



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

HERRAMIENTA PARA EL DIMENSIONADO DE LOS ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LAS MINICENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Alumno/a: Dorado Aguilar, Rafael

Tutor/a: Prof. D. Blas Ogáyar Fernández
Dpto: Ingeniería Eléctrica

Diciembre, 2018

ÍNDICE

A.	RESUMEN	3
B.	ABSTRACT	3
C.	ESTRUCTURA	4
D.	JUSTIFICACIÓN	5
1.	Antecedentes	5
2.	Energía Hidráulica.....	10
3.	Energía Minihidráulica.....	12
4.	Objetivo	15
E.	GUÍA DE USUARIO Y CASO DE ESTUDIO	16
1.	Portada y Datos Generales	16
2.	Canal	18
3.	Rejas	19
4.	Desarenador	21
5.	Tubería Forzada.....	22
6.	Cámara de carga.....	23
7.	Resultados	24
F.	DESARROLLO SOFTWARE	25
1.	Portada y Datos Generales	25
2.	Canal	25
3.	Rejas	28
4.	Desarenador	30
5.	Tubería Forzada.....	32
6.	Cámara de Carga	35
7.	Resultados	37
G.	BIBLIOGRAFÍA	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución del consumo de energía. (Fuente: Elaboración propia).	6
Figura 2: Evolución del consumo energético mundial. (Fuente: Desenvolupament Sostenible).	7
Figura 3: Evolución de la energía suministrada a nivel mundial. (Fuente: Agencia Internacional de la Energía).	7
Figura 4: Energía suministrada a nivel mundial en el año 2010. (Fuente: Agencia Internacional de la Energía).	8
Figura 5: Evolución de la generación de energía eléctrica a nivel mundial. (Fuente: Agencia Internacional de la Energía).	11
Figura 6: Potencia hidráulica instalada en la Unión Europea en MW. (Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).	11
Figura 7: Potencia minihidráulica instalada en la Unión Europea en MW. (Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).	14
Figura 8: Capacidad minihidráulica en España. (Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).	14
Figura 9: Portada de la herramienta. (Fuente: Elaboración propia).	17
Figura 10: Datos generales, leyenda y menú de navegación. (Fuente: Elaboración propia).	18
Figura 11: Dimensionado del canal. (Fuente: Elaboración propia).	19
Figura 12: Dimensionado de las rejillas. (Fuente: Elaboración propia).	20
Figura 13: Pérdidas de carga en las rejillas. (Fuente: Elaboración propia).	20
Figura 14: Dimensionado del desarenador. (Fuente: Elaboración propia).	21
Figura 15: Dimensionado de la tubería forzada. (Fuente: Elaboración propia).	22
Figura 16: Dimensionado de la cámara de carga. (Fuente: Elaboración propia).	23
Figura 17: Resumen de resultados. (Fuente: Elaboración propia).	24
Figura 18: Valores típicos del coeficiente de Manning. (Fuente: Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica).	26
Figura 19: Parámetros hidráulicos de los canales. (Fuente: Minicentrales Hidroeléctricas).	26
Figura 20: Separación recomendada según el tipo de turbina. (Fuente: Guidelines for design of small hydropower plants).	28
Figura 21: Coeficiente de Strouhal y espesor en el sentido del flujo. (Fuente: Guidelines for design of small hydropower plants).	28
Figura 22: Factor de seguridad del coeficiente de Strouhal. (Fuente: Guidelines for design of small hydropower plants).	28
Figura 23: Pérdidas de carga en la rejilla. (Fuente: Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica).	29
Figura 24: Esquema básico de desarenador. (Fuente: Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica).	32
Figura 25: Esquema básico de cámara de carga. (Fuente: Centrais Hidrelétricas. Estudos para implantação).	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Energía suministrada a nivel mundial en el año 2016. (Fuente: Agencia Internacional de la Energía).	8
Tabla 2: Pérdida de carga adicional por ángulo de incidencia. (Fuente: Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica).	30

A. RESUMEN

En las últimas décadas se ha ido desarrollado un proceso de cambio en el sistema energético mundial. Esto ha propiciado el desarrollo de las energías renovables, que surgen como la gran solución a los problemas medioambientales actuales. 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.

Bajo este pretexto surge la necesidad de la implementación de herramientas adecuadas que permitan el diseño y análisis de estas infraestructuras. Es en este marco en el que se desarrolla este trabajo, mediante el cual se ha diseñado una herramienta informática capaz de predimensionar los elementos constituyentes de las minicentrales hidráulicas. Los valores obtenidos a partir de esta herramienta podrían utilizarse como datos de entrada para calcular la inversión y llevar a cabo el análisis de viabilidad correspondiente.

B. ABSTRACT

In the last decades the world has suffered many changes related to the global energy system. This has led to the development of renewable energies, which emerges as a great solution for existing environmental problems. In particular, the mini-hydraulic energy, which has a little environmental impact, not very high investment costs, low operating costs and even takes advantage of well-known technology; is facing a unique development opportunity.

Regarding this new situation, an implementation of adequate tools that allow the design and analysis of these infrastructures is needed. This is the scope where this document has been developed, by designing a computer tool capable of pre-dimensioning every different component of a mini-hydroelectric plant. The values obtained may be used as input data to calculate the needed investment and carry out the corresponding feasibility analysis.

C. ESTRUCTURA

En primer lugar, conviene dedicar unas pocas líneas a comentar la estructura que se ha utilizado para desarrollar el documento. Se considera que es interesante hacerlo ya que, de esta forma, se tendrá una visión global de todo el trabajo.

El documento se estructura en tres grandes bloques que se comentan a continuación:

- **D. JUSTIFICACIÓN:** En este punto se aborda la evolución del consumo energético mundial, la importancia de la energía hidráulica para el cambio hacia un sistema energético sostenible, la oportunidad que se presenta para la energía minihidráulica y el objetivo perseguido con este trabajo. Se trata, por tanto, de la justificación de este trabajo, que consiste en el desarrollo de una herramienta de cálculo para el predimensionado de minicentrales hidráulicas.
- **E. GUÍA DE USUARIO Y CASO DE ESTUDIO:** Se trata de una guía de utilización de la herramienta para el usuario final. No se entrará aquí en métodos de cálculo o procedimientos de desarrollo de la herramienta. De esta forma, el usuario final podrá recurrir directamente a este bloque para utilizar la herramienta sin necesidad de tener que analizar todo el documento.
Además, a lo largo de toda esta guía, se desarrolla un caso de estudio como ejemplo de predimensionado. El ejemplo se distingue del resto de la guía mediante la utilización de este formato de texto.
- **F. DESARROLLO SOFTWARE:** En este último bloque se abordan los métodos de cálculo utilizados por la herramienta y los procedimientos utilizados para su desarrollo. Tendrá una estructura física similar al punto anterior, pero centrándose en el desarrollo de la herramienta, no en su uso. Se estructura de esta forma para facilitar las posibles consultas en pasos concretos durante la utilización de la herramienta, en caso de que el usuario final quiera profundizar en los cálculos de alguno de los puntos.

D. JUSTIFICACIÓN

1. Antecedentes

Si se analiza la historia de la humanidad desde el punto de vista de la energía, es innegable el hecho de que todo desarrollo experimentado por la sociedad está íntimamente relacionado con el desarrollo energético. Dicho con otras palabras, no puede haber ningún tipo de evolución si no se tiene acceso a fuentes de energía.

Todos los grandes avances de la humanidad han sido posibles gracias al descubrimiento de nuevas formas de energía, o bien a nuevas formas de aprovechamiento de la misma. Si se estudian los grandes saltos tecnológicos de cualquier sociedad puede identificarse fácilmente qué cambio energético es el que lo ha propiciado. Para ilustrar esto, basta pensar en las consecuencias que tuvo el descubrimiento del fuego para el desarrollo de las primeras sociedades, el aprovechamiento de la energía eólica para la navegación, la creación de los molinos hidráulicos para la proliferación de los grandes imperios agrícolas o, muy posteriormente, la invención de la máquina de vapor que propició las grandes revoluciones industriales.

No es de extrañar, por tanto, que las sociedades busquen continuamente nuevas formas de energía y nuevos métodos para su aprovechamiento.

Sin embargo, estos grandes avances energéticos también tienen su contrapartida. Cada vez que se produce uno de estos saltos tecnológicos aumentan las necesidades energéticas, cerrando el ciclo y convirtiendo esa búsqueda, que en origen perseguía una mejora en las condiciones de vida de las personas, en algo esencial simplemente para poder mantener los avances logrados.

Este proceso se ilustra en la siguiente figura, en la que en el eje de abscisas aparecen los años desde 1965 hasta 2017, en el eje izquierdo la población mundial en millones de personas y el consumo mundial de energía primaria en millones de toneladas equivalentes de petróleo y en el eje derecho el consumo de energía en toneladas equivalentes de petróleo por habitante. Estos datos se han obtenido del *Banco Mundial* y de *British Petroleum*.

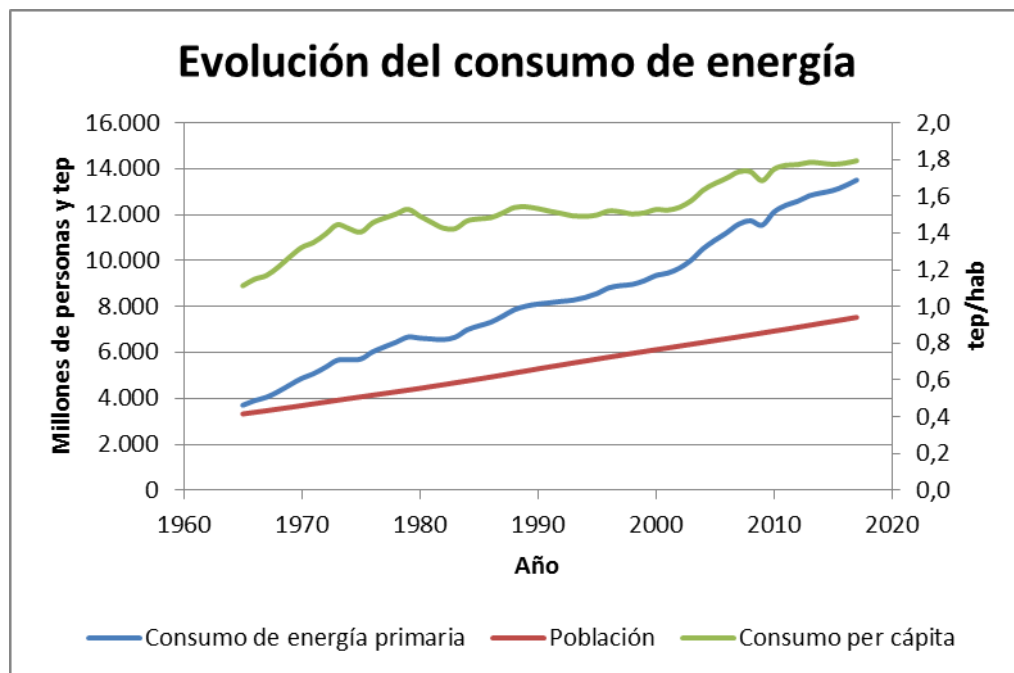


Figura 1: Evolución del consumo de energía. (Fuente: Elaboración propia).

Como se puede apreciar en la figura, el crecimiento de la población mundial se ha mantenido constante en las últimas décadas, en cambio, el consumo mundial de energía primaria crece cada vez a mayor velocidad. Se aprecia, por tanto, que no para de aumentar la cantidad de energía consumida por persona, tal y como se ha mencionado con anterioridad.

Si se consultasen datos preindustriales se apreciarían valores energéticos mucho más bajos, lo que habla del crecimiento exponencial del consumo energético asociado al desarrollo tecnológico. Como ejemplo de ello se muestra la siguiente figura, en la que se aprecia el crecimiento mencionado en torno a los años 1900 y 1940.

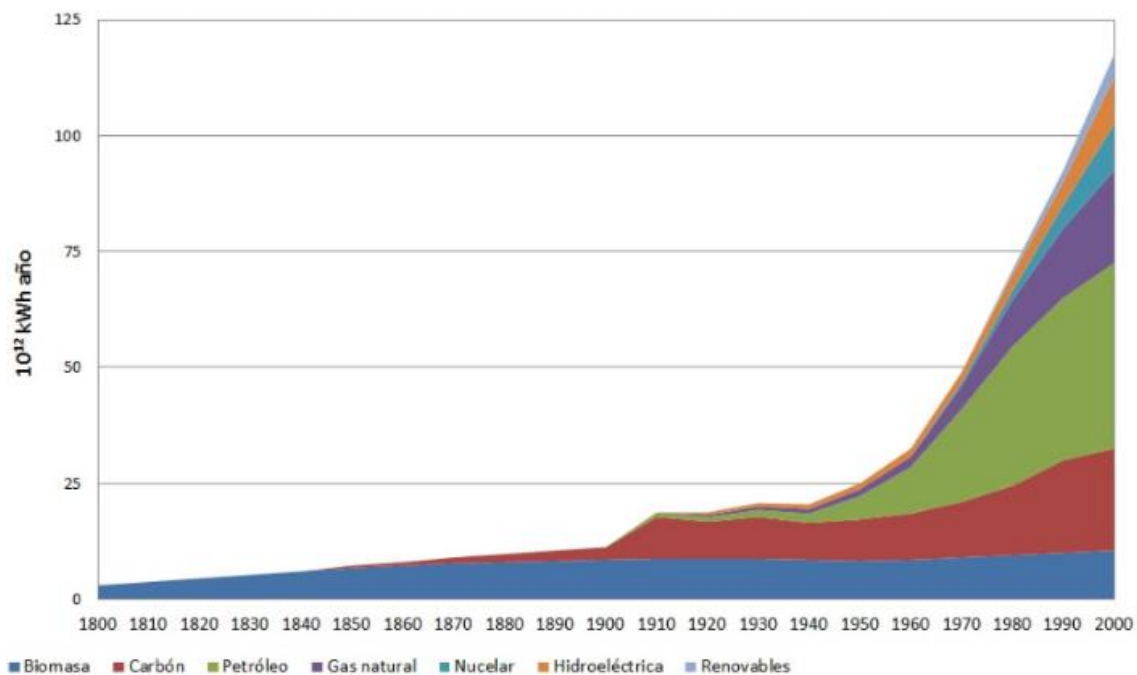


Figura 2: Evolución del consumo energético mundial. (Fuente: *Desenvolupament Sostenible*).

En sí misma, esta evolución desmedida del consumo energético no sería motivo de alarma si fuese unida al desarrollo de un sistema energético sostenible. Sin embargo, esta búsqueda de la sostenibilidad no ha hecho más que iniciarse en los últimos años, convirtiéndose en un objetivo primordial a nivel mundial.

Según datos de la Agencia Internacional de la Energía, de toda la energía producida en el año 2016, sólo el 13,98% era de origen renovable. A continuación, se representa la evolución de la energía suministrada a nivel mundial desde el año 1990 hasta el 2016 según la fuente de generación empleada.

Total Primary Energy Supply (TPES) by source*
World 1990 - 2016

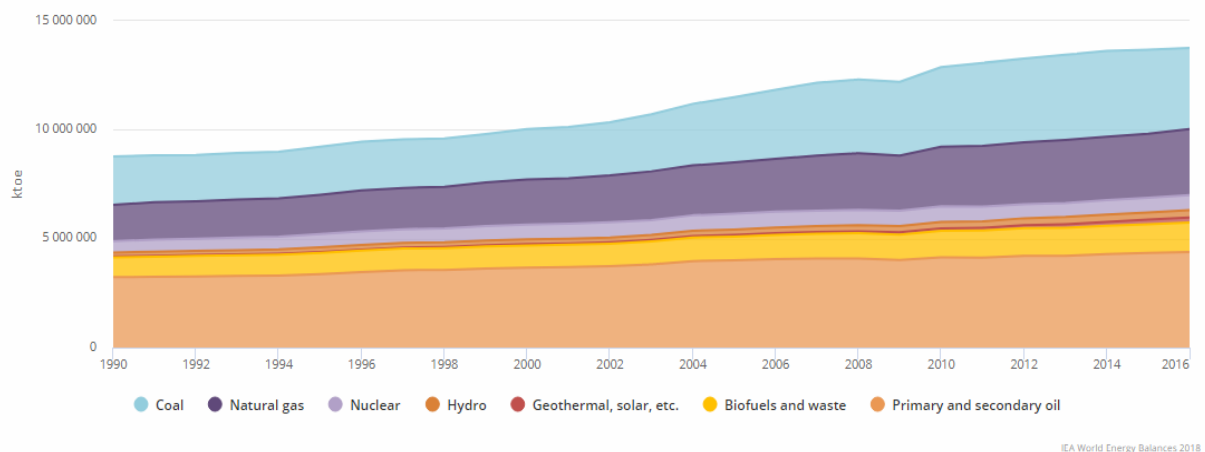


Figura 3: Evolución de la energía suministrada a nivel mundial. (Fuente: *Agencia Internacional de la Energía*).

De la figura anterior, se pueden obtener para el año 2016 los datos recogidos en la siguiente tabla:

Source	ktoe	%
Coal	3.730.886	27,11%
Natural gas	3.034.954	22,06%
Nuclear	679.649	4,94%
Hydro	349.223	2,54%
Geothermal, solar, etc.	225.627	1,64%
Biofuels and waste	1.349.289	9,81%
Primary and secondary oil	4.390.197	31,91%
Non-renewable	11.835.686	86,02%
Renewable	1.924.139	13,98%
Total	13.759.825	

Tabla 1: Energía suministrada a nivel mundial en el año 2016. (Fuente: Agencia Internacional de la Energía).

De los datos anteriores cabe destacar la aportación de los biocombustibles, los residuos y la energía hidráulica al porcentaje de energías renovables mundial.

Como comparación, se presentan los datos del año 2010 en la *figura 4*. Como se puede apreciar, la producción total de energía ha aumentado en los seis años transcurridos. Sin embargo, las políticas energéticas enfocadas a conseguir la sostenibilidad del sistema se dejan notar, pues el porcentaje de participación de los combustibles fósiles ha ido disminuyendo mientras que el de las energías renovables ha aumentado. A pesar de ello, este aumento no llega al punto porcentual, por lo que aún queda mucho camino por recorrer.

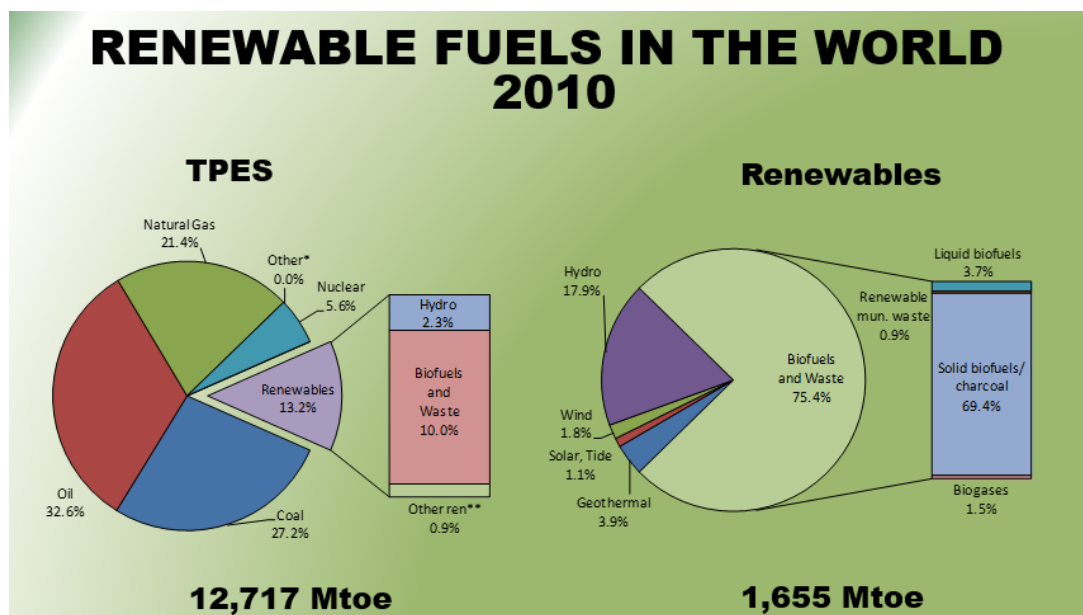


Figura 4: Energía suministrada a nivel mundial en el año 2010. (Fuente: Agencia Internacional de la Energía).

Teniendo presentes estos datos es fácil comprender la necesidad del cambio del sistema energético. Es necesario evolucionar hacia un sistema energético sostenible lo más rápidamente posible, ya que las consecuencias de mantener el esquema energético actual podrían ser desastrosas.

Es a partir de los años 80, tras la segunda crisis internacional del petróleo, cuando se inicia el proceso del cambio hacia un desarrollo sostenible. En el caso de España, este proceso se inicia con la Ley 82/1980, sobre conservación de energía, cuyos principales objetivos eran el aumento de la eficiencia energética y la reducción de la dependencia energética del exterior. Desde entonces, han sido muchos los esfuerzos para lograr este objetivo. Incluida dentro de las actuaciones más destacables está el desarrollo de distintas normativas internacionales, siendo la de referencia la normativa desarrollada a nivel europeo; La Directiva 2009/28/CE y el Paquete de Medidas sobre Clima y Energía hasta 2020.

La Directiva 2009/28/CE del parlamento europeo y del consejo de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables establece un conjunto común de normas para el uso de energías renovables en la Unión Europea con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover un transporte más limpio. Establece objetivos nacionales vinculantes para todos los países de la UE con el propósito general de lograr que las fuentes de energía renovable representen en el año 2020 el 20% de la energía de la Unión Europea y el 10% de la energía específicamente en el sector del transporte.

Esta directiva desarrolla uno de los tres objetivos 20-20-20 del Paquete de Medidas sobre Clima y Energía hasta 2020, los cuales son:

- 20% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en relación con los niveles de 1990.
- 20% de participación de las energías renovables en la Unión Europea.
- 20% de mejora de la eficiencia energética.

Estos puntos ya han sido actualizados estableciendo nuevos objetivos para el año 2030, estos se recogen en el Marco sobre Clima y Energía para 2030, dónde se establece:

- 40% de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en relación con los niveles de 1990.
- 27% de participación de las energías renovables en la Unión Europea.
- 27% de mejora de la eficiencia energética.

Gracias al desarrollo de políticas energéticas como las mencionadas, el proceso de cambio hacia un esquema energético sostenible ya se ha iniciado y empieza a hacerse notar en las estadísticas a nivel mundial.

2. Energía Hidráulica

Tal y como se menciona en el punto anterior, la energía hidráulica presenta una participación significativa en el esquema energético actual, siendo una de las representaciones más importantes en el sector de las energías renovables.

Cuando se habla de energía hidráulica se suele pensar en las grandes instalaciones hidroeléctricas, capaces de generar miles de megavatios. Estas instalaciones representan la forma habitual de aprovechamiento hidráulico, ya que se trata de una tecnología muy conocida. La realidad es que el desarrollo tecnológico ha hecho que la energía hidráulica se aproveche fundamentalmente para la generación de energía eléctrica. Los motivos principales que propician el uso de este tipo de instalaciones son los siguientes:

- El recurso es almacenable y, por tanto, gestionable. Sin embargo, al depender del ciclo del agua, presenta cierto grado de incertidumbre, por lo que es imprescindible una buena gestión de la misma.
- El agua utilizada en el proceso es reutilizable, es decir, existe la compatibilidad de usos.
- Tiene un bajo coste asociado de operación y mantenimiento, aunque el coste de inversión suele ser elevado.
- Las instalaciones tienen una larga vida útil.
- Además del aprovechamiento energético, permiten la regulación del caudal, lo que puede derivar en mejoras tales como el control frente a inundaciones o la gestión de caudales de riego.
- Es aprovechable tanto para pequeños como para grandes consumos.

Por todos estos motivos la energía hidroeléctrica es una de las energías renovables más utilizadas a nivel mundial. Volviendo a la *tabla 1*, se observa que en el año 2016 la energía hidráulica representaba el 2.54% de toda la energía primaria utilizada, alcanzando el 18.15% de participación dentro de las energías renovables. Si se atiende únicamente a la generación de energía eléctrica, la energía hidráulica representó ese mismo año un 16.65% del total, ascendiendo al 69.37% de participación dentro de las energías renovables, tal y como muestra la siguiente gráfica.

Electricity generation by fuel

World 1990 - 2016

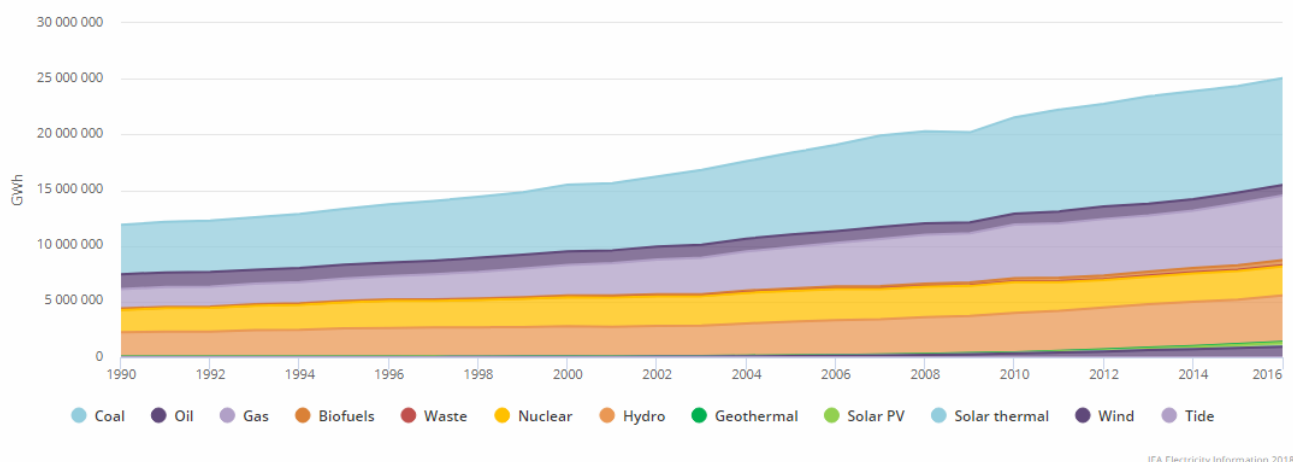


Figura 5: Evolución de la generación de energía eléctrica a nivel mundial. (Fuente: Agencia Internacional de la Energía).

La capacidad total instalada de energía hidráulica a nivel mundial, a fecha de 2016, es de 1.064 GW. En el caso concreto de España, esta cifra es de 20.353 MW para ese mismo año, lo que representa un 19,33% de la potencia total de generación eléctrica instalada en el país. En la siguiente figura se aprecia la potencia total instalada en la Unión Europea a fecha del 31 de diciembre de 2002.

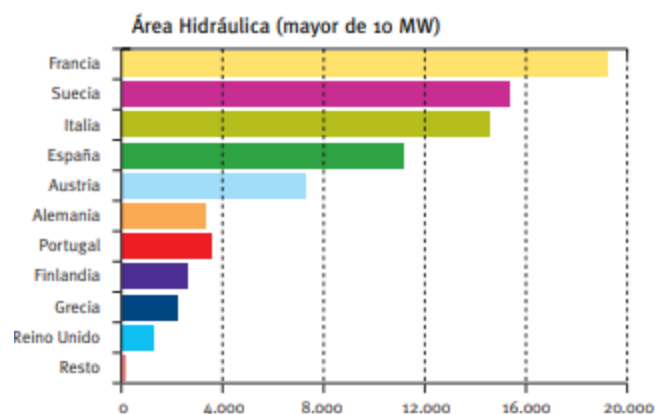


Figura 6: Potencia hidráulica instalada en la Unión Europea en MW. (Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)

A la vista de todo lo comentado con anterioridad, no es de extrañar que en los últimos años se haya apostado muy fuerte por la energía hidroeléctrica para alcanzar los objetivos establecidos y facilitar el cambio hacia un sistema energético sostenible.

3. Energía Minihidráulica

La energía hidráulica se ha englobado tradicionalmente dentro de las energías de origen renovable, sin embargo, en los últimos años, los beneficios ambientales de este tipo de instalaciones han sido motivo de discusión.

Aunque las grandes centrales hidroeléctricas, al usar una materia prima renovable y no tener asociado a su explotación ningún elemento contaminante, siguen siendo consideradas sistemas de generación de energía limpia, las nuevas políticas ambientales dificultan en extremo la instalación de nuevas centrales de gran tamaño.

El motivo principal para ello es el impacto ambiental asociado a su construcción. Las grandes instalaciones de esta tipología requieren la ocupación de grandes extensiones de terreno, que queda totalmente inundado alterando radicalmente los ecosistemas naturales y propiciando la aparición de otros nuevos que no se presentaban de forma natural. Esta alteración drástica del entorno sólo está justificada en muy contadas ocasiones en las que el objetivo principal de la instalación no es sólo la generación de energía eléctrica, sino que se persiguen otros fines relacionados con la seguridad de las personas, como por ejemplo el control de inundaciones o la seguridad en el abastecimiento de agua potable.

Todo ello ha propiciado la aparición de una nueva clasificación de las centrales hidráulicas, surgiendo así las centrales conocidas como minihidráulicas.

Como se ha visto, el motivo para esta clasificación es el impacto ambiental asociado a la construcción de las instalaciones. A su vez, dicho impacto depende del tamaño de la central y éste está relacionado con la potencia que es capaz de suministrar. Por este motivo la clasificación se basa en los rangos de potencia de las centrales.

No existe ningún consenso internacional para establecer los límites de potencia de dicha clasificación, teniendo valores muy dispares que van desde los 3 MW hasta los 12 MW para considerar una central como minihidráulica según el país en el que se encuentre. Por lo general, se puede decir que una central se considerará minihidráulica siempre que no exceda los 10 MW de potencia. Este valor es el que se ha considerado en la mayor parte de los países en los que se da esta clasificación, como son España, Irlanda o Grecia. Este mismo valor es el que establecen la Comisión Europea, la Asociación Europea de Pequeñas Hidroeléctricas (European Small Hydropower Association, ESHA) y la Unión Internacional de Productores y Distribuidores de Electricidad (International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy, UNIPED). En el caso de España este valor es adoptado a partir de la publicación del Real Decreto 2366/1994.

Las minicentrales, debido a su pequeño tamaño y menor impacto ambiental, se han convertido en una alternativa a las grandes hidroeléctricas, surgiendo nuevas instalaciones de pequeña potencia que en conjunto pueden significar un gran cambio en el sector energético.

Las principales ventajas de las minicentrales frente a las hidroeléctricas clásicas se resumen a continuación:

- Cualquier curso de agua es un punto potencial para su instalación. Se pueden instalar en pequeños cauces que serían incapaces de abastecer a instalaciones mayores, incluso pueden instalarse en canales de riego o de abastecimiento de agua potable.
- Utilizan la misma tecnología madura que las grandes centrales pero su coste de inversión es mucho menor.
- Tienen mucho menor impacto ambiental, se integran fácilmente en el entorno.

Estas ventajas han propiciado la aparición de pequeños puntos de generación eléctrica que poco a poco irán inclinando la balanza hacia un sistema de generación distribuida. En el caso de la Unión Europea, la potencia total instalada de energía minihidráulica se refleja en la siguiente figura.

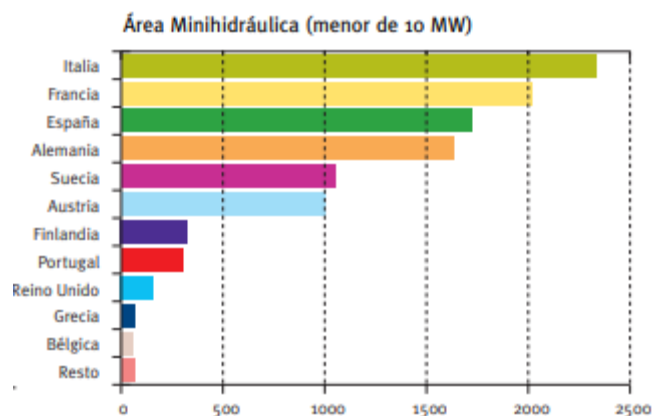


Figura 7: Potencia minihidráulica instalada en la Unión Europea en MW. (Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).

Como se puede apreciar, España ocupa el tercer lugar en cuanto a capacidad instalada, lo que habla de la oportunidad que se ha presentado en nuestro país para el desarrollo de este tipo de instalaciones. Esta potencia se encuentra distribuida por todo el territorio nacional según la figura presentada a continuación.



Figura 8: Capacidad minihidráulica en España. (Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía).

Si se analiza la situación a nivel nacional, la importancia de las minicentrales no radica en la construcción de nuevas instalaciones sino en la rehabilitación y puesta en marcha de antiguas centrales que quedaron en desuso debido a la evolución del sistema energético. Todas estas instalaciones abandonadas ya tienen contruidos sus elementos principales, por lo que sólo es necesaria su rehabilitación. Esto puede suponer un ahorro importantísimo en los costes de inversión, lo que convierte a estas instalaciones en una oportunidad única para incrementar el porcentaje de participación de las energías renovables en el sistema energético nacional.

4. Objetivo

Vista la oportunidad que se presenta para el desarrollo de las centrales minihidráulicas tanto a nivel nacional como internacional, surge la necesidad de herramientas que faciliten el análisis y diseño de este tipo de instalaciones. Bajo este pretexto, se pretende desarrollar una aplicación informática sencilla, útil, intuitiva y suficientemente precisa que facilite el diseño de las mismas.

Para el desarrollo de la aplicación se ha decidido usar el software de Microsoft Excel. La razón para su utilización es su versatilidad y su facilidad de acceso, de esta forma la aplicación será accesible al mayor número de usuarios posible.

El objetivo perseguido con esta herramienta es el predimensionado de los elementos constituyentes de las minicentrales. No se trata de la definición exacta de estos elementos, sino de una primera aproximación a sus características físicas que permita realizar una estimación de la inversión inicial e incluirla en el análisis de viabilidad.

De esta forma, la aplicación podrá ser utilizada para el predimensionado de todas aquellas centrales menores de 10 MW que se encuentren en su fase inicial de proyecto. El cálculo del coste inicial y el propio análisis de viabilidad quedan fuera del alcance de la aplicación desarrollada, pues ya existen múltiples herramientas funcionales que permiten realizar dichos cálculos.

E. GUÍA DE USUARIO Y CASO DE ESTUDIO

A lo largo de este bloque se presenta la aplicación desarrollada y se guía al usuario a través de un caso de estudio. La herramienta se estructura en un total de 8 ventanas, las cuales son:

- Portada: se presenta la herramienta, los autores y el ámbito en el que se ha desarrollado.
- Datos Generales: se define una leyenda que será válida durante todo el uso de la aplicación y se solicitan los datos generales sobre la ubicación del proyecto.
- Canal: se dimensiona el canal y se calculan las pérdidas de carga asociadas.
- Rejas: se calculan la estabilidad de las rejas utilizadas y las pérdidas de carga asociadas.
- Desarenador: se calculan las dimensiones mínimas del desarenador.
- Tubería Forzada: se define el diámetro óptimo de la tubería y se calcula su espesor mínimo en función del diámetro final utilizado y el salto útil disponible.
- Cámara de carga: se calculan las dimensiones mínimas que ha de tener y se establece su longitud y la del aliviadero en función de las dimensiones finales definidas por el usuario.
- Resultados: se presenta el resumen con todos los resultados obtenidos.

A lo largo de la guía se desarrolla un caso de estudio, que es el que se irá reflejando en las figuras presentadas. Todo lo referente a este caso de estudio se incluirá en este formato de texto para facilitar su identificación.

1. Portada y Datos Generales

Al iniciar la herramienta de cálculo se abre la siguiente ventana en la que se muestran las características generales de la misma. Una vez en esta ventana basta pulsar en *INICIAR DIMENSIONADO* para ponerla en funcionamiento.



Figura 9: Portada de la herramienta. (Fuente: Elaboración propia).

En la siguiente ventana se introducirán los datos generales de la central, que servirán de base para realizar todos los cálculos posteriores. En esta misma ventana aparece una pequeña leyenda que indica a qué se refiere cada color utilizado. Por último, a la derecha de la ventana, aparece un menú de navegación. Este menú acompañará al usuario durante su uso de la herramienta, siempre en la esquina superior derecha de la ventana.

Se recomienda avanzar por los menús siempre de arriba hacia abajo sin saltarse ningún punto, ya que algunos de ellos utilizan cálculos de menús previos para el análisis y saltarse alguno podría derivar en algún error en la herramienta. No obstante, estos errores serán notificados y se puede retroceder en cualquier momento a menús anteriores para subsanarlos o modificar los datos introducidos.

DATOS GENERALES DE LA MINICENTRAL		
Nombre de la minicentral hidráulica	Central Ejemplo Guía	Portada Datos generales Canal Rejas Desarenador Tubería forzada Cámara de carga Resultados
Localización	España	
Río	Innominado	
Caudal de diseño (m³/s)	1	
Salto bruto (m)	12	
Leyenda:		
Datos a introducir		
Menú desplegable		
Datos obtenidos de otras pestañas		
Cálculos intermedios		
Resultados		

Figura 10: Datos generales, leyenda y menú de navegación. (Fuente: Elaboración propia).

Como se puede apreciar en la imagen, se han introducido ya los datos a modo de ejemplo.

En este caso se trata de una central de ejemplo en un río cualquiera de España del que se puede extraer para turbinar un caudal de 1 m³/s con un salto bruto de 12 m.

Una vez completados estos datos se pasa al siguiente menú, en el que se dimensiona el canal.

2. Canal

En esta ventana se calcula el calado que alcanzará la lámina de agua en función de los datos introducidos y de la geometría y el material del canal a realizar.

La aplicación permite seleccionar canales rectangulares, circulares o trapezoidales de materiales muy diversos. En el caso de los canales trapezoidales permite elegir entre una variedad limitada de taludes, encontrándose sólo los más habituales. En cuanto al material a emplear, la aplicación cuenta con más variedad y con la posibilidad de emplear otros distintos no contemplados simplemente introduciendo su número de Manning correspondiente. Con estos datos, la aplicación calcula el calado, la velocidad del flujo, las pérdidas de carga y la altura mínima recomendada para el canal.

En el caso de estudio se empleará un canal trapezoidal de hormigón sin terminar y con un talud de 1,5:1. La pendiente del canal será la recomendada del 0,04% y tendrá una longitud total de 200 m con un ancho de 1,5 m en la base. Con los datos introducidos se obtiene un calado de 0,631 m, una velocidad de 0,744 m/s, unas pérdidas de carga totales de 0,105 m y se recomienda una altura mínima para el canal de 0,831 m.

En ocasiones la aplicación arroja algún tipo de error en este punto. Este problema se soluciona modificando la geometría del canal y pulsando sobre el botón recalcular. Si se quiere saber más sobre el motivo de este tipo de error se debe consultar el punto correspondiente de la sección F. (Sección F. DESARROLLO SOFTWARE punto 2. Canal).

CANAL	
Caudal de diseño (m ³ /s)	1,00
Pendiente (%)	0,04%
Longitud (m)	200
Ancho (m)	1,5
Tipo de canal	Trapezoidal
Material	Hormigón sin terminar
Manning	0,017
Talud	1.5:1
z	1,5
Calado estimado (m)	0,631
Calado (m)	0,631
Área (m ²)	1,344
Radio hidráulico (m)	0,409
Velocidad (m/s)	0,744
Pérdidas por metro (m/ml)	0,001
Pérdidas totales (m)	0,105
Altura mínima recomendada (m)	0,831

Recalcular

Portada

Datos generales

Canal

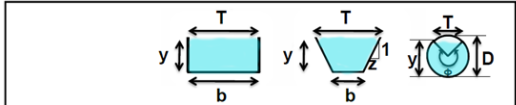
Rejas

Desarenador

Tubería forzada

Cámara de carga

Resultados



	Rectangular	Trapezoidal	Circular
Área A	by	$(b + zy)y$	$\frac{1}{8}(\phi - \text{sen}\phi)D^2$
Perímetro mojado P	$b + 2y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{1}{2}\phi D$
Ancho en Superficie T	b	$b + 2zy$	$2\sqrt{y(D - y)}$
Radio Hidráulico R	$\frac{by}{b + 2y}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\phi}{\phi}\right)D$

Figura 11: Dimensionado del canal. (Fuente: Elaboración propia).

3. Rejas

En una infraestructura de esta tipología se hace necesaria la instalación de distintos tipos de rejas para impedir el paso de elementos que podrían causar daños en las instalaciones. En esta ventana se facilita el dimensionado de las mismas.

La aplicación permite al usuario indicar la separación entre las rejas o bien seleccionar la separación recomendada en función del tipo de turbina empleado. Además, se selecciona la geometría de la barra a emplear y se indica si es de acero u otro material. En este último caso se debe indicar el peso específico y el módulo de elasticidad de dicho material. Por último, se indica la separación entre los apoyos de las barras y el grosor de las mismas.

Con estos datos la aplicación lleva a cabo un cálculo de resistencia e indica si la reja es estable bajo esas condiciones o si se debe modificar, por ejemplo, la separación entre los apoyos de las barras.

En el caso de estudio se ha seleccionado la separación recomendada para las turbinas tipo Pelton, barras ovaladas de acero, grosor de 0,02 m y separación entre apoyos de 0,5 m. Bajo estas condiciones la reja resulta estable.

Una vez hecho esto, la herramienta calcula la pérdida de carga asociada a la reja. Para ello, el usuario debe introducir el ángulo de inclinación de la reja con respecto al fondo y el ángulo de la reja con respecto a la dirección del flujo, entendiendo que un ángulo de 0° indica que la reja es totalmente perpendicular al flujo.

En el ejemplo se han supuesto 45° con respecto al fondo y 40° con respecto al flujo, obteniendo unas pérdidas de carga de 0,00001 m.

REJAS	
Separación entre barras	Recomendada
Tipo de turbina	Pelton
Tipo de barra	Sección ovalada
Material de la barra	Acero
Separación entre barras a (m)	0,04
Grosor de las barras c (m)	0,02
Longitud entre apoyos de las barras (m)	0,5
Espesor de la barra en el sentido del flujo b (m)	0,056
Coefficiente de Strouhal S_s	0,265
(a+c)/c	3
Factor de seguridad F	1,2
Coefficiente de Strouhal modificado	0,318
Frecuencia inducida por el flujo (Hz)	11,829
Módulo de elasticidad de la barra (N/m ²)	2,10E+11
Peso específico de la barra (N/m ³)	78.000
Frecuencia estructural de la barra (Hz)	191,21
La frecuencia inducida por el flujo no afecta a la capacidad resistente de la reja.	

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=5 c
S_s	0.130	0.155	0.200	0.255	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

Portada

Datos generales

Canal

Rejas

Desarenador

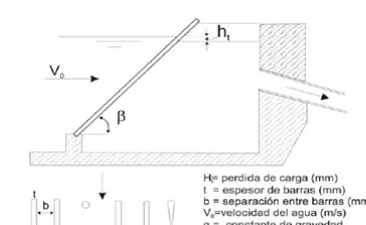
Tubería forzada

Cámara de carga

Resultados

Figura 12: Dimensionado de las rejas. (Fuente: Elaboración propia).

Pérdidas de carga	
Velocidad del flujo v_a (m/s)	0,744
Espesor de las barras t (mm)	20
Separación entre barras b (mm)	40
Coefficiente de pérdidas k	1
Ángulo de inclinación de la reja con respecto al fondo β (°)	45
Ángulo de la reja con respecto al flujo θ (°)	40
t/b	0,5
Pérdidas de carga en reja perpendicular al flujo H_t (m)	7,92E-06
Pérdidas de carga en reja teniendo en cuenta la posición $Ht\theta$ (m)	1,48829E-05



H_t = pérdida de carga (mm)

t = espesor de barras (mm)

b = separación entre barras (mm)

V_a = velocidad del agua (m/s)

g = constante de gravedad

β = ángulo de inclinación con la horizontal

k = 2.4 1.8 1.7 1.0 0.8

Figura 13: Pérdidas de carga en las rejas. (Fuente: Elaboración propia).

4. Desarenador

El siguiente elemento a dimensionar es el desarenador. Este elemento facilita la eliminación de sólidos en suspensión que podrían dañar la turbina si llegaran a ella.

Para su dimensionado, lo primero es seleccionar el diámetro máximo de partícula permitido. La aplicación permite utilizar los valores recomendados, que dependen del salto bruto disponible, o bien que el usuario indique valores concretos. También es necesario indicar la densidad de las partículas y la viscosidad cinemática del agua, o utilizar los valores por defecto. Una vez introducidos estos datos, se da la opción de indicar una profundidad para el desarenador o tomar el valor recomendado. Con estos datos la aplicación devuelve los valores mínimos para el ancho y la longitud del desarenador.

En el caso de estudio se han seleccionado los valores recomendados para todos los parámetros excepto para la profundidad, que se ha establecido en 1,2 m. Bajo estas condiciones se obtienen un ancho y una longitud del desarenador de 5,191 m y 14,083 m respectivamente.

DESARENADOR	
Caudal de diseño (m^3/s)	1
Salto bruto (m)	12
Calado (m)	0,631
Diámetro máximo de partícula	Recomendado
Densidad de partícula	Habitual
Viscosidad cinemática del agua	Habitual
Diámetro máximo de partícula (mm)	0,13
Densidad de partícula (kg/m^3)	2500
Viscosidad cinemática del agua a 20 grados centígrados (m^2/s)	1,01E-06
k_p	3,165
Velocidad de sedimentación (m/s)	0,014
k_e	44
Velocidad de arrastre (m/s)	0,161
Profundidad del desarenador	Otra
Profundidad del desarenador (m)	1,2
Ancho mínimo (m)	5,191
Tiempo de sedimentación (s)	87,726
Longitud mínima recomendada (m)	14,083

Portada

Datos

Canal

Rejas

Desarenador

Tubería

Cámara de carga

Resultados

Figura 14: Dimensionado del desarenador. (Fuente: Elaboración propia).

5. Tubería Forzada

Se trata de uno de los elementos principales de este tipo de instalaciones. Para su dimensionado basta con indicar la longitud que tendrá la tubería desde la cámara de carga hasta la turbina y seleccionar el material en el que se realizará. En el caso de realizarse en otro material distinto a los disponibles en la aplicación, se pedirá, además, el coeficiente de Manning, el módulo de Young y la carga de tracción admisible de dicho material.

Con estos datos, la herramienta calcula un diámetro óptimo teniendo en cuenta coste y pérdidas de carga. Este valor sirve al usuario para definir el diámetro final de la tubería forzada, que será utilizado por la aplicación para calcular el espesor mínimo que habrá de tener.

En el caso de estudio se utilizará una tubería de acero soldado de 30 metros de longitud. De esta forma, el diámetro óptimo resulta ser 0,609 m, por lo que se define un diámetro de tubería de 0,6 m. Para este diámetro final de tubería la aplicación devuelve un espesor mínimo de 5,04 mm.

Al igual que en el caso del cálculo del canal, bajo ciertas condiciones se producen errores en este punto. Para solucionarlos basta con introducir todos los datos y pulsar sobre el botón de *Recalcular*. Si se quieren conocer los detalles sobre este tipo de error se debe consultar el punto correspondiente de la sección F. (sección F. DESARROLLO SOFTWARE punto 5. Tubería Forzada).

TUBERÍA FORZADA	
Caudal de diseño (m³/s)	1
Salto bruto (m)	12
Longitud de la tubería forzada (m)	30
Material de la tubería forzada	Acero soldado
Coeficiente de Manning	0,012
Módulo de Young (N/m²)	2,08E+11
Máxima carga de tracción admisible (N/m²)	4,00E+08
Salto útil (m)	11,92
Diámetro óptimo de la tubería forzada (m)	0,609
Diámetro final de la tubería forzada (m)	0,6
Velocidad del flujo (m/s)	3,537
Espesor estimado de la tubería forzada (mm)	3,39
Velocidad de la onda de presión estimada (m/s)	868,01
Incremento de presión (m.c.a)	312,941
Espesor mínimo por golpe de ariete (mm)	3,39
Espesor mínimo de la tubería forzada (mm)	5,04

Portada

Datos generales

Canal

Rejas

Desarenador

Tubería forzada

Cámara de carga

Resultados

Recalcular

Figura 15: Dimensionado de la tubería forzada. (Fuente: Elaboración propia).

6. Cámara de carga

Este es el último elemento con el que trabaja la aplicación. Para su dimensionado basta con introducir los valores a_i de alturas de la cámara de carga o dejar que trabaje con los recomendados. Se establece también el tipo de aliviadero a utilizar seleccionando uno de los disponibles o indicando el coeficiente de descarga de cualquier otro aliviadero considerado.

La herramienta devuelve los valores mínimos del ancho y el alto y la longitud que la cámara de carga tendría si se mantuvieran esos valores mínimos. A partir de ellos, el usuario puede definir el ancho y el alto final de la misma, con lo que la aplicación calcula su longitud final y la longitud del aliviadero.

En el caso de estudio se trabaja con los valores recomendados de a_i y un aliviadero tipo Creager. Con estos datos se obtienen un ancho y un alto mínimos de 0,619 m, y 2,499 m respectivamente, lo que conllevaría una longitud de 77,586 m. Teniendo en cuenta que no es viable este tipo de construcción y que la aplicación sólo define los valores mínimos se decide ampliar las dimensiones de ancho y alto fijándolas en 4 m y 3 m, lo que daría lugar a una longitud de 10 m. En cuanto a la longitud del aliviadero ésta será de 2,537 m.

CÁMARA DE CARGA		
Caudal de diseño (m^3/s)		1,00
Diámetro de la tubería forzada (m)		0,6
Valores de a_i		Recomendados
a_1 (m)		0,4
a_2 (m)		0,6
a_3 (m)		0,6
a_4 (m)		0,4
h_2 (m)		1,616
h_{2d} (m)		0,182
h_{2e} (m)		0,318
Tipo de aliviadero		Creager
Coeficiente de descarga k_{ex}		2,2
Ancho mínimo de la cámara de carga b_2 (m)		0,619
Altura mínima de la cámara de carga h_{2c} (m)		2,499
Longitud de la cámara de carga con altura y anchura mínima L_2 (m)		77,586
Ancho final de la cámara de carga (m)		4
Altura final de la cámara de carga (m)		3
Longitud del aliviadero L_{ex} (m)		2,537
Longitud final de la cámara de carga (m)		10,000

Portada

Datos generales

Canal

Rejas

Desarenador

Tubería forzada

Cámara de carga

Resultados

Valores recomendados de a_i :

$0,3 < a_1 < 0,5$

$a_2 = D$

$0,5 \cdot D < a_3 < 1,5 \cdot D$

$0,3 < a_4 < 0,5$

Corte A - A

Planta

Figura 16: Dimensionado de la cámara de carga. (Fuente: Elaboración propia).

7. Resultados

En esta ventana simplemente se realiza un compendio de todos los resultados e hipótesis que se han obtenido y definido en el transcurso del predimensionado. Los resultados principales serán las dimensiones calculadas para cada uno de los elementos constituyentes de la minicentral hidráulica. También se recogen otros datos utilizados como el material del que se instalarán los distintos elementos o las pérdidas de carga calculadas.

Las dimensiones definidas podrán servir posteriormente para estimar el coste de inversión e introducir estos datos en un modelo financiero para realizar el análisis de viabilidad de la minicentral estudiada.

Para finalizar el caso de estudio, se resumen todos los resultados obtenidos durante el proceso.

RESUMEN DE RESULTADOS

DATOS GENERALES	
Nombre de la minicentral hidráulica	Central Ejemplo Guía
Localización	España
Río	Innominado
Caudal de diseño (m³/s)	1.00
Salto bruto (m)	12.000

CANAL	
Pendiente (%)	0.04%
Longitud (m)	200
Ancho (m)	1.5
Tipo de canal	Trapezoidal
Material	Hormigón sin terminar
Calado (m)	0.631
Velocidad del flujo (m/s)	0.744
Pérdidas por metro (m/ml)	0.001
Altura mínima recomendada (m)	0.831
Pérdidas totales (m)	0.105

REJAS	
Separación entre barras a (m)	0.04
Tipo de barra	Sección ovalada
Material de la barra	Acero
Grosor de las barras c (m)	0.02
Longitud entre apoyos de las barras (m)	0.5
Ángulo de inclinación de la reja con respecto al fondo $\beta(^{\circ})$	45
Ángulo de la reja con respecto al flujo $\theta(^{\circ})$	40
Pérdidas de carga en reja perpendicular al flujo H_r (m)	7.92E-06
Pérdidas de carga en reja teniendo en cuenta la posición $H_{t\theta}$ (m)	1.48829E-05

La frecuencia inducida por el flujo no afecta a la capacidad resistente de la reja.

DESARENADOR	
Diámetro máximo de partícula (mm)	0.13
Densidad de partícula (kg/m³)	2500
Viscosidad cinemática del agua (m²/s)	0.0000101
Profundidad del desarenador (m)	1.200
Ancho mínimo (m)	5.191
Tiempo de sedimentación (s)	87.726
Longitud mínima recomendada (m)	14.083

TUBERÍA FORZADA	
Longitud de la tubería forzada (m)	30
Material de la tubería forzada	Acero soldado
Salto útil (m)	11.92
Diámetro óptimo de la tubería forzada (m)	0.609
Diámetro final de la tubería forzada (m)	0.6
Velocidad del flujo (m/s)	3.537
Espesor mínimo de la tubería forzada (mm)	5.04

CÁMARA DE CARGA	
Ancho mínimo de la cámara de carga b_2 (m)	0.619
Altura mínima de la cámara de carga h_{2c} (m)	2.499
Ancho final de la cámara de carga (m)	4
Altura final de la cámara de carga (m)	3
Longitud final de la cámara de carga (m)	10
Tipo de aliviadero	Creager
Longitud del aliviadero L_{av} (m)	2.537

Portada

Datos generales

Canal

Rejas

Desarenador

Tubería forzada

Cámara de carga

Resultados

Portada
Datos generales
Canal
Rejas
Desarenador
Tubería forzada
Cámara de carga
Resultados

Figura 17: Resumen de resultados. (Fuente: Elaboración propia).

F. DESARROLLO SOFTWARE

En este punto se entra en el detalle de los cálculos realizados por la aplicación. Se muestran, por tanto, todas las fórmulas utilizadas y se explican los procedimientos de cálculo seguidos. Es necesario destacar que la mayor parte de las fórmulas aquí descritas se han implementado en la aplicación utilizando las unidades del Sistema Internacional de Unidades, especificando en los casos en los que no ha sido así las unidades utilizadas en cada uno de los parámetros.

Por otra parte, para el desarrollo de esta herramienta se han utilizado como guías las siguientes publicaciones:

- Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica.
- Guidelines for design of small hydropower plants.
- Centrais Hidrelétricas. Estudos para implantação.

En caso de necesitar información adicional sobre los procedimientos de cálculo utilizados, basta consultar estas publicaciones, recogidas en el punto *G. BIBLIOGRAFÍA*.

1. Portada y Datos Generales

En estas ventanas iniciales no se entra en ningún tipo de cálculo, sino que se presenta la interfaz y el menú de navegación. Este menú se ha programado mediante macros para facilitar la navegación entre las distintas ventanas de la aplicación.

2. Canal

Al dimensionar el canal la herramienta permite elegir entre las geometrías básicas; rectangular, trapezoidal y circular, limitando los taludes del canal trapezoidal a los habituales. También se debe seleccionar el material empleado o definir el número de Manning del material a emplear. Los materiales contemplados por la aplicación se resumen en la siguiente imagen.

Revestimiento del canal	mínimo	normal	máximo
a. Acero liso			
1. Sin pintar	0,011	0,012	0,014
2. Pintado	0,012	0,013	0,017
b. Cemento			
1. Limpio en la superficie	0,010	0,011	0,013
2. Con mortero	0,011	0,013	0,015
c. Madera			
1. Cepillada sin tratar	0,011	0,012	0,014
2. Cepillada creosotada	0,011	0,012	0,015
3. Planchas con listones	0,012	0,015	0,018
d. Hormigón			
1. Terminado con lechada	0,013	0,015	0,016
2. Sin terminar	0,014	0,017	0,020
3. Gunitado	0,016	0,019	0,023
e. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0,017	0,025	0,030
2. Piedra partida suelta	0,023	0,032	0,035
3. Fondo cemento, lados son rip rap	0,020	0,030	0,035
f. De tierra recto y uniforme			
1. Limpio, terminado recientemente	0,016	0,018	0,020
2. Limpio con cierto uso	0,018	0,022	0,025
3. Con musgo corto, poca hierba	0,022	0,027	0,033

Figura 18: Valores típicos del coeficiente de Manning. (Fuente: Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica).

Una vez definidas las características geométricas básicas, la aplicación calcula la altura que alcanzará la lámina de agua, es decir, el calado, y los parámetros hidráulicos principales, que se reflejan en la siguiente imagen.

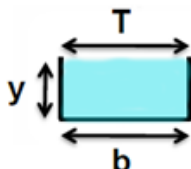
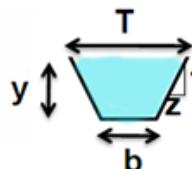
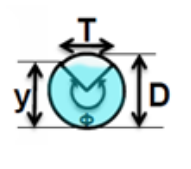
			
Área A	by	$(b + zy)y$	$\frac{1}{8}(\phi - \text{sen}\phi)D^2$
Perímetro mojado P	$b + 2y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{1}{2\phi D}$
Ancho en Superficie T	b	$b + 2zy$	$2\sqrt{y(D - y)}$
Radio Hidráulico R	$\frac{by}{b + 2y}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\text{sen}\phi}{\phi}\right)D$

Figura 19: Parámetros hidráulicos de los canales. (Fuente: Minicentrales Hidroeléctricas).

Para realizar estos cálculos se utiliza la fórmula de Manning, que se presenta a continuación respetando la simbología de la imagen previa:

$$S = \left(\frac{Q \cdot n \cdot P^{2/3}}{A^{5/3}} \right)^2 = \left(\frac{Q \cdot n}{A \cdot R^{2/3}} \right)^2 ;$$

siendo n el número de Manning, Q el caudal y S la pendiente.

Esta fórmula se ha implementado en la aplicación mediante un cálculo iterativo, en el que se parte de un calado estimado, se calculan los parámetros hidráulicos a partir de él y se comprueba el calado obtenido. En el caso de que coincida con el estimado termina la iteración, en otro caso se reinicia el proceso con el nuevo calado obtenido.

Este cálculo iterativo plantea algunos problemas. El primero de ellos es que, en algunos casos, al modificar los datos de entrada se interrumpe el cálculo y no es capaz de reiniciarse. Por este motivo se ha implementado una macro que reinicia el proceso. Para ello basta con pulsar en el botón de *Recalcular* presente en esta ventana tras modificar los datos de entrada.

El otro gran problema que se presenta es el número de iteraciones necesarias para llegar a un resultado preciso. Por lo general, la herramienta funciona bastante bien y es capaz de llegar al resultado en pocas iteraciones, sin embargo, en algunos casos, el número de iteraciones necesarias aumenta drásticamente. Esto ocurre en canales de geometrías estrechas, en los que pequeños cambios en el caudal implican un gran cambio en el calado, y en canales trapezoidales de taludes muy tendidos, en los que es difícil llegar a una solución precisa al variar ínfimamente el calado con el caudal.

En estos casos el programa arroja un error debido a que se llega al límite de iteraciones y no se alcanza un resultado lo suficientemente preciso. La forma de solucionarlo es modificar la geometría del canal y reiniciar el cálculo pulsando sobre el botón *Recalcular*.

Por otro lado, este software permite modificar el número de iteraciones permitidas. Sin embargo, se ha mantenido el valor establecido por defecto, pues si se aumenta este valor el tiempo dedicado al proceso podría ser demasiado elevado, llegando incluso a bloquear la aplicación si se requiriera demasiada potencia de cálculo.

En el caso de necesitar un cálculo preciso de estos parámetros se recomienda acudir a otro tipo de software especializado con mayor potencia de cálculo, como son FlowPro, HCanales o CalCol.

Una vez obtenido el calado, la aplicación lo utiliza para calcular la velocidad del flujo, las pérdidas de carga y la altura mínima recomendada para el canal.

3. Rejas

En el caso del dimensionado de las rejas lo primero es definir la separación entre las barras a . Se puede indicar una separación concreta o bien acudir a la separación recomendada en función del tipo de turbina utilizado.

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

Figura 20: Separación recomendada según el tipo de turbina. (Fuente: Guidelines for design of small hydropower plants).

El siguiente paso es definir el grosor c y el tipo de barra a instalar. Cada tipología tiene asociado un espesor b en el sentido del flujo en función del grosor definido, un coeficiente de Strouhal S_t y un coeficiente de pérdidas de carga.

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

Figura 21: Coeficiente de Strouhal y espesor en el sentido del flujo. (Fuente: Guidelines for design of small hydropower plants).

El coeficiente de Strouhal se puede utilizar para calcular la frecuencia inducida por el flujo sobre la barra según lo siguiente:

$$fs = \frac{S_t \cdot v}{c}; \quad \text{donde } v \text{ es la velocidad del flujo.}$$

Sin embargo, el coeficiente de Strouhal debe ser mayorado por un coeficiente de seguridad, el cual se muestra en la figura 19.

(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

Figura 22: Factor de seguridad del coeficiente de Strouhal. (Fuente: Guidelines for design of small hydropower plants).

Una vez conocida la frecuencia inducida por el flujo se calcula la frecuencia estructural de la barra según:

$$fb = 3,6 \cdot \frac{c}{3,46 \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{9,81 \cdot E}{\gamma + \frac{a}{b} \cdot 9.800}};$$

siendo L la longitud entre apoyos de las barras y E y γ el módulo de elasticidad y el peso específico de la barra respectivamente.

Si la frecuencia inducida es menor que la resistente la reja es estable, en cambio, si ocurre lo contrario, será necesario modificar la distancia L bien introduciendo refuerzos transversales intermedios o bien reduciendo la longitud total de la barra para evitar fenómenos de inestabilidad en las mismas.

Una vez dimensionada la reja, la aplicación calcula las pérdidas de carga relacionadas con la misma. Para ello tiene en cuenta el coeficiente de pérdidas k asociado al tipo de barra y calcula las pérdidas según lo reflejado en la *figura 20* y la fórmula presentada a continuación.

$$H_f = k \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{4/3} \cdot \left(\frac{V_0^2}{2 \cdot g}\right) \cdot \text{seno}\beta;$$

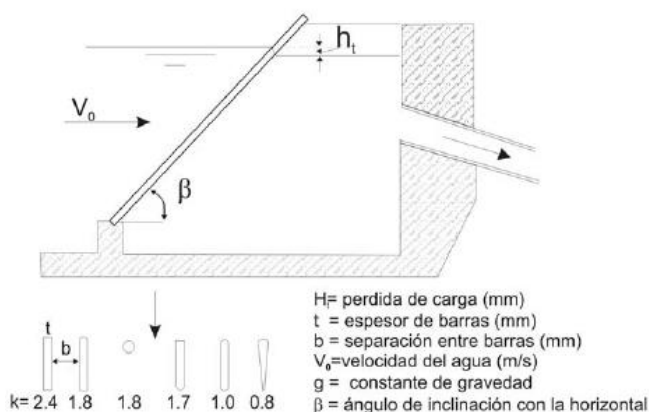


Figura 23: Pérdidas de carga en la reja. (Fuente: Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica).

En el caso de que la reja no sea perpendicular al sentido del flujo, sino que forme un ángulo θ con él, se propone multiplicar el valor obtenido por los valores recogidos en la próxima tabla. Se entiende aquí que si la reja es perpendicular al flujo el ángulo valdrá 0 mientras que si se trata de una toma lateral será de 90°.

$\theta(^{\circ}) \setminus t/b$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,4	0,3	0,2
0	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1,06	1,07	1,08	1,09	1,1	1,12	1,14	1,5
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	1,9	3,6
40	1,43	1,48	1,55	1,64	1,75	2,1	2,56	5,7
50	1,75	1,85	1,96	2,1	2,3	3	3,8	8,62
60	2,25	2,41	2,62	2,9	3,26	4,4	6,05	12,9
70	2,91	3,34	3,32	3,02	6,18	6,33	10,77	18,66
80	3,9	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	35,59

Tabla 2: Pérdida de carga adicional por ángulo de incidencia. (Fuente: Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica).

4. Desarenador

Para el dimensionado del desarenador lo primero que se establece es el diámetro máximo de partícula permitido. Este vendrá determinado por la capacidad erosiva de las partículas frente a la turbina utilizada.

Como norma general puede decirse que el diámetro máximo permitido será de 0,35 mm si el salto bruto es menor de 10 m, 0,13 mm si está entre 10 y 100 m o 0,03 mm si es superior a 100 m. La aplicación puede utilizar estos valores por defecto o bien el indicado por el usuario.

Además, es necesario indicar la densidad de la partícula y la viscosidad cinemática del agua. En el caso de que se usen los valores por defecto utilizará una densidad de 2.500 kg/m³ y la viscosidad cinemática del agua a 20°C.

A partir de estos datos, la herramienta calcula el parámetro k_p que sirve, posteriormente, para calcular la velocidad de sedimentación de estos sólidos en suspensión. A continuación se presentan las fórmulas utilizadas para calcular dicho parámetro y la velocidad de sedimentación en función del valor de éste.

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

$$k_p < 3,3; \quad v_s = \frac{\left(\frac{\rho}{1000} - 1 \right) \cdot 9,81 \cdot d^2}{18 \cdot \nu};$$

$$3,3 < k_p < 44; \quad v_s = \frac{0,152 \cdot \left[9,81 \cdot \left(\frac{\rho}{1000} - 1 \right) \right]^{0,714} \cdot d^{1,14}}{\nu^{0,428}};$$

$$k_p > 44; \quad v_s = \left[3 \cdot 9,81 \cdot d \cdot \left(\frac{\rho}{1000} - 1 \right) \right]^{0,5};$$

siendo ρ la densidad de los sólidos en suspensión, ν la viscosidad cinemática del agua y d el diámetro de las partículas.

A partir del diámetro máximo permitido, la herramienta calcula el parámetro k_e , que será de 36 si el diámetro es mayor de 1 mm, 44 si está entre 1 y 0,1 mm y 51 si es menor. Este parámetro permite calcular la velocidad de arrastre, a partir de la cual las partículas que se están considerando son arrastradas por el flujo y vuelven a quedar en suspensión.

$$v_{arr} = 0,32 \cdot k_e \cdot d^{0,5};$$

Una vez conocidas las velocidades de sedimentación y arrastre es fácil dimensionar el desarenador teniendo en cuenta dos reglas fundamentales:

- La velocidad del flujo en el desarenador debe ser menor a la velocidad de arrastre de las partículas.
- La longitud del desarenador debe ser la suficiente para permitir la sedimentación de las partículas.

De esta forma, la aplicación calcula el ancho mínimo del desarenador que provoca que la velocidad del flujo sea menor a la de arrastre. Para ello utiliza una profundidad del desarenador un 10% mayor a la del canal, o bien la establecida por el usuario. Una vez definidos ancho y profundidad calcula el tiempo de sedimentación de las partículas y con él la longitud mínima de la estructura.

Se debe tener en cuenta que el factor profundidad no sigue unas reglas estrictas para su determinación, por lo que es decisión del usuario su definición según las condiciones particulares a las que se enfrente.

Por otro lado, este factor influye mucho en el tiempo de sedimentación, ya que la aplicación calcula el tiempo máximo que tarda una partícula que se encuentra en la superficie en llegar al fondo del desarenador. Esto puede derivar en longitudes demasiado grandes para el sistema. Hay que pensar que al final de la estructura suele haber algún tipo de elemento que sólo permite el paso por la franja superior de la sección, por lo que no es necesario que todos los sólidos lleguen a depositarse en el fondo, bastará con que no se encuentren en la zona superficial. Además, el propio canal a lo largo de su recorrido hace las veces de desarenador, por lo que muchos de los sólidos ya se habrán depositado al llegar a la estructura. Todo esto permite reducir la longitud del sistema por debajo del valor calculado por la aplicación.

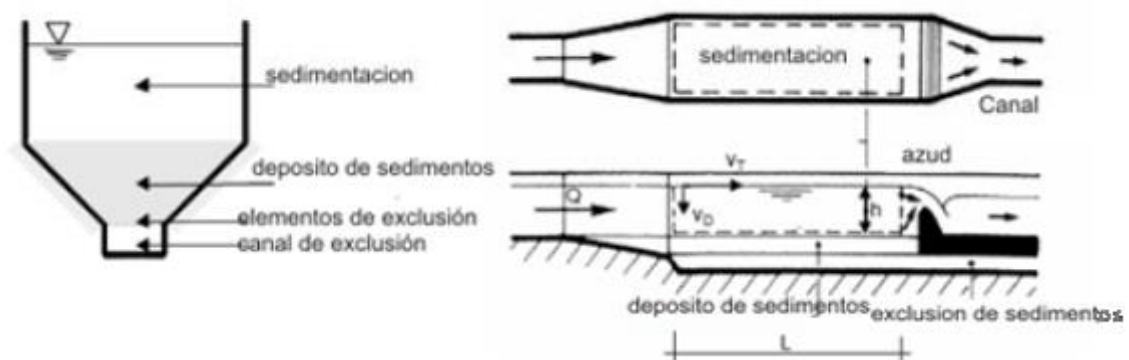


Figura 24: Esquema básico de desarenador. (Fuente: Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica).

5. Tubería Forzada

Para iniciar el dimensionado de la tubería forzada basta indicar la longitud total de la misma y seleccionar el material del que estará realizada de entre los disponibles en la aplicación o bien especificar el coeficiente de Manning, el módulo de Young y la máxima carga de tracción admisible del material que prefiera utilizar el usuario. Los materiales disponibles en la aplicación son el acero soldado, la fundición, el hierro dúctil, el polietileno (PE) y el PVC.

Con estos datos, la herramienta calcula el diámetro óptimo de la tubería teniendo en cuenta costes de la tubería y pérdidas de carga según esta fórmula:

$$D = 2,69 \cdot \left(\frac{n^2 \cdot Q^2 \cdot L}{H_u} \right)^{0,1875} ;$$

siendo n el número de Manning, Q el caudal, L la longitud de la tubería y H_u el salto útil.

Al utilizar esta fórmula se está buscando el diámetro más pequeño posible, que será el de menor coste económico, que no incurra en unas pérdidas mayores al 4% de la energía disponible. Unas pérdidas del 4% se consideran por lo general aceptables en este tipo de instalaciones.

Si se quisiera realizar un cálculo más riguroso habría que considerar varios diámetros y calcular las pérdidas de energía asociadas a cada uno de ellos a lo largo de la vida útil de la instalación. Posteriormente, habría que traducir estas pérdidas a costes económicos y sumarlos al coste de la tubería, quedándose con el diámetro que dé el menor coste total.

Una vez establecido el diámetro óptimo el usuario define el diámetro final de la tubería, normalmente acudirá a valores normalizados cercanos al óptimo y que estén disponibles en el mercado.

Una vez hecho esto, la herramienta supone 1 mm como valor inicial del espesor de la tubería. A partir de este valor se inicia un cálculo iterativo, similar al realizado en el dimensionado del canal, en el que se realizan los siguientes pasos:

- En primer lugar, con el valor de espesor estimado, se calcula la velocidad de propagación de la onda de presión en el caso de golpe de ariete según:

$$c = \sqrt{\frac{2.100.000}{\left(1 + \frac{2.100.000.000 \cdot D \cdot 1000}{E \cdot e_0}\right)}}$$

siendo E el módulo de elasticidad del material y e_0 el espesor de la tubería en mm.

- En segundo lugar, se calcula el incremento de presión sobre la tubería debido a esta onda:

$$\Delta P = c \cdot \frac{v}{g} = 1.000 \cdot \frac{v}{9,81};$$

siendo v la velocidad del flujo, c la velocidad de la onda de presión y ΔP el incremento de presión en metros de columna de agua.

- En tercer lugar, teniendo en cuenta este incremento de presión y la presión hidrostática que debe soportar la tubería, se puede calcular el espesor mínimo que habrá de tener para resistir el golpe de ariete:

$$e = \frac{(H_u + \Delta P) \cdot D \cdot 1000}{2 \cdot \frac{\sigma}{9807}};$$

siendo H_u el salto útil, D el diámetro, σ la máxima carga de tracción admisible del material, ΔP el incremento de presión calculado en metros columna de agua y e el espesor en mm de la tubería.

- Por último, con este nuevo valor de espesor se reinicia el proceso volviendo al primer paso y calculando la nueva velocidad de la onda de presión asociada al nuevo espesor. El proceso continúa hasta que el valor inicial y final de espesor coinciden.

En el caso de que la tubería esté construida mediante materiales metálicos se debe añadir un milímetro de espesor al calculado para tener en cuenta el efecto de la corrosión. La aplicación realiza esta corrección de forma automática en el caso de los materiales metálicos contemplados en la herramienta.

El espesor final vendrá dado por el mayor de los siguientes valores:

- Espesor mínimo para resistir el golpe de ariete.
- Espesor mínimo para evitar deformaciones durante la construcción.

En el último paso de este menú, la aplicación tiene en cuenta estos dos puntos para dar como resultado el espesor final de la tubería forzada.

Se debe hacer mención a que estos cálculos se realizan en las condiciones más desfavorables para el golpe de ariete, es decir, todos los cálculos se realizan suponiendo un cierre instantáneo de las válvulas de control de la tubería forzada, estando así del lado de la seguridad.

También se debe destacar que, en algunos casos muy concretos, la aplicación arroja un error al calcular el espesor mínimo. Esto se debe a que, al modificar los parámetros de diseño, el cálculo iterativo programado se interrumpe. Para solucionarlo basta pulsar sobre el botón *Recalcular*, que reinicia el cálculo iterativo.

6. Cámara de Carga

Para definir la cámara de carga lo primero que se ha de hacer es seleccionar los valores de a_i con los que se trabajará. Lo habitual es acudir a los valores recomendados, ya que la experiencia ha demostrado que respetando dichos valores el funcionamiento de la cámara de carga es el adecuado.

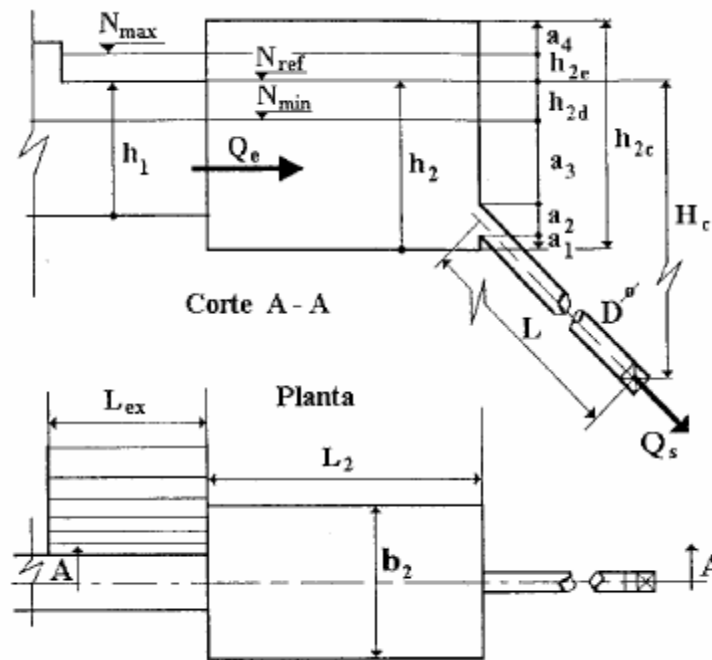


Figura 25: Esquema básico de cámara de carga. (Fuente: Centrais Hidrelétricas. Estudos para implantação).

Cada uno de estos valores está relacionado con un parámetro de diseño:

- a_1 : altura mínima que asegura que no se introduzcan elementos sólidos en la tubería forzada. Normalmente, gracias a todo el recorrido por el canal y el desarenador, no llegarán sólidos en suspensión. Sin embargo, si algún elemento se introdujera en la cámara de carga y se depositara en el fondo, esto impediría que llegara hasta la turbina.
- a_2 : embocadura de la tubería forzada. Por lo general se tomará el diámetro de la propia tubería.
- a_3 : distancia mínima para asegurar sumergencia mínima. Gracias a esta distancia se asegura que no llegue aire hasta la turbina en condiciones normales de funcionamiento, ya que esto podría provocar grandes daños.
- a_4 : resguardo mínimo. Distancia mínima que asegura el buen funcionamiento de la cámara de carga en caso de un aumento puntual del caudal.

A continuación se calcula una altura mínima de referencia h_2 que servirá para calcular el ancho mínimo b_2 y los parámetros h_{2d} y h_{2e} :

$$h_2 = 1,01 \cdot (a_1 \cdot a_2 \cdot a_3); \quad b_2 = \frac{Q}{h_2}; \quad h_{2d} = \frac{Q}{7 \cdot b_2 \cdot \sqrt{h_2}}; \quad h_{2e} = \frac{0,25 \cdot Q}{b_2 \cdot h_2^{0,5}}; \quad \text{donde } Q \text{ es el caudal.}$$

Con estos datos ya se puede calcular la altura mínima de la cámara de carga. Esta altura será el mayor de los siguientes valores:

$$h_{2c} = \begin{cases} a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + h_{2d} + h_{2e}; \\ h_2 + h_{2e} + a_4 \end{cases};$$

Teniendo los valores del ancho y el alto de la cámara de carga es sencillo calcular su longitud mínima. Para ello se debe establecer un tiempo de reacción. Éste representa el tiempo necesario para modificar las condiciones de operación de la turbina en caso de detectar algún tipo de incidencia. Por ejemplo, el tiempo que tardarían en cerrarse las válvulas de alimentación desde que se detectara la parada imprevista de la turbina. Por lo general, se considera que un tiempo de 2 minutos (120 segundos) es suficiente para realizar este tipo de operaciones. Conociendo este tiempo y el caudal se puede calcular el volumen de agua a almacenar en la cámara de carga para asegurar la disponibilidad del tiempo de reacción. Por tanto, se puede calcular la longitud según:

$$L_2 = \frac{120 \cdot Q}{b_2 \cdot h_{c2}};$$

El siguiente paso es definir el tipo de aliviadero a instalar. La aplicación permite elegir entre la tipología *Creager* o *Pared gruesa*, o bien que el usuario opte por otra tipología e indique el coeficiente de descarga correspondiente. Una vez definida la tipología la aplicación calcula la longitud del aliviadero a instalar según:

$$L_{ex} = \frac{8}{k_{ex}} \cdot \frac{b_2^{3/2} \cdot h_2^{3/4}}{Q^{1/2}}; \quad \text{donde } k_{ex} \text{ es el coeficiente de descarga del aliviadero.}$$

Llegados a este punto, la herramienta permite que el usuario introduzca los valores de ancho y alto de la cámara de carga que mejor se adapten a sus condiciones concretas teniendo en cuenta los mínimos definidos por la aplicación. Entonces devuelve la longitud final de la cámara de carga.

7. Resultados

En esta ventana simplemente se realiza un compendio de todos los resultados e hipótesis que se han obtenido y definido en el transcurso del predimensionado.

G. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Andaluza de la Energía. (2018). Informe de infraestructuras energéticas (30 de junio de 2018). Recuperado de https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/informe_andaluz_miea_2018_06_30_0.pdf

British Petroleum. (2018). BP statistical review of world energy (67th edition). Recuperado de <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>

British Petroleum (s.f.). Consultado el 1 de diciembre de 2018, de <https://www.bp.com/>

De Souza. Z., Santos. A., y Da Costa. E. (1999). Centrais hidrelétricas. Estudos para implantação. Río de Janeiro, Brasil: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil.

Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. Official Journal of the European Union, 23 April 2009.

European Commission (s.f.). Consultado el 1 de diciembre de 2018, de <https://ec.europa.eu/>

European Small Hydropower Association (ESHA). (2006). Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica. Recuperado de https://www.cnr.gob.cl/Home/Documentacin%20Complementaria/GUIA_Layman_ESHA_PCH.pdf

Castro. A. (2006). Minicentrales hidroeléctricas. Madrid, España: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

International Energy Agency (s.f.). Consultado el 1 de diciembre de 2018, de <https://www.iea.org/>

International Energy Agency. (2018). Renewables information: Overview (2018 edition). Recuperado de <https://webstore.iea.org/renewables-information-2018>

Ogayar. B. (2012). Minicentrales Hidroeléctricas. Jaén, España: Joxman Editores. S.L.

Oliveras. J., Saladié. Ó. (2010). Desenvolupament sostenible. Tarragona, España: Publicacions URV.

Ramos. H., De Almeida. A., Portela. M., y De Almeida. H. (2000). Guidelines for design of small hydropower plants. Belfast, North Ireland.

Real Decreto 2366/1994 sobre producción de energía eléctrica por instalaciones hidráulicas, de cogeneración y otras abastecidas por recursos o fuentes de energía renovables. Boletín Oficial del Estado, 9 de diciembre de 1994.

Red Eléctrica de España. (2016). El sistema eléctrico español (2016). Recuperado de https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/InformesSistemaElectrico/2016/inf_sis_elec_ree_2016.pdf

The World Bank (s.f.). Consultado el 1 de diciembre de 2018, de <http://www.worldbank.org/>

World Energy Council. (2016). Hydropower world energy resources 2016. Recuperado de https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Hydropower_2016.pdf