preguntas que aparecen en la tabla siguiente. En este caso no tenemos creación de embalse y se tiene un caudal fuerte del río, por lo que se aprecia en la tabla que se tendrá un azud de hormigón.

 Universidad de Jaén		HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS		
SELECCIÓN DE PRESA O AZUD				
¿Creación de embalse?				
no				
Caudal del río				
fuerte				
Tipo de presa o azud				
azud de hormigón				
 escollera		 azud de hormigón	 presa de hormigón	 presa de materiales sueltos

Tabla 25: Cálculo de la presa o azud de la Central

5.3. Toma

Al igual que el apartado anterior a base de una serie de preguntas la herramienta te dice el tipo de toma que se debe instalar. Debido a que la pendiente del cauce es menor del 10% y la planta del cauce es curvo con contramedidas la toma óptima para este tipo de cauce es la toma frontal.

 Universidad de Jaén HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS		
SELECCIÓN TIPO DE TOMA		
Pendiente del cauce		
menos del 10%		
Planta del cauce		
curvo con contramedidas		
Tipo de Toma		
toma frontal		
Toma lateral	Toma frontal	Toma de montaña o Tirolesa
		

Tabla 26: Datos de la toma de la central

5.4. Desarenador

En este apartado, la herramienta ya va haciendo más cálculos numéricos con el fin de dimensionar los elementos de la obra civil de la central minihidroeléctrica.

Podemos ver el dimensionado del desarenador en función del caudal y en función de las características de las partículas



 Universidad de Jaén		HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS	
CÁLCULO DEL DESARENADOR			
CÁLCULO EN FUNCIÓN DEL CAUDAL			
Caudal de diseño (m ³ /s)		6,552	
Salto bruto(m)		6	
Diámetro de las partículas		0,6	
Ancho mínimo (m)		7	
Ancho recomendado (m)		11,5	
Longitud mínima (m)		4	
Longitud recomendada (m)		5	
Altura mínima(m)		0,9	
CÁLCULO EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA PARTÍCULA			
Diámetro máximo de partícula (mm)		0,35	
Densidad de partícula (kg/m ³)		2500	
Viscosidad cinemática del agua a 20 °C (m ² /s)		0,0000101	
Altura de desarenador recomendada (m)		2,02	
Ancho mínimo (m)		12,3136227	
Longitud mínima recomendada (m)		4,280684929	



Ilustración 48: Dimensionamiento del desarenador

5.5. Canal de derivación


En este apartado se calcula el canal de derivación. Introducimos pendiente del 0.04% y una longitud de 106 metros. Escogiendo canal rectangular y material mampostería piedra partida cementada.



Universidad
de Jaén

HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

Cálculo del canal de derivación	
caudal de diseño (m ³ /s)	6,552
pendiente (%)	0,04
longitud (m)	106
ancho (m)	5,125841767
tipo de canal	rectangular
materia	Mampostería piedra partida cementada
coeficiente de manning	0,025
z (solo rellenar en caso de que el tipo de canal sea trapezoidal)	0
superficie de la sección transversal (m ²)	543,3392273
Perímetro mojado (m)	217,1258418
Radio hidráulico (m)	2,502416216
Anchura de la parte superior (m)	5,125841767
Gradiente hidráulico	2,6751E-08
Pérdidas de carga (m)	2,8356E-06
Altura mínima (m)	0,850849433






Sección transversal del canal	Superficie de la sección transversal A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Radio hidráulico R = A / P (m)	Anchura de la parte superior B (m)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	bh	$b + 2h$	$\frac{bh}{b + 2h}$	b
	$(b + zh)h$	$b + 2h\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b + zh)h}{b + 2h\sqrt{1+z^2}}$	$b + 2zh$
	zh^2	$2h\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zh}{2\sqrt{1+z^2}}$	$2zh$

Tabla 27: Dimensionamiento del canal de derivación

5.6. Tubería forzada

Para este apartado, en primer lugar, aparecen el caudal de diseño y salto bruto calculados ya en otras pestañas anteriormente.

Ahora se escoge la longitud que se desea para la tubería forzada y el material del que se desea fabricar, en este caso se ha escogido una tubería de acero de 20 metros.

Automáticamente la herramienta calcula el coeficiente de Manning, módulo de Young y máxima carga de rotura para ese material. Además, calcula el salto útil y diámetro óptimo de la tubería forzada.

Por último, se elige el tipo de soldadura para finalizar los cálculos

Cálculo de la tubería forzada		coeficiente de manning	Módulo de young	Máxima carga de tracción admisible
Caudal de diseño (m ³ /s)	6,552			
Salto bruto (m)	6			
Longitud de la tubería forzada (m)	20			
Material de la tubería forzada	acero			
Coeficiente de Manning	0,012			
Módulo de Young (N/m ²)	2,06E+11			
Máxima carga de tracción admisible (N/m ²)	40000000			
Salto útil (m)	5,9576			
Diámetro óptimo de la tubería forzada (m)	1,300776563			
Velocidad del flujo (m/s)	4,930359653			
Tipo de soldadura	Tubería con costura soldada con protección contra tirones			
Espesor mínimo de la tubería (mm)	1,000281835			

	coeficiente de manning	Módulo de young	Máxima carga de tracción admisible
PVC	0,009	2,75E+09	1,30E+07
acero	0,012	2,06E+11	4,00E+08
fundición	0,015	7,85E+10	1,40E+08
hierro	0,015	1,67E+10	3,40E+08
polietileno	0,009	5,50E+08	5,00E+06





Ilustración 49: Dimensionamiento de la tubería forzada

5.7. Cámara de carga

En primer lugar, aparece el caudal de diseño y diámetro de la tubería forzada calculadas anteriormente.

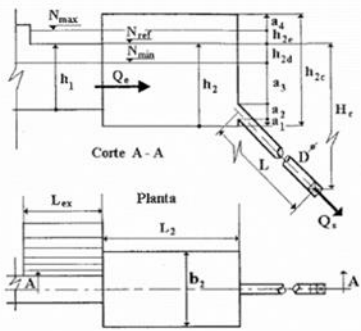
Para el cálculo del aliviadero, se ha elegido un aliviadero Creager. A partir de este se obtienen los siguientes valores.

El resto de valores se calculan automáticamente.



HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

Cálculo de cámara de carga	
Caudal de diseño (m ³ /s)	6,552
diámetro tubería forzada (m)	1,300776563
Valores de a1, a2, a3, a4	
a1 (m)	0,4
a2 (m)	1,300776563
a3 (m)	1,04062125
a4 (m)	0,4
h2 (m)	2,768811792
h2d (m)	0,613270441
h2e (m)	0,415993674
Tipo de aliviadero	
	Creager
Coeficiente de descarga kex	
	2,2
Ancho mínimo de la cámara de carga b2 (m)	
	2,366358024
Altura mínima de la cámara de carga h2c (m)	
	4,170661928
Longitud de la cámara de carga con altura y anchura mínima L2 (m)	
	120,2749886
Longitud del aliviadero Lex (m)	
	11,09995244







Ilustración 50: Dimensionamiento de la cámara de carga

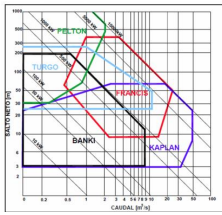
5.8. Rejas

En este apartado se calculan las rejas, así como su forma, separación e inclinación. Estas rejas se colocan a la entrada de la toma de agua y en la cámara de carga y a la entrada de la tubería forzada.



HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

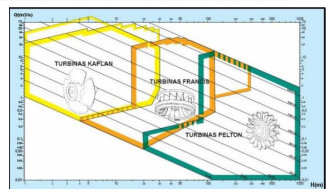

Cálculo de rejas	
Tipo de turbina	Kaplan
Sección de la barra	Rectangular
Material de la barra	Acero
Separación entre barras (m)	0,125
Grosor de las barras (m)	0,03
Longitud entre apoyos de las barras (m)	0,5
Espesor de la barra en el sentido del flujo (m)	0,084
Coefficiente de Strouhal St	0,155
(a+c)/c	5,166666667
Factor de seguridad F	1,01
Coefficiente de Strouhal modificado	0,15655
Frecuencia inducida por el flujo (Hz)	0,062926655
Módulo de elasticidad de la barra (N/m ²)	2,1E+11
Velocidad del flujo (m/s)	0,012058765
Espesor de las barras t (mm)	30
Separación entre barras b (mm)	125
Coefficiente de pérdidas	1,8
Ángulo de inclinación de la reja con respecto al fondo B	45
Ángulo de la reja con respecto al flujo 0	40
t/b	0,2
Pérdidas de carga	1,40695E-09

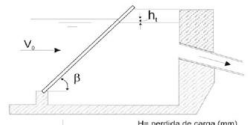


Turbine type	Kaplan	Fast Francis	Slow Francis	Pelton	Pumps as Turbines
a (m)	0.10 - 0.15	0.08 - 0.10	0.06 - 0.09	0.03 - 0.05	0.02

Type of bar	b=c	b=2.8 c	Diameter=c	b=2.8 c	b=2.8 c	b=5 c
S _t	0.130	0.155	0.200	0.255	0.265	0.275

(a+c)/c	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
F	2.15	1.70	1.40	1.20	1.05	1.01



H = pérdida de carga (mm)
 t = espesor de barras (mm)
 a = separación entre barras (mm)
 V = velocidad del agua (m/s)
 g = aceleración de la gravedad
 beta = ángulo de inclinación con la horizontal

k = 2.4 1.8 1.8 1.7 1.0 0.8

Ilustración 51: Dimensionamiento de las rejas

En primer lugar, elegimos el tipo de turbina, que mediante los ábacos se ha elegido una turbina Kaplan, ya que tenemos un caudal bajo y un salto neto no muy grande, y las barras rectangulares y de acero, separadas 0.125 m.

Como valor para el ángulo de inclinación de la reja con respecto al fondo B se ha elegido 45° mientras que para el ángulo de la reja con respecto al flujo 0 se ha seleccionado 40°.

A continuación, un resumen de cada elemento.

DATOS PRINCIPALES DE LA CENTRAL MINIHIDRÁULICA	
Nombre	Cerrada de Utrero
Localización	A-319, 3, 23479 Cazorla, Jaén
Caudal de diseño (m ³ /s)	6,552
Salto bruto(m)	6
Profundidad media del río	2

TIPO DE PRESA O AZUD
azud de hormigón

TIPO DE TOMA
toma frontal

DESARENADOR	
En función del caudal	
Ancho recomendado(m)	11,5
Largo recomendado(m)	5
Altura mínima(m)	0,9
En función de las partículas	
Ancho recomendado(m)	12,3136227
Largo recomendado(m)	4,28068493
Altura recomendada(m)	2,02

CANAL DE DERIVACIÓN	
Tipo de canal	rectangular
Material	Mampostería piedra partida cementada
Perímetro (m)	217,1258418
Redio (m)	2,502416216
Anchura (m)	5,125841767
Altura mínima (m)	2,562920884
Pérdidas de carga (m)	2,8356E-06
Longitud	106

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS

TUBERÍA FORZADA	
Longitud (m)	20
Material	acero
Díámetro (m)	1,30077656
Espesor mínimo (m)	1,00028183

CÁMARA DE CARGA	
Tipo de aliviadero	Creager
Ancho (m)	2,366358024
Alto (m)	4,170661928
Longitud (m)	120,2749886

REJAS	
Sección de la barra	Rectangular
Material de la barra	Acero
Separación de las barras (m)	0,125
Espesor de las barras (m)	30
Pérdidas de carga (m)	1,407E-09

COMPUERTAS	
nº compuertas	2
Pérdidas de carga (m)	0,00509684

6. Conclusiones

Con la herramienta diseñada en este trabajo se puede calcular de manera fácil el dimensionado de los elementos de una central minihidráulica, dando la posibilidad de elegir turbina, materiales para los distintos componentes, etc.

Esta herramienta es muy útil en el caso de que se quiera partir desde cero en una construcción de una central minihidráulica.

7. Bibliografía

- (s.f.). Obtenido de <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-hidroelectrica/instalaciones-de-obra-civil-l37032>
- (s.f.). Obtenido de <https://masqueingenieria.com/blog/tipos-de-presas-y-su-clasificacion/>
- (s.f.). Obtenido de https://hispagua.cedex.es/sites/default/files/especiales/energia_hidr/2_centrales.htm#:~:text=Centrales%20de%20agua%20embalsada&text=Suelen%20ser%20centrales%20con%20grandes,puede%20adaptar%20a%20la%20demanda.&text=En%20este%20caso%2C%20la%20central,por%2
- (s.f.). Obtenido de <https://www.energianufri.com/el-origen-de-la-energa-hidraulica#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20hidr%C3%A1ulica%2C%20conocida%20como,hidr%C3%A1ulicas%20para%20moler%20el%20grano.>
- (s.f.). Obtenido de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Minicentrales_hidroelectricas_125f6cd9.pdf
- (s.f.). Obtenido de <https://www.gipuzkoa.eus/es/web/ingurumena/energia/renovables-y-nuevos-modelos/minihidraulica>
- (s.f.). Obtenido de <https://energiahoy.com/2020/06/29/mini-centrales-hidroelectricas-en-sistemas-de-riego/>
- (s.f.). Obtenido de <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-hidroelectrica/tipos-de-centrales-hidraulicas-l37031>
- (s.f.). Obtenido de <https://blog.structuralia.com/tipologia-de-presas-ii-presas-de-materiales-sueltos>
- (s.f.). Obtenido de <https://ingnovando.com/wp-content/uploads/2020/12/MUESTRA-DESARENADOR.pdf>
- (s.f.). Obtenido de <https://www.imesa.es/productos/equipos-hidromecanicos-para-centrales-hidroelectricas/limpiarrejas/>
- (s.f.). Obtenido de <https://inagen.es/wp-content/uploads/2021/07/Ficha-Limpiarrejas.pdf>
- (s.f.). Obtenido de <https://deingenierias.com/hidroelectricas/partes-de-una-central-hidroelectrica/>
- (s.f.). Obtenido de <https://www.ceupe.com/blog/disenio-de-una-central-hidroelectrica.html>
- (s.f.). Obtenido de <https://es.slideshare.net/carolrolo/diseo-y-calculo-de-un-desarenador>
- (s.f.). Obtenido de https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708s/x6708s08.htm#:~:text=La%20pendiente%20S%20del%20fondo,S%2C%20mayor%20es%20el%20caudal%20.

- (s.f.). Obtenido de <https://www.iagua.es/respuestas/que-tipos-presas-hay>
- (s.f.). Obtenido de <https://es.slideshare.net/8angel0/camara-de-carga-central-hidroelectrica-de-pasada>
- (s.f.). Obtenido de <https://es.slideshare.net/LeninStalinZrate/calculo-de-rejas>
- (s.f.). Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4729/Mem%C3%B2ria.pdf>
- (s.f.). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Caudal_ecol%C3%B3gico
- (s.f.). Obtenido de <https://www.juanjosegarciaegocheaga.com/tecnicadiseno.html>
- (s.f.). Obtenido de <http://energyprofessionalsymposium.com/?p=36697>
- (s.f.). Obtenido de <https://es.wikiloc.com/rutas-senderismo/sierra-de-cazorla-cerrada-de-utrero-cascada-de-linarejos-23946996>
- (s.f.). Obtenido de <https://es.wikiloc.com/rutas-senderismo/embalse-de-la-cerrada-del-utrero-cascada-de-linarejos-anthercas-12998866>
- Aguila, F. c. (2020). *EL DESARENADOR*.
- Castillo, L. J. (2018). *TFG ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-FINANCIERA DE LA CENTRAL MINIHIDRAULICA "CERRADA DE UTRERO"*.
- Francisco Javier, M. (2019). *EL PROBLEMA DE LA SELECCIÓN DEL TIPO DE PRESA EN UN PROYECTO: CRITERIO Y MÉTODO EN LA TOMA DE DECISIONES*.
- IDAE. (1999). *Manuales de energías renovables, Minicentrales hidroeléctricas*.
- Ogayar Fernández, B. (2008). *TESIS DOCTORAL Análisis y desarrollo de técnicas para el aprovechamiento de recursos minihidráulicos*. . Jaén.
- Ogayar Fernández, B. (s.f.). *Minicentrales hidroeléctricas*. Jaén: JOXMAN.

MARÍA DEL PILAR RODRÍGUEZ MORENO

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONADO DE OBRA CIVIL EN
CENTRALES MINIHIDRÁULICAS