

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INTEGRACIÓN DE LA ENERGÍAS RENOVABLES EN
EL SISTEMA ELECTRICO**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***HERRAMIENTA PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE CENTRALES
MINI HIDRAULICAS***

Estudiante	<i>Ocaña, Martín, Paula</i>
Director/Directora	<i>Zorrozua, Arrieta, Miguel Ángel</i>
Codirector	<i>Miñambres, Arguelles, José Félix</i>
Departamento	Ingeniería Eléctrica
Curso académico	<i>2020-2021</i>

Bilbao, 27, septiembre, 2021

RESUMEN

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y cada vez más competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente por su diversidad, abundancia y potencial de uso en cualquier parte del planeta, pero lo más importante es que no producen gases de efecto invernadero ni emisiones contaminantes, principal causa del cambio climático [1].

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es realizar una herramienta de diseño de centrales mini hidráulicas, que permita estudiar la rentabilidad y el potencial hidráulico de cualquier central, basándose en sus parámetros característicos. Una vez desarrollada la calculadora se pretende analizar el potencial y la rentabilidad de una central ya existente bajo circunstancias normales, y poder obtener conclusiones de la similitud de los cálculos mediante la herramienta con los reales.

Las conclusiones de este trabajo muestran que la energía mini hidráulica es una tecnología aún en desarrollo con gran potencial, que cuenta con un amplio abanico de posibilidades tecnológicas todavía por descubrir. La cual debe desplegarse más en el sector del autoconsumo, ayudando a conseguir un modelo de ciudad verde y más sostenible gracias a la generación de energía limpia y la reducción de pérdidas de energía en el transporte.

Palabras clave: *Energías renovables, energía hidráulica, energía mini hidráulica, herramienta de simulación, análisis técnico-económico, rentabilidad, inversión, índices de rentabilidad, potencial hidráulico.*

LABURPENA

Energia berriztagarriak energia-iturri garbiak, agortezinak eta gero eta lehiakorragoak dira. Erregai fosiletatik bereizten dira, batez ere, dibertsitateagatik, ugaritasunagatik eta planetako edozein lekutan erabiltzeko potentzialagatik, baina garrantzitsuena da ez dutela berotegi-efektuko gasik sortzen, ezta emisio kutsatzailerik ere, klima-aldaketaren arrazoi nagusia baita [1].

Testuinguru horretan, lan honen helburu nagusia zentral mini hidraulikoak diseinatzeko tresna bat egitea da, edozein zentralen errentagarritasuna eta potentzial hidraulikoa aztertu ahal izateko, haren parametro bereizgarrietan oinarrituta. Kalkulagailua garatu ondoren, egoera normaletan dagoen zentral baten potentziala eta errentagarritasuna aztertu nahi da, eta kalkuluen antzekotasunari buruzko ondorioak atera, tresnaren eta errealen bidez.

Lan honen ondorioek erakusten dute energia mini hidraulikoa oraindik garatzen ari den teknologia bat dela, potentzial handikoa, eta aukera teknologiko ugari dituela oraindik deskubritzeko. Hori gehiago hedatu behar da autokontsumoaren sektorean, hiri-eredu berde eta iraunkorragoa lortzen lagunduz, energia garbia sortzeari eta garraioan energia-galerak murrizteari esker.

Hitz gakoak: Energia berriztagarriak, energia hidraulikoa, energia mini hidraulikoa, simulazio-tresna, analisi tekniko-ekonomikoa, errentagarritasuna, inbertsioa, errentagarritasun-indizeak, potentzial hidraulikoa.

ABSTRACT

Renewable energies are clean, inexhaustible and increasingly competitive sources of energy. They differ from fossil fuels mainly because of their diversity, abundance and potential for use anywhere on the planet, but most importantly, they do not produce greenhouse gases or pollutant emissions, the main cause of climate change [1].

In this context, the main objective of this work is to develop a tool for the design of mini-hydroelectric power plants, which allows to study the profitability and hydraulic potential of any power plant, based on its characteristic parameters. Once the calculator has been developed, the aim is to analyse the potential and profitability of an existing plant under normal circumstances, and to be able to draw conclusions on the similarity of the calculations using the tool with the real ones.

The conclusions of this work show that mini-hydro power is a technology still under development with great potential, with a wide range of technological possibilities yet to be discovered. It should be further deployed in the self-consumption sector, helping to achieve a green and more sustainable city model thanks to the generation of clean energy and the reduction of energy losses in transport.

Keywords: Renewable energy, hydropower, mini-hydro power, simulation tool, techno-economic analysis, profitability, investment, profitability ratios, hydro potential.

ABREVIACIONES

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio

r.p.m.: Revoluciones por minuto

IVA: Impuesto sobre el Valor Añadido.

P.R.: Período de Retorno Simple.

I.E.: Índice de Energía.

I.P.: Índice de Potencia.

ÍNDICE

1. MEMORIA.....	9
1.1. INTRODUCCIÓN	9
1.2. CONTEXTO	9
1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO.....	10
1.4. ENERGÍA HIDRAULICA	11
1.4.1. Definiciones.....	12
1.4.2. Historia de la energía hidráulica	12
1.4.3. La energía hidráulica en la actualidad	14
1.4.4. Energía mini hidráulica.....	15
2. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA. METODOLOGIA. . 30	
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA. PROGRAMA A EMPLEAR.....	30
2.2. CALCULOS Y ALGORITMOS	32
2.3. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA	42
2.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
3. APLICACIÓN PRÁCTICA	46
3.1. UBICACIÓN Y DATOS.....	46
3.2. DISEÑO DE LAS CENTRALES Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	48
3.2.1 Diseño de la mini central hidráulica de Yanci.....	48
3.2.2 Diseño de la mini central hidráulica de Lesaka	50
3.2.3 Diseño de la mini central hidráulica de Bera de Bidasoa	52
4. CONCLUSIONES.....	55
5. ANEXO I: MANUAL DE USO.....	56
6. REFERENCIAS.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico. Fuente: Centrales Mini hidráulicas, IDAE, 2006.	11
Figura 2. Rueda hidráulica. Fuente: Espacio Eureka	13
Figura 3. Central hidroeléctrica de la presa de las Tres Gargantas en China. Fuente: iAgua.	14
Figura 4. Tipos de Azudez. Fuente: IDAE	16
Figura 5. Cálculo de la tubería forzada mediante Pitágoras.....	17
Figura 6. Ábaco para el cálculo del diámetro de la tubería en función del caudal. Fuente: IDEA	18
Figura 7. Válvula de control de entrada del agua. Fuente: Saidi.....	19
Figura 8. Abaco de selección de tipo de turbina. Fuente VOES-ALPINE.....	20
Figura 9. Esquema de una central de agua fluvente. Fuente: Mini hidráulica en el País Vasco, Ente Vasco de la Energía, 1995.	23
Figura 10. Esquema de una central a pie de presa. Fuente: Mini hidráulica en el País Vasco, Ente Vasco de la Energía, 1995.	24
Figura 11. Esquema general de alturas de un salto de agua. Fuente: IDAE	25
Figura 12. Estructura de costes para central de agua fluvente	27
Figura 13. Estructura de costes para central a pie de presa.....	27
Figura 14. Gráfica del coste obra civil en función del caudal y la altura neta	28
Figura 15. Herramienta de cálculos hidráulicos. Visual de datos a introducir.....	30
Figura 16. Herramienta de cálculos hidráulicos. Visual de resultados.....	31
Figura 17. Visión inicial del programa Excel.....	31
Figura 18. Herramienta de Validación de datos.....	32
Figura 19. Lista desplegable de municipios.....	32
Figura 20. . Lista desplegable de ríos del Estado.....	33
Figura 21. Datos de caudal en la herramienta de simulación	36
Figura 22. Datos de las alturas en la herramienta de simulación	36
Figura 23. Datos de tiempo de funcionamiento en la herramienta de simulación	36
Figura 24. Datos del tipo de central en la herramienta de simulación	37
Figura 25. Resultados de localización de la herramienta de simulación	37
Figura 26. Resultado de potencia máxima instalada en la herramienta de simulación	37
Figura 27. Resultados cuando no es una central mini hidráulica en la herramienta de simulación	38
Figura 28. Cálculo interno de alturas en la herramienta de simulación	38
Figura 29. Cálculo interno de caudales en la herramienta de simulación	38
Figura 30. Cálculo interno de potencia en la herramienta de simulación.....	39
Figura 31. Resultado de tipo de turbina en la herramienta de simulación	39
Figura 32. Resultado de tipo de central y horas de funcionamiento en la herramienta de Figura simulación	39
Figura 33. Resultado de los parámetros económicos de una central mini hidráulica en la herramienta de simulación.....	40
Figura 34. Resultado de rentabilidad favorable en la herramienta de simulación	41
Figura 35. Resultado de rentabilidad desfavorable en la herramienta de simulación	41
Figura 36. Resultado de rentabilidad no aplicables en la herramienta de simulación	41
Figura 37. Central Hidroeléctrica Virgen de las Viñas. Fuente: Diario de Burgos	42
Figura 38. Turbina Kaplan de la central Virgen de las Viñas. Fuente: IDAE.....	43
Figura 39. Datos introducidos en la herramienta de simulación correspondientes a la central mini hidráulica de Virgen de las Viñas.....	43

Figura 40. Resultados obtenidos en la herramienta de simulación correspondientes a la central mini hidráulica de Virgen de las Viñas.....	44
Figura 41. Ubicación de la central Yanci I, en Igantzi.....	46
Figura 42. Ubicación azud. Altura 2.....	47
Figura 43. Ubicación azud. Altura 1.....	47
Figura 44. Ubicación de la central de Bera de Bidasoa	48
Figura 45. Datos a introducir del redimensionamiento de la central de Yanci I	49
Figura 46. Resultados obtenidos del redimensionamiento de la central de Yanci I	49
Figura 47. Datos a introducir del dimensionamiento de la central de Lesaka.....	51
Figura 48. Resultados del dimensionamiento de la central de Lesaka.....	51
Figura 49. Central de Bera de Bidasoa. Fuente: Alamy	52
Figura 50. Datos a introducir del dimensionamiento de la central de Bera de Bidasoa II	53
Figura 51. Resultados del dimensionamiento de la central de Bera de Bidasoa II	53
Figura 52. Hojas del Excel que se encuentran en el documento de la herramienta de simulación	56
Figura 53. Visual de la herramienta de simulación	56
Figura 54. Lista desplegable de municipios	57
Figura 55. Lista desplegable de ríos del Estado.....	57
Figura 56. Caudal medio anual y porcentaje a emplear.....	57
Figura 57. Altura 1, altura 2 y altura bruta en metros	58
Figura 58. Horas de funcionamiento de la central al día	58
Figura 59. Botones de selección para el tipo de central.....	59
Figura 60. Resultados de Localidad y río.....	59
Figura 61. Resultado del valor de la potencia instalada en kW y MW	59
Figura 62. Resultado de la tipología de turbina más idónea	59
Figura 63. Resultados de la tipología de central elegida y el tiempo de funcionamiento en horas	60
Figura 64. Resultado de rentabilidad positiva	60
Figura 65. Resultado de rentabilidad negativa	61
Figura 66. Resultados económicos	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de rangos de caudal y altura neta para turbinas	20
Tabla 2. Ríos y caudales del estado.....	34
Tabla 3. Tabla de rangos de caudal y altura neta para turbinas.	39

1. MEMORIA

1.1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto refleja el diseño de una herramienta de simulación mediante Excel de centrales mini hidráulica para la obtención rápida y sencilla del cálculo técnico-económico de este tipo de instalaciones.

El desarrollo de la herramienta no se ha desarrollado teniendo en cuenta íntegramente todos los elementos que componen este tipo de centrales, sino que se ha realizado centrándose en los principales componentes y aproximaciones previamente estudiadas y analizadas.

Para poder llevar a cabo el proyecto, en primer lugar, se ha realizado una investigación sobre este tipo de generación y sus peculiaridades, teniendo en cuenta estudios previos que justifican el uso de determinadas fórmulas. Después, se ha realizado un estudio en profundidad del programa de cálculo Excel, aprendiendo nuevas fórmulas y aplicaciones del mismo, las cuales nos han permitido el desarrollo de la calculadora.

Por último, se ha desarrollado la herramienta de dimensionamiento de centrales mini hidráulicas para los principales ríos del Estado, la cual permite saber si el proyecto estudiado es realmente rentable; y se han comparado los resultados técnico-económicos obtenidos con los de centrales existentes.

1.2. CONTEXTO

La sociedad actual es altamente dependiente de la energía eléctrica. A lo largo del tiempo las formas de generación de la electricidad se han ido desarrollando gracias a las nuevas tecnologías. Antiguamente las principales formas de generación de energía eran a partir de materiales simples como el carbón o la madera, sin embargo, estas formas de generación no eran capaces de satisfacer completamente la demanda de la sociedad que se encontraba en desarrollo constante. Por ello, se comenzaron a emplear otras formas de generación a partir de combustibles fósiles, las cuales, aunque son más productivas también son más perjudiciales para el medio ambiente.

Sin embargo, con el paso de los años y el aumento del uso de los combustibles fósiles, se empezó a producir una degradación notable del medio ambiente y de la salud de la sociedad, la cual desembocó progresivamente en un agotamiento de estos recursos. Por ello, se comenzó a investigar sobre cómo desarrollar nuevas fuentes de generación respetuosas e infinitas como solución a esta falta de recursos.

Poco a poco, las energías renovables han ido tomando un papel muy distinguido en el sector de la generación y en el mercado eléctrico, además son cada vez más los inversores que apuestan por formas de generación alternativas como son: energía hidráulica, energía eólica, energía fotovoltaica, etc.

Es importante resaltar que nuestro país cuenta con un alto potencial hidroeléctrico, el cual llega a aportar entorno al 19% del consumo eléctrico anual. Sin embargo, con el paso de los años, esta tecnología se ha ido estancando y ha dejado de ser tan estudiada y empleada.

Aunque las grandes centrales hidroeléctricas a pie de presa no son un tipo de instalación en auge, puesto que poseen un campo de expansión limitado, la generación de electricidad con mini centrales hidroeléctricas posee muchas posibilidades de crecimiento, debido a la diversidad de caudales aprovechables y las numerosas ventajas que puede ofrecer respecto las centrales hidráulicas tradicionales.

Por todo ello actualmente la sociedad esté comenzando a apostar por centrales de potencias inferiores a los 10 MW, como son las centrales mini hidráulicas y micro hidráulicas (menos de 10 kW), las cuales son más económicas, accesibles y aprovechan el cauce del río para la generación de energía sin grandes obras civiles. Este tipo de tecnología está muy poco desarrollada, y existen pocas herramientas de dimensionamiento que permitan conocer si este tipo de instalaciones tienen unos costes rentables o no.

Es por ello que este proyecto tiene como objetivo la realización de una herramienta de simulación de centrales mini hidráulicas, que permita estudiar la rentabilidad y el potencial hidráulico de cualquier central, basándose en sus parámetros característicos. Una vez desarrollada la herramienta se pretende analizar el potencial y la rentabilidad de una central ya existente bajo circunstancias normales, y poder obtener conclusiones de la similitud de los cálculos mediante la herramienta con los reales.

1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

El objetivo del presente Trabajo de Fin de Máster es el diseño de una herramienta de simulación sencilla, que facilite los cálculos de centrales mini hidráulica tanto de agua fluyente como a pie de presa.

Este proyecto se estructura en tres partes claramente diferenciadas. La primera, hace referencia a una introducción a la energía hidráulica y su subvertientes, en concreto la energía mini hidráulica en la cual se centrará el trabajo. En la segunda parte, se detallará el diseño de la herramienta de simulación que se ha desarrollado mediante el programa Excel. Y finalmente, en la tercera parte se detallará un caso práctico de diseño de varias centrales de energía mini hidráulica, que sean capaces de suministrar energía para los municipios que se encuentran en el cauce del río Bidasoa, como Lesaka o Bera de Bidasoa.

En el primer capítulo se comenzará haciendo una introducción a la energía hidráulica, detallando antecedentes, aspectos básicos y las aportaciones a nuestra vida. Posteriormente nos centraremos en la energía mini hidráulica, describiendo los elementos básicos que forman parte de este tipo de instalaciones. A su vez se explicarán los diferentes tipos de centrales y sus características más significativas. Por último, se realizará una breve explicación del programa Excel en el cual nos hemos centrado para desarrollar la herramienta de dimensionamiento, que en el siguiente capítulo se explicará más en detalle.

Por otro lado, en el segundo capítulo, se realizará en primer lugar una introducción a las bases sobre las que se asienta la herramienta, introduciendo las formulas y algoritmos empleados. Detallando el procedimiento seguido en el desarrollo de dicha herramienta y la obtención de los resultados. Además de mencionar los aspectos claves a tener en cuenta a la hora de dimensionar una instalación mini hidráulica. Para corroborar el buen modelizado de la herramienta, se realizará el dimensionamiento de una instalación mini hidráulica existente mediante la herramienta, comparando los resultados obtenidos mediante la calculadora con los reales.

Finalmente, en el tercer capítulo, se terminará realizando un análisis hidráulico del río Bidasoa, implantando nuevas centrales mini hidráulicas o mejorando las existentes.

Por último, se concluirá explicando las conclusiones obtenidas en el desarrollo de este trabajo.

1.4. ENERGÍA HIDRAULICA

Aproximadamente el 70% de la tierra está cubierto de agua. La energía hidroeléctrica transforma la energía producida por el movimiento del agua aprovechando la diferencia de altura existente entre dos puntos (energía mecánica), en electricidad mediante un generador.

Esta energía proviene de forma indirecta de la energía del sol, puesto que es el responsable del ciclo hidrológico natural. A causa de la radiación procedente del sol, la tierra se calienta, y por consiguiente se calientan ríos, lagos y océanos, provocando la evaporación del agua, la cual es transportada mediante flujos de aire caliente hacia diferentes partes de la tierra, donde vuelve a depositarse en forma de lluvia, niebla o nieve. [2]

Este ciclo es la explicación de que la energía hidráulica sea una fuente de origen renovable, puesto que se emplea el recurso del agua, que es inagotable [2].

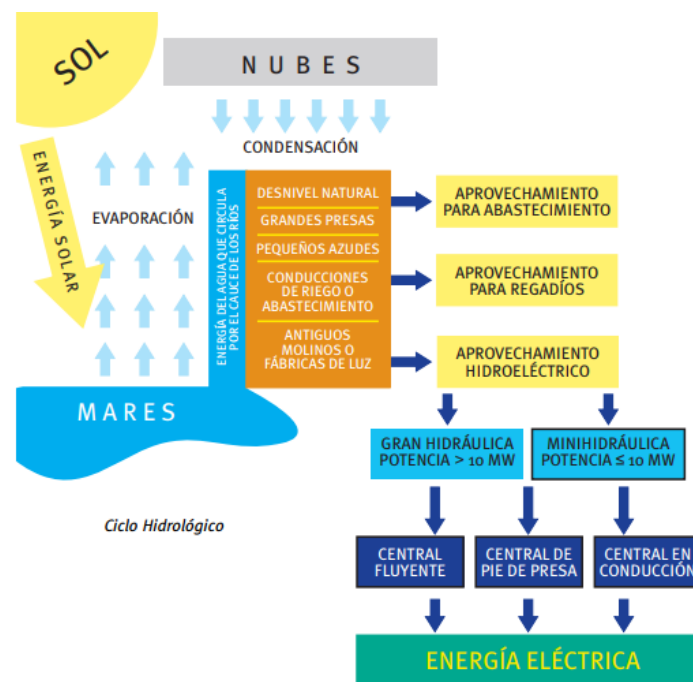


Figura 1. Ciclo hidrológico. Fuente: Centrales Mini hidráulicas, IDAE, 2006.

Las instalaciones de energía hidráulica se clasifican habitualmente en función de su potencia instalada, aunque no existe en la actualidad un valor estandarizado. En España, se diferencian 2 grandes tipos de centrales:

- **Gran escala:** Son centrales de gran producción y tienen potencias instaladas superiores a los 10 MW. Habitualmente suelen ser centrales a pie de presa.
- **Pequeña escala:** Dentro de este grupo nos encontramos otra división de grupos:
 - **Centrales mini hidráulicas:** Desde los 10 kW hasta los 10 MW.
 - **Centrales micro hidráulicas:** Centrales de potencia menor a los 10 kW.

1.4.1. Definiciones

- **Salto bruto (m):** Es la diferencia de altura entre el nivel del agua en la toma y en la tubería de descarga. [3]
- **Salto neto (m):** Es igual a la diferencia entre el salto bruto y las pérdidas de carga en la toma y por conducción. Habitualmente suelen ser del orden del 10% del salto bruto. [3]
- **Salto de diseño o nominal (HN):** Es el salto neto para el que se diseña la turbina y con el que se consigue el punto de máxima eficiencia en la turbinación. [3]
- **Caudal máximo:** El caudal turbinado por un grupo operando con el salto crítico máximo o mínimo y una apertura total. [3]
- **Caudal de turbinación de una turbina o de una central:** Es el caudal máximo que se puede turbinar en uno o en todos los grupos de la central operando con una altura de salto determinada. [3]
- **Potencia nominal de la turbina:** Es la potencia que entrega la turbina cuando opera con el salto nominal y una apertura total. [3]
- **Potencia (o capacidad) instalada:** Es la potencia global de todos los alternadores instalados en la central. [3]
- **Hidrología:** Ciencia que estudia las aguas terrestres, su origen, movimiento y distribución en nuestro planeta, propiedades físicas y químicas, interacción en el medio ambiente físico y biológico e influencia en las actividades humanas. [4]

1.4.2. Historia de la energía hidráulica

Desde la cultura griega y romana el uso de la fuerza del agua ha ayudado en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitían a las civilizaciones realizar trabajos de manera más cómoda y sencilla, como puede ser el simple hecho de moler el trigo.

La primera aplicación directa de la energía del agua es la rueda hidráulica, o también conocida como molino vitruviano, que era empleado para bombear agua de una altura a otra. Este mecanismo fue empleado durante muchos siglos en todo el mundo.

Más tarde durante la Edad Media, la tecnología de la rueda hidráulica se fue desarrollando de forma notable, tomando una gran importancia en la vida cotidiana de la sociedad de la época. Este gran invento llegó a solventar gran cantidad de impedimentos que hasta la fecha no habían sido capaces de arreglar los seres humanos; llegando a alcanzar potencias de hasta cincuenta caballos. [5]



Figura 2. Rueda hidráulica. Fuente: Espacio Eureka

Esta energía debe su gran impulso al ingeniero John Smeaton, el cual construyó por primera vez, grandes ruedas hidráulicas de hierro colado, que fueron la base de las actuales turbinas. Estas ruedas permitieron durante la revolución industrial, que la energía hidráulica tomara un papel muy relevante como fuente de generación de electricidad, puesto que, aunque la máquina a vapor era una tecnología muy desarrollada, el carbón, que era la materia prima de este tipo de maquinaria, era muy escaso. Además, al comenzar a emerger grandes núcleos de población, se produjo un aumento muy considerable de la demanda de electricidad, lo que requería el emplear nuevas fuentes de generación para poder generar toda la energía demandada. [5] Fue en este momento cuando se empezó a emplear la técnica de la construcción de presas de contención, para poder lidiar con las variaciones de caudal de los ríos en las épocas de verano y otoño, y las grandes heladas del invierno.

En consecuencia, en 1880, se construye la primera central hidroeléctrica de la época moderna en Northumberland, Gran Bretaña. Pero no es hasta el siglo XX cuando gracias al desarrollo del generador eléctrico junto con la mejora de la turbina hidráulica, cuando la energía hidráulica pasa a ser una fuente de generación muy relevante. [5]

La energía hidráulica fue en los siglos XIX y XX una tecnología muy novedosa, y que causó gran interés. Los primeros países que se aventuraron en la generación de electricidad mediante esta tecnología fueron Canadá y Estados Unidos [5]. Pero con el paso de los años, muchos territorios comenzaron a instalar todo tipo de centrales de generación hidráulica, desde centrales con capacidad para generar entre un kilovatio y un megavatio, hasta imponentes centrales como la Presa de las Tres Gargantas en el río Yangtsé (China) con 22.500 MW de potencia instalada. [6]

Esta central hidroeléctrica es la más grande del mundo, con 185 metros de altura, 2.335 metros de longitud de coronación, 22.500 MW de potencia instalada y 39.000 hm³ de capacidad total de almacenamiento [7]. Es capaz de abastecer un 10% de la demanda energética de China. Además, según la NASA como consecuencia de la construcción de esta central, se ha producido una alteración en el eje de rotación de la Tierra (unos dos

centímetros), lo que ha supuesto un incremento de las horas de luz de 0,06 milésimas de segundo. [8]



Figura 3. Central hidroeléctrica de la presa de las Tres Gargantas en China. Fuente: iAqua.

1.4.3. La energía hidráulica en la actualidad

La energía hidráulica es una fuente de generación renovable que indirectamente proviene de la energía solar, que al igual que el resto de energías renovables es limpia, inagotable y autóctona.

En la actualidad aproximadamente el 19% de la energía generada a nivel mundial proviene de centrales de energía hidráulica, puesto que existe un total de 1.292,00 GW de potencia instalada (A fecha del año 2018) [9]. Siendo China el país con más potencia instalada.

En cuanto a la Unión Europea, el uso de esta tecnología comenzó a ser impulsada según la legislación fijada en "Libro Blanco para una Estrategia Común y un Plan de Acción para las Energías Renovables", desarrollado en 1997 por parte de la Comisión de las Comunidades Europeas. En esta legislación se estableció el objetivo de conseguir un incremento de 4.500 MW de potencia instalada en Europa, en mini centrales hidráulicas para el año 2010.

Más tarde en el 2001, según la normativa Directiva 2001/77/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, se estableció que para el año 2020, el 12% de la electricidad generada debía ser de origen renovable, en concreto, se estableció que el aporte de la energía hidráulica, dividido en grandes centrales y mini hidráulica, debía de ser de entorno a los 105.000 MW/año. [2]

Actualmente España, cuenta con un gran potencial hidroeléctrico, puesto que la energía hidráulica, es la fuente de origen renovable más afianzada y de mayor antigüedad en

nuestro país. España cuenta con una capacidad total de embalses de 55.000 hm³, siendo aproximadamente un 40% de capacidad correspondiente a embalses para centrales hidroeléctricas [10].

Cabe destacar que, aunque existieron unos años en los que la implantación de esta tecnología aumentó de forma notable, en las últimas décadas el uso de esta tecnología ha sido relevada por otras fuentes de origen renovable como pueden ser la energía fotovoltaica a gran escala o la energía eólica. Aunque continúa siendo una de las energías de generación renovable que más aporta a la producción total de electricidad del país.

En el año 2018, la potencia hidráulica instalada en nuestro país ascendió a un total de 20.393,667 MW [11], siendo únicamente superada por la eólica en cuanto a potencia instalada de generación renovable. En la actualidad existen en torno a 800 centrales hidroeléctricas de diferentes tamaños y rangos de potencia, encontrándose la mayoría de estas grandes centrales en las comunidades de Cataluña, Galicia y Castilla y León. Sin embargo, en estos últimos años se ha desarrollado la tecnología de la energía mini hidráulica (centrales hidroeléctricas de menos de 10 MW), consiguiendo unos índices económicos muy positivo. [10]

1.4.4. Energía mini hidráulica

1.4.3.1. Partes de una central de energía mini hidráulica

Una minicentral está compuesta por numerosos elementos y componentes que pueden clasificarse en tres grandes grupos:

- **Obra civil:** La obra civil abarca las infraestructuras e instalaciones necesarias para derivar, conducir y restituir el agua turbinada, así como para albergar los equipos electromecánicos y el sistema eléctrico general y de control. [2]

En este tipo de centrales, los trabajos de obra civil no son tan significativos en comparación con centrales de gran escala, abarcando únicamente entre el 35% - 45% del presupuesto. Además, el impacto medioambiental de la obra civil de este tipo de instalaciones es mucho menor. [2]

- **Equipamiento electromecánico:** Los elementos que componen la parte electromecánica de este tipo de centrales están en continuo desarrollo y cuenta con una tecnología muy avanzada, puesto que este tipo de generación cuenta con una larga trayectoria de al menos 180 años. [2]

Actualmente existe una amplia gama de equipos tanto de generadores como de turbinas, que se adaptan a caudales desde los 0,1 m³/s hasta los 500 m³/s, y hasta los casi 2.000 metros de salto.

Otros equipos que forman parte de este grupo son los reguladores de velocidad, que permiten alcanzar una gran precisión en la regulación y el acoplamiento de grupos electrógenos, permitiendo un control y regulación de las turbinas muy preciso y automático. [2]

- **Equipos auxiliares:** Estos equipos también juegan un papel importante en estas infraestructuras, y son necesarios para el correcto funcionamiento de una minicentral [2]. Los más comunes son:
 - Compuertas
 - Reja y máquina limpiar rejillas
 - Grúa para movimiento de máquinas

- Sistema contra-incendios
- Alumbrado
- Caudalímetros

A continuación, se definen más en detalle los elementos que forman parte de estos tres grandes grupos mencionados previamente.

• Azud

Este elemento es un muro transversal al curso del río, de poca altura, cuyo objetivo consiste en conseguir desviar parte del caudal del río hacia la toma. El resto de agua será vertida por el aliviadero siguiendo el cauce del río.

El azud puede estar fabricado mediante diferentes materiales como hormigón, ladrillos, escollera o tierra. Este elemento es capaz de resistir al empuje del agua por su propio peso, aunque en los azudes de tierra y escollera se suele colocar un anclaje al terreno con el fin de aumentar su estabilidad [2]. En la figura 4 se pueden apreciar diferentes tipos de azud.

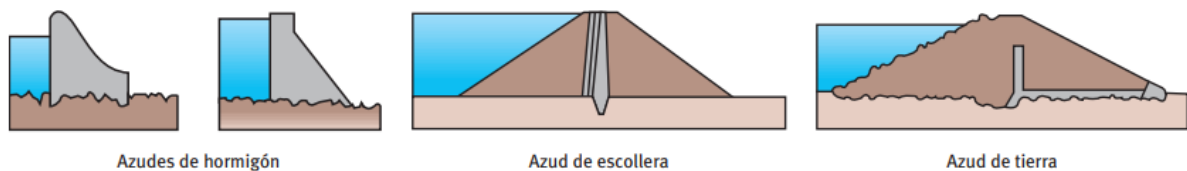


Figura 4. Tipos de Azudez. Fuente: IDAE

• Presa

Este elemento se construye con el objetivo de retener el agua y provoca en consecuencia una elevación notoria del nivel del río mediante la creación de un embalse. Existen múltiples tipos de presa en función de su forma o de su tamaño, sin embargo, las presas de contrafuerte o de bóveda, requieren mayor complejidad en su construcción y no suelen emplearse en las mini centrales [2].

Los tipos de presas más empleados para las minicentrales son:

- Presa de gravedad: Son aquellas que contrarrestan el empuje del agua con su propio peso, por lo que se confía su estabilidad también en el esfuerzo del terreno sobre el que se asienta.
- Presa en arco: En estas presas el esfuerzo del empuje del agua se transmite hacia las laderas del valle, de ahí que su forma implique cierta curvatura. Suelen situarse en valles angostos con laderas rocosas de buena calidad.

• Toma

Se construye para conseguir desviar el agua del cauce del río. A la hora de su diseño se debe buscar que las pérdidas de carga sean las mínimas. Además, dicho elemento cuenta con una rejilla para evitar la entrada de elementos sólidos como piedras [2].

Además, en centrales de montaña donde la obra civil puede ser más compleja se suele emplear un tipo de toma de tipo subterránea. Se construye excavado transversalmente en el cauce del río, de manera que el agua entra a través de la reja superior que protege la entrada de grandes sedimentos, y sale transversalmente al curso del río para incorporarse al canal de derivación.

- **Canal de derivación**

Es el canal que se encarga de transportar el agua desde la toma hasta la cámara de carga. Este canal puede realizarse a cielo abierto, enterrado o en conducción a presión. A lo largo del canal, en función de su longitud, pueden haber instaladas varias compuertas para limpieza y vaciado del canal en caso de que sea necesario [2].

- **Cámara de carga**

Es un depósito donde se almacena el agua que viene del canal de derivación y desde donde comienza la tubería forzada. Tiene como objetivo, el suministrar el caudal requerido por la central hidráulica. Además, también se encarga de absorber las oscilaciones causadas por la diferencia de caudal y presiones, que pueden provocar el llamado golpe de ariete [2].

Este elemento además cuenta con un aliviadero, para que, en caso de parada de la central por fallo o mantenimiento, el agua que no llegue a la turbina pueda ser devuelta al río.

- **Tubería forzada**

Esta tubería es la encargada de llevar agua desde la cámara de carga hasta la turbina. Debe estar diseñada para aguantar la sobrepresión del golpe de ariete. Normalmente en las centrales de agua fluyente esta tubería será de pequeña longitud. Y dependiendo de la orografía del terreno y de los factores medioambientales, la colocación de la tubería forzada será enterrada o aérea [2].

Los materiales más comunes para la construcción de este tipo de tuberías son el acero, la fundición, el fibrocemento y el plástico reforzado con fibra de vidrio, en función del desnivel existente.

Para el cálculo de la tubería forzada se tendrá en cuenta el salto bruto que se realiza y la separación que debe existir entre la base de la tubería forzada y la turbina, puesto que la turbina no puede quedar debajo de la caída directamente. Como se puede apreciar en la figura 5, para el cálculo de la longitud se aplicará el teorema de Pitágoras.

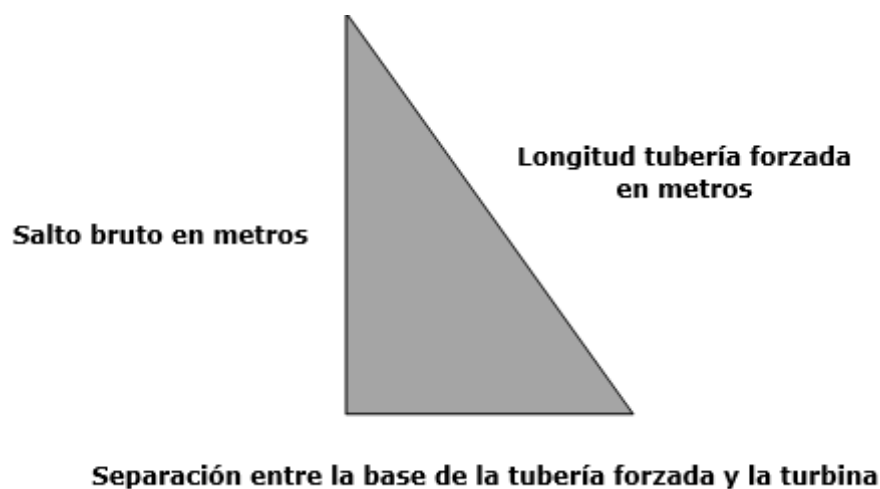


Figura 5. Cálculo de la tubería forzada mediante Pitágoras

Siendo L:

$$L = \sqrt{(\text{Ubicación turbina})^2 + (H_b)^2} \quad (1)$$

Para calcular el diámetro de dicha tubería se empleará la siguiente fórmula:

$$d = 0,3 \cdot \sqrt[5]{\frac{Q^2 \cdot L}{H_b}} \quad (2)$$

Estos cálculos se pueden comprobar a su vez que están bien realizados mediante el ábaco que se puede apreciar en la figura 6.

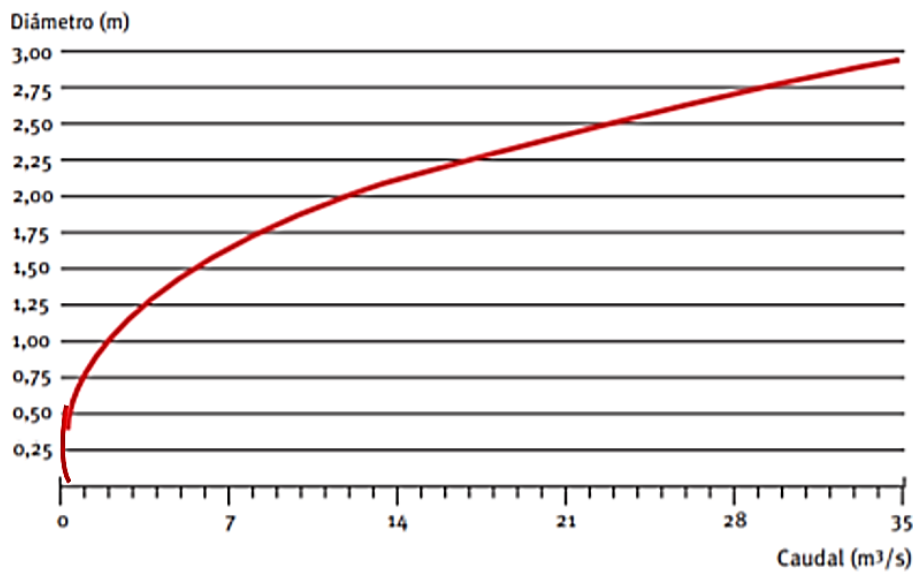


Figura 6. Ábaco para el cálculo del diámetro de la tubería en función del caudal. Fuente: IDEA

- **Edificio de la central**

Es el lugar donde se sitúa el equipamiento de la minicentral: turbinas, bancadas, generadores, alternadores, cuadros eléctricos, cuadros de control, etc.

La ubicación del edificio debe ser analizada, teniendo en cuenta la topografía, la geología y la accesibilidad de la ubicación. Además, es primordial que a la hora de su construcción se busquen las mejores condiciones para que el agua llegue hasta la turbina con las menores pérdidas de carga posibles.

- **Válvula de control de entrada a la turbina**

Para poder controlar el caudal de agua que entra en la turbina, se coloca una válvula de control que permitirá regular dicho flujo, permitiendo el paso o cerrando en función de las necesidades. Dicha válvula debe ser del mismo diámetro que la tubería forzada.



Figura 7. Válvula de control de entrada del agua. Fuente: Saidi.

- **Turbina y generador**

La turbina es el elemento más relevante de una instalación hidráulica. Este elemento aprovecha la energía cinética y potencial del agua, transformándola en un movimiento de rotación que es transferido al eje de un generador, el cual produce energía eléctrica a partir de la energía mecánica de rotación, basándose en la ley de Faraday. Esta ley detalla que si un conductor eléctrico se mueve dentro de un campo magnético se produce una corriente eléctrica por el conductor.

Los generadores pueden ser de dos tipos: síncronos o asíncronos.

En los generadores síncronos la conversión energía mecánica en eléctrica se produce a una velocidad de sincronismo n_s (en r.p.m), la cual viene determinada por los pares de polos del generador y su frecuencia (en España 50 Hz).

Los generadores asíncronos se conectan en una red existente, ya que necesitan que se les haga girar a una velocidad mayor a la del campo rotativo. Estos generadores toman de la red la potencia reactiva y ceden la potencia activa.

Respecto a las turbinas también existen dos grupos principales: turbinas de acción y turbinas de reacción.

Las turbinas de acción son las que generan energía aprovechando solamente la velocidad del caudal de agua. El modelo de turbina de acción más conocido es la turbina Pelton, empleada en saltos elevados que tienen poco caudal. Sin embargo, existen otros modelos como: Turgo y Ossberger o Banki-Michell.

Las turbinas de reacción tienen la capacidad de aprovechar la presión que aún le queda al agua a su entrada para convertirla en energía cinética. Esto hace que el agua al salir del rotor tenga una presión por debajo de la atmosférica. Los modelos de turbinas más conocidos de este grupo son las Francis y la Kaplan.

La turbina Francis está pensada para todo tipo de caudales y saltos, y cuenta con un rango de utilización muy grande. Sin embargo, la turbina Kaplan está pensada para saltos pequeños y caudales variables o grandes. Además, hay que mencionar que existen variantes de la turbina Kaplan como pueden ser las turbinas de hélice o bulbo.

A modo de resumen en la tabla 1 se muestran los rangos de caudal y altura que corresponden a las tres turbinas más conocidas, y que se emplearan para el diseño de la calculadora.

Tabla 1. Tabla de rangos de caudal y altura neta para turbinas

Turbina	Caudal	Altura neta
Pelton	Hasta 0,3 m ³ /s	Hasta los 10 m
Francis	De 0,2 m ³ /s a 20 m ³ /s	Desde los 10 hasta los 100 m
Kaplan	A partir de 20 m ³ /s	A partir de 100 m

Para poder saber que turbina es la más idónea, al conocer los datos de un caudal Q y un salto bruto H, mediante el siguiente ábaco que se muestra en la figura 8, se puede analizar cuál es la turbina más aconsejada para la central micro hidráulica.

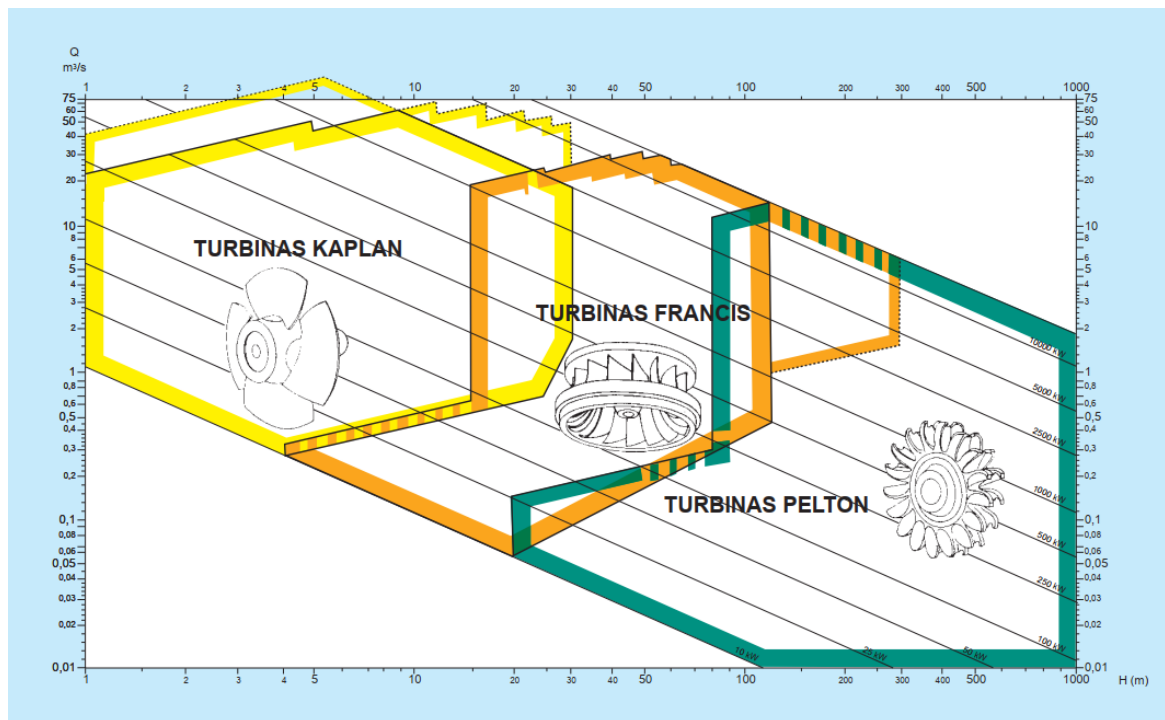


Figura 8. Ábaco de selección de tipo de turbina. Fuente VOES-ALPINE

Para conocer cuál es la potencia nominal más adecuada para el generador que se debe instalar en la central, emplearemos la altura bruta suponiendo unas pérdidas de carga del 10%, el caudal medio anual del río y la eficiencia de la turbina elegida para dichos parámetros. Y mediante la siguiente fórmula (3) se podrá calcular cuál será la potencia instalada idónea. [2] [12]

$$P = 9,81 \cdot Q \cdot H_n \cdot e \quad (3)$$

Donde:

- ❖ P: Potencia en Watios
- ❖ Q: Caudal del agua en m³/s
- ❖ H_n: Salto neto en metros
- ❖ e: Factor de eficiencia de la central

Siendo e , y suponiendo un valor medio de $e = 85\%$:

$$e = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \quad (4)$$

Donde:

- ❖ η_t : Eficiencia de la turbina
- ❖ η_g : Eficiencia del generador
- ❖ η_{tr} : Eficiencia del transformador

• **Válvula de control de salida a la turbina**

Además, para poder garantizar que la tubería pueda ser vaciada cuando esta se encuentre parada o en mantenimiento, se instalará una válvula de compuerta de cierre elástico embridada. [2].

• **Transformadores:**

Este equipo se encarga de elevar la tensión de entrada al nivel de la línea existente para permitir el transporte de la energía eléctrica con unas pérdidas inapreciables. [2].

• **Reguladores:**

Se encargan de regular la turbina y ajustarla a las condiciones de trabajo existentes, con el objetivo de conseguir el mayor rendimiento posible.

Los principales bucles de control y sistemas de supervisión y mando para una minicentral hidroeléctrica son [2]:

- Para el control de la turbina:
 - Regulador de velocidad en instalaciones con grupos síncronos.
 - Reguladores de nivel para centrales con grupos asíncronos conectados a la red.
 - Regulador de potencia generada para centrales en red aislada.
 - Regulador de caudal turbinado.
- Para el control del generador:
 - Regulador de tensión para grupos síncronos.
 - Equipo de sincronización, cuando existen grupos síncronos funcionando conectados a la red.
 - Baterías de condensadores y un relé taquimétrico, cuando existan grupos asíncronos funcionando conectados a la red.

• **Cuadros eléctricos:**

Se colocarán en el interior del edificio y estarán compuestos por: disyuntores y seccionadores, transformadores de medida, tanto de tensión como de intensidad, transformadores de equipos auxiliares, Pararrayos y autoválvulas entre otras protecciones. [2]

• **Línea eléctrica de interconexión:**

Es un elemento fundamental que permite transportar la energía producida hasta los centros de consumo o hasta la red de distribución. Es importante resaltar que el coste

de esta línea puede encarecer de forma muy notable el proyecto, en función de su longitud y de la orografía del terreno. [2]

- **Canal de descarga**

Este canal se encarga de que una vez turbinada el agua, esta sea devuelta al cauce del río. [2]

1.4.3.2. Tipos de centrales

- **Centrales de agua fluyente:**

Son centrales que basan su funcionamiento en el aprovechamiento de una parte del agua de un río, la cual se capta mediante una toma, y a través de canales o conducciones se lleva hasta el edificio de la central donde será turbinada. Cuando esta agua ha sido turbinada, es de nuevo devuelta al río. [2]

En este tipo de centrales suele ser necesaria la construcción de los siguientes elementos, que previamente hemos detallado en el punto 1.4.3.1. Partes de una central de energía mini hidráulica.

- Azud.
- Toma.
- Canal de derivación.
- Cámara de carga.
- Tubería forzada.
- Edificio central y equipamiento electromecánico.
- Canal de descarga.
- Subestación y línea eléctrica.

El diseño de estas centrales es muy dispar, y suelen basarse principalmente en la hidrología de la ubicación, puesto que las centrales mini hidráulicas de agua fluyente no tienen la facilidad de poder controlar el caudal, lo que provoca que este sea muy variable durante todo el año. [2]

Por ello este tipo de central se diseña en función de la orografía del terreno y la hidrología del río del cual se pretende turbinar agua. Estas centrales suelen contar con saltos de agua casi constantes a lo largo de su vida de funcionamiento y con una potencia de generación que depende directamente del caudal que se turbine en cada instante.

Es habitual que, para cumplir con el objetivo de la disminución de las pérdidas de carga hasta los valores mínimos posibles, se intente que los canales y tuberías que transportan el agua tenga una pendiente inapreciable, lo cual conlleva implícitamente a una velocidad de circulación del agua muy baja. Esto es muy importante, ya que las pérdidas de cargas son proporcionales al cuadrado de la velocidad, y por ello en muchos casos la mejor solución es optar por construir un túnel, acortando el recorrido horizontal. [2]

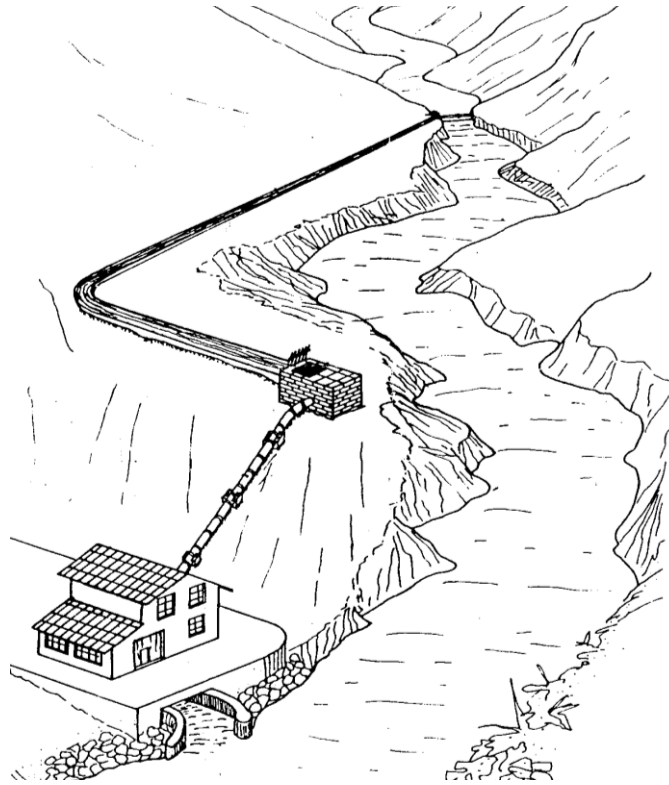


Figura 9. Esquema de una central de agua fluyente. Fuente: Mini hidráulica en el País Vasco, Ente Vasco de la Energía, 1995.

Además, es importante resaltar que existen casos en los que no es necesaria la construcción de un canal de derivación o una tubería forzada ya que hay ocasiones en las que las centrales directamente se construyen junto a un río y aprovechan la diferencia de altura generada por un azud ya existente, destinado a otros usos.

- **Centrales a pie de presa:**

Estas centrales poseen una ventaja muy notable respecto a las de agua fluyente: disponen de un caudal casi constante todo el año. Y esto es gracias a que cuentan con un embalse o presa construido en el cauce de un río, el cual cuenta con una toma de agua. Además, gracias a la presa, estas instalaciones poseen la capacidad de poder regular el caudal de salida del agua que se quiere turbinar en cada momento. Esta habilidad suele ser muy importante puesto que pueden proporcionar más energía durante las horas punta de consumo. [2]

Se las denomina centrales a pie de presa porque la sala de máquinas se encuentra habitualmente en la base o en las zonas bajas de la presa. Pero también existen las llamadas centrales de tipo caverna en las que la sala de máquinas se encuentra en el interior de la montaña a una cota en ocasiones inferior a la altura del desagüe para evitar el fenómeno de cavitación. [13]

También dentro de este grupo de centrales se encuentran las centrales situadas en embalses destinados a otros usos, como riegos o abastecimiento de agua en poblaciones. Dependiendo de los fines para los que fue creada la presa, se turbinan los caudales excedentes, los caudales desembalsados para riegos o abastecimientos, e incluso los caudales ecológicos.

Para la construcción de estas centrales suelen ser necesarios los siguientes elementos:

- Adaptación o construcción de las conducciones de la presa a la minicentral.
- Toma de agua con compuerta y reja.
- Tubería forzada hasta la central.
- Edificio central y equipamiento electromecánico.
- Subestación y línea eléctrica.

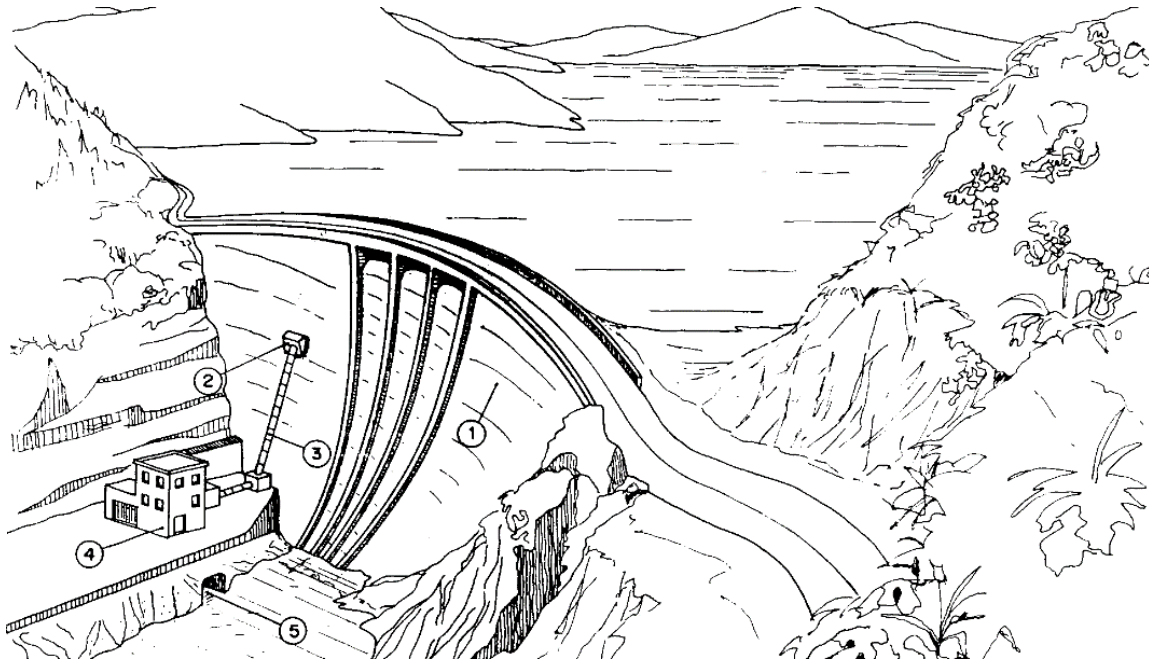


Figura 10. Esquema de una central a pie de presa. Fuente: Mini hidráulica en el País Vasco, Ente Vasco de la Energía, 1995.

1.4.3.3. Parámetros característicos

Existen dos parámetros clave para el diseño de una central hidroeléctrica de los que dependen el resto de elementos de la misma: Caudal y la altura del salto. [14]

- **Caudal:**

Es imprescindible la elección de un caudal de diseño que se ajuste a las características del río a emplear. A la hora de elegir el caudal a turbinar se deben de analizar los datos históricos del río (de más de 25 años), y el caudal ecológico del mismo. Estos datos se obtienen mediante estaciones de aforo, en las que se registran los caudales instantáneos que circulan por el tramo del río donde está ubicada la estación y a partir de los cuales se pueden determinar los caudales máximos, medios y mínimos diarios.

En caso de que se desconozcan los datos del caudal se realiza un estudio hidrológico teórico, basado en datos de precipitaciones de la zona y en aforos existentes, en cuencas semejantes. Además, en este caso se estima que el caudal ecológico es aproximadamente entorno a un 10% del caudal medio anual. [2] [14]

- **Altura del salto:**

Esta altura depende principalmente de la ubicación, orografía del terreno y del río a explotar. [2] [14]

Tal y como se puede apreciar en la figura 11, dentro de un salto de agua, existen diferentes alturas:

- **Altura Bruta (H_b):** Como anteriormente se ha definido es la diferencia de altura entre el nivel del agua en la toma y en la tubería de descarga. [2]
- **Altura Útil (H_u):** Diferencia de alturas existente entre la superficie superior donde se encuentra el agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe en la turbina. [2]
- **Altura neta (H_n):** Es igual la diferencia entre el salto bruto y la pérdida de carga en la toma y conducción. [2]
- **Pérdidas de carga (H_p):** Pérdidas por fricción del agua contra las paredes del canal y sobre todo en la tubería forzada, más las pérdidas ocasionadas por turbulencias, al cambiar de dirección el flujo, al pasar a través de una rejilla o de una válvula, etc. Se calculan mediante fórmulas derivadas de la dinámica de fluidos. [2]. Se puede estimar también que estas pérdidas son un 10% de la altura bruta.

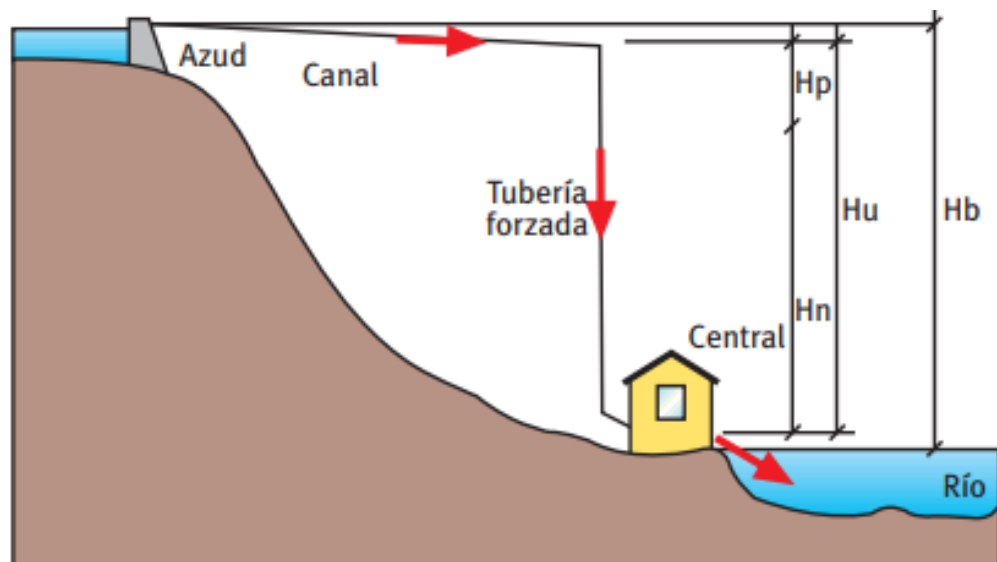


Figura 11. Esquema general de alturas de un salto de agua. Fuente: IDAE

En consecuencia y gracias a la definición de los dos parámetros anteriormente explicados (caudal y altura del salto), podemos obtener la potencia instalada más adecuada y la energía generada.

Como ya se ha explicado en el apartado 1.4.3.1. Partes de una central de energía mini hidráulica. Turbina y generador. La expresión (3) sirve para obtener la potencia instalada más adecuada para una central mini hidráulica en función de su caudal y su altura.

Donde en función del tipo de equipamiento como se puede ver en la expresión (4) se establece un rendimiento para la máquina medio. Este suele ser aproximadamente siempre de entorno el valor de 0,85.

Posterior al cálculo de la potencia máxima instalada, se puede obtener la producción media anual de la minicentral hidroeléctrica, como producto de la potencia en kW por las horas de funcionamiento estimadas que suele ser un rango de 1-13 horas/día por los 365 días que tiene un año. Esto se puede apreciar en la formula (5).

$$E = \text{Potencia instalada en kW} \cdot n^{\circ} \frac{\text{horas}}{\text{día}} \cdot 365 \text{días/año} \quad (5)$$

1.4.3.4. Parámetros económicos

Una de las partes más importantes a la hora de la realización de una central mini hidráulica, es la aproximación de la inversión inicial necesaria para llevar a cabo dicho proyecto.

Este importe depende de diversos factores como la orografía del terreno, los accesos, el tipo de instalación, el tamaño, la potencia y el punto de conexión. Además, hay que tener en cuenta las distintas partes del proceso y los costes que implica cada una.

Previamente a la construcción de una central, se elabora un proyecto con un presupuesto en función del volumen de la instalación y la potencia a instalar, en el cual se analizan todos los factores directos e indirectos, como la orografía, el caudal, etc.

Posteriormente, se procede a la ejecución de la obra, en la cual destacan tres partes principales: obra civil, grupo de turbina-generador y sistemas eléctricos (como subestación, red eléctrica, etc.). Y finalmente la última etapa corresponde a puesta en funcionamiento de la minicentral, que implica costes de explotación, mantenimiento y reparación. Estos gastos posteriores se pueden estimar que son del orden del 5% de la inversión inicial a realizar cada año de vida útil de la central.

En función del tipo de central (fluyente o pie de presa) y el tipo de actuación (rehabilitación o nueva construcción) se definen unos porcentajes aproximados, puesto que por ejemplo en la rehabilitación de una central parada, el porcentaje correspondiente a obra civil disminuye en función de la infraestructura que se puede aprovechar. [15]

Para el diseño de la calculadora nos vamos a centrar en los modelos de costes de centrales a pie de presa o de agua fluyente de nueva construcción. Como se puede apreciar a continuación en los gráficos circulares, en las centrales a pie de presa, el coste de la obra civil es ligeramente superior a las centrales de agua fluyente, siendo el equipo eléctrico y la turbina más económicas en las centrales a pie de presa puesto estas centrales suelen encontrarse más cerca de núcleos urbanos y el transporte e instalación suele ser más simple que en centrales de agua fluyente, las cuales suelen situarse en lugares aislados y en ocasiones sin red eléctrica.

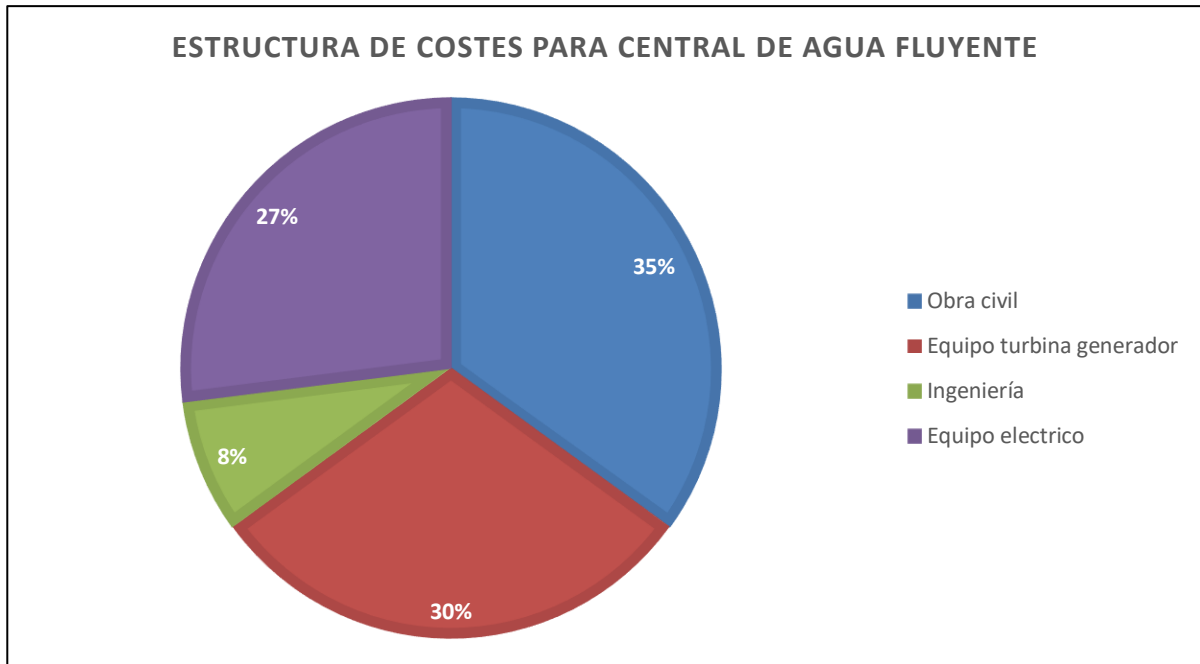


Figura 12. Estructura de costes para central de agua fluyente

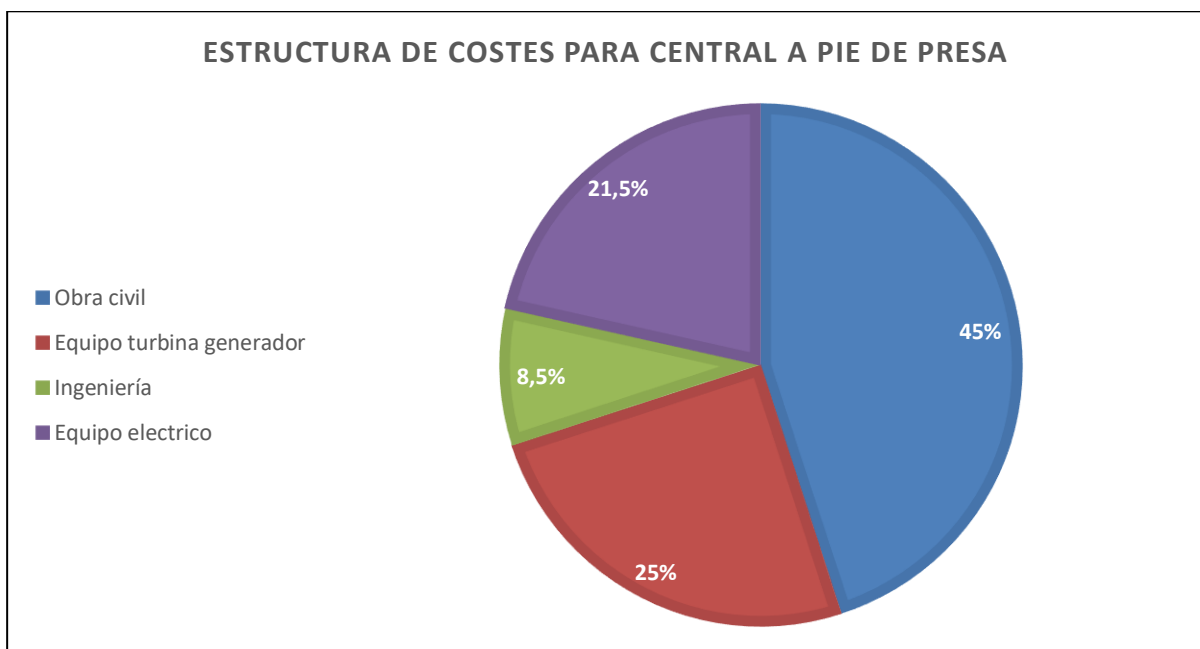


Figura 13. Estructura de costes para central a pie de presa

Para el cálculo de costes de la central nos basaremos en unas ecuaciones definidas en el trabajo de fin de máster: Análisis de la estructura de costes y de viabilidad de una central hidroeléctrica de Lucía García-Iturri Gallego de la Universidad de Cantabria [16] en el cual a partir de diferentes cálculos se definen unas ecuaciones para el coste de la obra civil en función de la altura del sato neto y el caudal de equipamiento.

En el gráfico de la figura 14. se puede observar la relación entre el coste de la obra civil para la construcción del edificio de la central, así como del resto de elementos que deban ser construidos, en función del caudal de equipamiento y la altura neta del salto.

Estas ecuaciones consideran un edificio básico con turbina, generador y maquinaria general para la generación, y en caso de central a pie de presa, la construcción de embalse o azud en el caso de central de agua fluyente. Además, en caso de que el edificio se encuentre en zonas de orografía complicada, o en el cauce del río para centrales de bajo salto y gran caudal, será necesario tener en cuenta un incremento de este coste en función de la complejidad de la construcción.

- Para alturas menores de 10 m:

$$\text{Coste obra civil en euros} = 0,0059 \cdot Q^4 + 1,3343 \cdot Q^3 - 109,11 \cdot Q^2 + 4403,1 \cdot Q + 39637$$

- Para alturas menores de 25 m:

$$\text{Coste obra civil en euros} = -0,0075 \cdot Q^4 + 1,6694 \cdot Q^3 - 132,37 \cdot Q^2 + 5003,5 \cdot Q + 39970$$

- Para alturas menores de 100 m:

$$\text{Coste obra civil en euros} = -0,0749 \cdot Q^4 + 7,9206 \cdot Q^3 - 320,041 \cdot Q^2 + 6978,7 \cdot Q + 38533$$

- Para alturas menores o iguales a 500 m:

$$\text{Coste obra civil en euros} = 37,81 \cdot Q^3 - 944,13 \cdot Q^2 + 11055 \cdot Q + 38533$$

- Para alturas mayores de 500 m:

$$\text{Coste obra civil en euros} = 10^{-10} \cdot Q^2 + 12844 \cdot Q + 38533$$

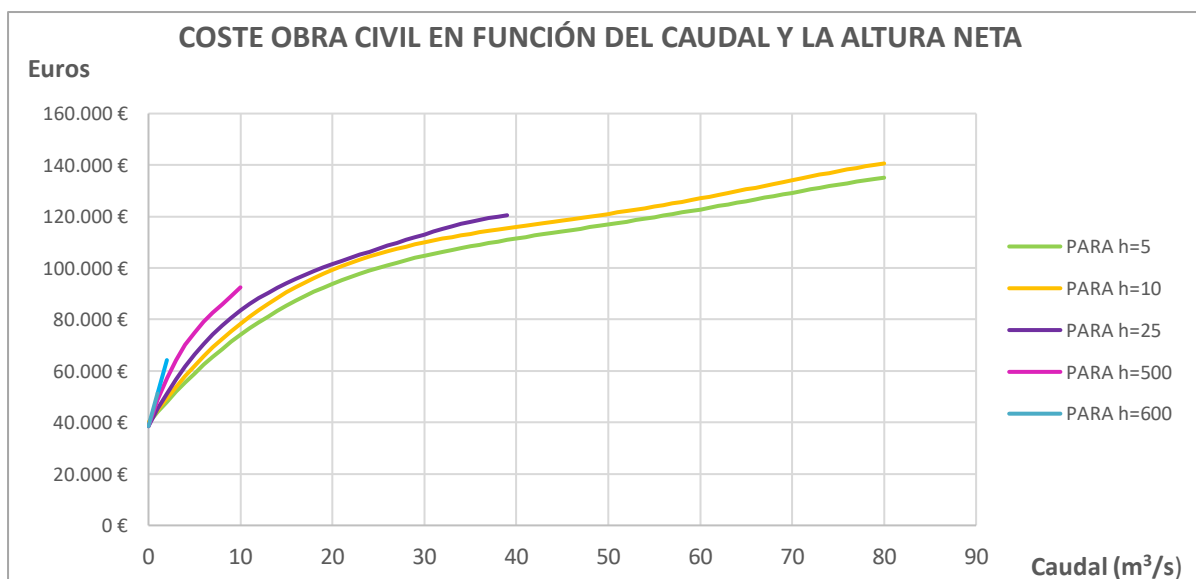


Figura 14. Gráfica del coste obra civil en función del caudal y la altura neta

1.4.3.4. Rentabilidad

Para poder analizar la rentabilidad de una central mini hidráulica se tienen en cuenta múltiples índices: [2]

- **Período de retorno simple:** es el tiempo que se tarda en recuperar la inversión.

$$P. R. = \frac{\text{Inversión (€)}}{(\text{Ingresos-gastos})\left(\frac{€}{\text{año}}\right)} \quad (6)$$

- **Índice de energía:** es el costo del kW generado.

$$I. E. = \frac{\text{Inversión (€)}}{\text{Energía producida}\left(\frac{kWh}{\text{año}}\right)} \quad (7)$$

- **Índice de potencia:** es el coste del kW instalado.

$$I. P. = \frac{\text{Inversión (€)}}{\text{Potencia instalada}(kW)} \quad (8)$$

Se consideran rentables, de forma aproximada, las centrales mini hidráulicas con valores comprendidos en los siguientes intervalos [2]:

- Período de retorno: 8 – 12 años
- Índice de energía: 40 – 70 cent€/kWh
- Índice de potencia: 1.500 – 2.000 €/kW

Para el cálculo de los ingresos anuales se va a estimar un precio de venta de la energía producida de 0,05 €/kWh y unos gastos de entorno el 5% al año de la inversión inicial a realizar. Cabe destacar que estos valores son a fecha de hoy, año 2021, y que existe la posibilidad en un futuro de que técnicos cualificados pueden acceder a los cálculos internos de la herramienta para adecuar los precios de compra y venta de la electricidad al momento.

Para analizar en nuestra calculadora la rentabilidad únicamente emplearemos los dos primeros índices: periodo de retorno simple e índice de energía, intentado que se cumplan los dos, y en su defecto uno.

Es aconsejable que, para realizar un estudio más exhaustivo de una central, se realicen unos cálculos de rentabilidad más detallados que incluyan VAN, TIR, etc. Ya que esta herramienta no considera la inflación del precio de la luz o su abaratamiento.

2. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA. METODOLOGIA.

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA PROPUESTA. PROGRAMA A EMPLEAR

El objetivo del presente trabajo es el diseño de una herramienta de simulación sencilla que permita analizar el potencial hidráulico de los ríos del Estado, a partir del caudal medio anual de un río, las horas de funcionamiento previstas y la diferencia de alturas entre dos puntos. Dicha herramienta ha sido diseñada mediante el programa Excel, y mediante ella se pueden obtener datos como la potencia máxima recomendada para una central en kW y MW, una estimación de la energía producida al año y ciertos parámetros económicos que determinan si la central que se ha diseñado es rentable.

DATOS A INTRODUCIR

Localización	Soraluze		
Río	Deva		
Caudal medio anual	33,4	m^3/s	0,334 m^3/s
Porcentaje de caudal a emplear	<input type="range" value="1%"/>		1%
Altura 1	24,00	m	
Altura 2	15	m	Altura bruta 9,00 m
Tiempo de funcionamiento al día	9,5	horas	

Central de agua fluyente
 Central a pie de presa

Las alturas deben encontrarse comprendidas entre 1 y 1000 m

Figura 15. Herramienta de cálculos hidráulicos. Visual de datos a introducir

RESULTADOS			
Localización	Soraluze		
Río	Deva		
Potencia instalada	20,30 kW	0,02	MW
Tipo de turbina	FRANCIS		
Tiempo de funcionamiento de la turbina	9,5	horas	
Tipo de central	CENTRAL DE AGUA FLUYENTE		
PARÁMETROS DE RENTABILIDAD			
Energía generada	69.350,00 kWh		
Periodo de retorno	103,8 años		
Indice de energía	1,69 €/KWh año		
Indice de potencia	5.850,11 €/kW		
Presupuesto aproximado final	117.002,14		euros
¿ES RENTABLE?	NO ES RENTABLE		

Figura 16. Herramienta de cálculos hidráulicos. Visual de resultados

Excel es un programa informático desarrollado por Microsoft, basado en el programa inicial Multiplan creado en 1982. Excel permite trabajar con datos numéricos y de texto, en una hoja de cálculo distribuida en tablas formadas por la unión de filas y columnas. [17]

Actualmente esta herramienta es muy conocida y empleada tanto en el ámbito personal como empresarial. Este programa permite realizar cálculos aritméticos básicos, aplicar funciones y emplear fórmulas tanto lógicas como estadísticas. Tal y como se puede apreciar en la figura 17, la visual inicial de dicho programa es muy similar a otros programas como Word o Power Point, con la diferencia de que, en vez de una hoja de texto, aparece una matriz de dos dimensiones formada por filas definidas con una serie numérica y columnas las cuales están definidas por una serie alfabética.

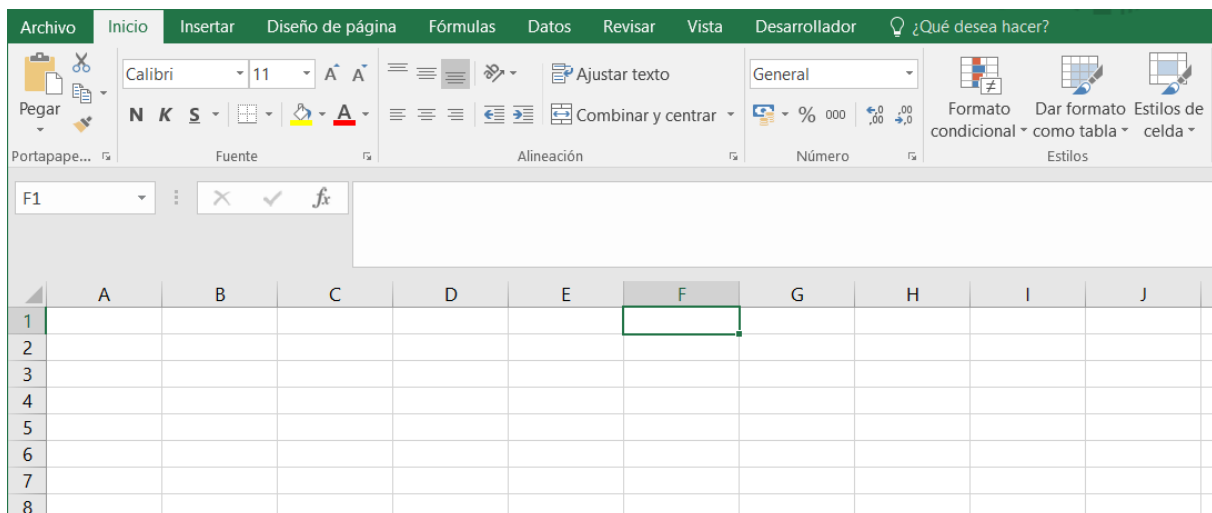


Figura 17. Visión inicial del programa Excel

2.2. CALCULOS Y ALGORITMOS

Para el desarrollo de la herramienta de simulación, se ha comenzado realizando una recopilación de todos los municipios del Estado. Esta lista se encuentra en la **hoja del Excel Datos Iniciales** y está organizada alfabéticamente. Posteriormente mediante la herramienta validación de datos la cual se puede encontrar en **Datos>>Validación de datos**, se ha asignado esta lista de municipios a la **celda F6 de la hoja de datos**. Como se puede apreciar en la figura 18, el criterio de validación ha sido Lista y el origen ha sido la tabla de municipios que se había creado previamente.

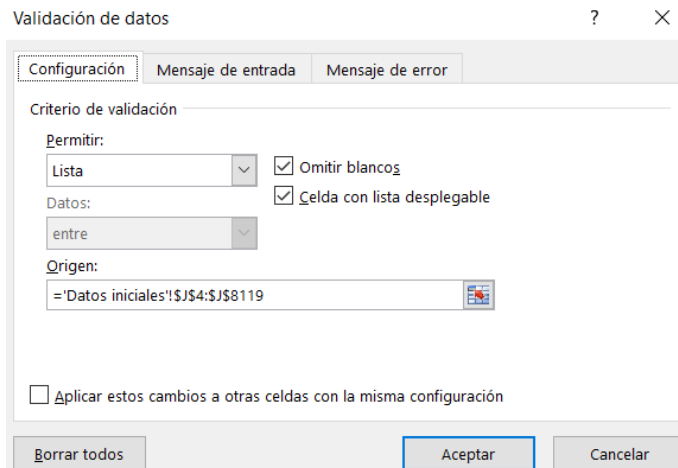


Figura 18. Herramienta de Validación de datos

Como resultado de la aplicación de esta herramienta previamente explicada, en la celda **F6 de la hoja Datos**, se puede apreciar una lista de municipios a elegir, como se observa en la figura 19.

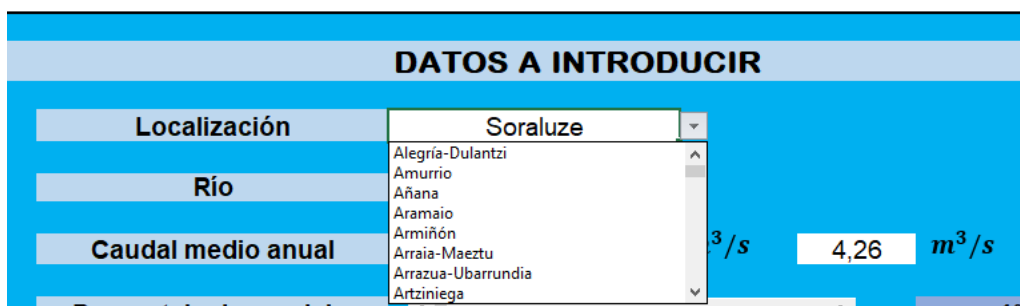


Figura 19. Lista desplegable de municipios

Después, al igual que con los municipios, se han recopilado los ríos más relevantes del Estado y sus caudales medios anuales en m^3/s . Los cuales se han recogido en la **hoja de Excel llamada Ríos y caudales**, organizada alfabéticamente.

Y como anteriormente con los municipios, mediante la herramienta validación de datos, se ha creado una lista desplegable como se observa en la figura 20, para la **celda F8 de la hoja Datos** de todos los ríos del Estado.

DATOS A INTRODUCIR	
Localización	Soraluze
Río	Ebro
Caudal medio anual	4,26 ^{3/s}
Porcentaje de caudal a emplear	100 %

Figura 20. . Lista desplegable de ríos del Estado

Además, la selección de un río de la lista, implica que automáticamente en la casilla de caudal medio anual (**celda F10 de la hoja Datos**) aparezca el valor correspondiente a este río en m³/s. Esta automatización se ha conseguido implementar mediante la fórmula lógica **SI.ERROR**, que es útil para detectar y controlar errores en una fórmula, junto con la combinación de la acción **BUSCARV** que permite buscar un objeto en una tabla. [18]

En la **celda F10 de la hoja de Datos** de la herramienta de simulación, se ha implementado la siguiente fórmula: **SI.ERROR (BUSCARV(F8;'Rios y caudales'!C4:D172;2;FALSO);"")**

Esta fórmula indica que a partir del valor de la **celda F8 de la hoja de Datos**, se busque en el rango definido de la hoja de ríos y caudales, el valor correspondiente a la columna dos, en la cual se encuentran los caudales medios anuales.

A continuación, en la tabla 2 se recogen los datos de los ríos del Estado con su caudal medio anual correspondiente.

Tabla 2. Ríos y caudales del estado

Río	Caudal medio anual (m ³ /s)
Adaja	11,11
Adra o Grande	0,51
Aguasvivas	0,057
Águeda	13,59
Alagón	39,23
Alberche	7,73
Algodor	0,5
Alhama	0,3
Aliste	2,23
Almanzora	0,3
Almar	0,49
Almonte	3,99
Amarguillo	0,51
Andarax o Almería	0,3
Aragón	41
Arba	3,44
Ardila	2,914
Arga	59,76
Arlanza	12,852
Arlanzón	4,408
Asón	16,7
Azuer	0,44
Bajoz	0,4
Bembézar	1,56
Bernesga	9,18
Besaya	12,2
Bidasoa	24,7
Boeza	168
Bullaque	1,215
Burdalo	0,37
Cabrera	1,686
Cabriel	20,92
Cañamares	0,82
Cardener	6,16
Carrión	20,83
Cea	6,696
Cega	1,25
Chanza	1,21
Cidacos	2,7
Cigüela	1,93

Cinca	75,16
Cofio	0,7
Corbones	0,44
Córcoles	0,3
Cúa	12,282
Cueza	2,117
Deva	33,4
Duerna	2,644
Duero	675
Duratón	4,55
Ebro	426
Ega	13,76
Eo	19,61
Eresma	7,5
Eria	6,3
Escabas	45,19
Ésera	19,113
Esgueva	0,4
Esla	182
Estena	1,89
Eume	16,286
Fluviá	10,67
Francolí	1,18
Gállego	34,2
Gallo	1,794
Gargaligas	0,386
Gayá	0,57
Genil	1,38
Guadaíra	5,704
Guadajira	5,698
Guadajoz	12,578
Guadalefra	0,9
Guadalemar	12,38
Guadalentín	0,1
Guadalete	10
Guadalfeo	0,31
Guadalhorce	1,07
Guadalimar	11,764
Guadalmez	9,378
Guadalope	4,83
Guadalquivir	19,8
Guadalupe	53,25
Guadarrama	152

Guadiana	26
Guadiana Menor	15,76
Guadiaro	30
Guadiela	69
Guareña	0,678
Huebra	7,091
Huerva	0,84
Ibaizábal	11,8
Izbor	0,48
Jabalón	1,399
Jalón	6,42
Jándula	5,84
Jarama	32,1
Jerte	13,965
Jiloca	2,1
Júcar	29,22
Lacara	0,98
Lérez	21,3
Llobregat	19
Lozoya	9,94
Magro	0,91
Manzanares	3,25
Martín	1,149
Matachel	3,792
Matarraña	6,51
Miera	5,24
Mijares	14,72
Miño	340
Muga	3,34
Mundo	25
Najerilla	16,45
Nalón	55,18
Nansa	1,85
Narcea	38,17
Navia	62,85
Nervión	9,6
Noguera Pallaresa	37,1
Noguera Ribagorzana	21,7
Odra	0,499
Omaña	14,56
Ortiga	0,512
Palancia	1,5
Pas	18,1
Piedras	4,19

Pirón	1,127
Pisuerga	82
Porma	14,17
Riaza	2,68
Ruecas	0,76
Saja	26,03
Salor	5,13
Segre	100,2
Segura	5
Sella	18,07
Sequillo	1,071
Serpis	2,5
Sil	100
Sorbe	3,93
Tajo	18,76
Tajuña	1,87
Tambre	54,1
Ter	17,15
Tera	10,78
Tiétar	30,71
Tordera	5,01
Torio	4,325
Tormes	26
Tuerto	0,913
Turia	14
Ubierna	1,03
Ucieza	0,974
Ulla	79,3
Urbel	50
Valdavia	3,73
Valdeginete	1,703
Valdemembra	0,049
Valderaduey	4,19
Vélez	0,4
Viar	3,032
Vinalopó	0,85
Voltoya	0,74
Yeltes	3,83
Zadorra	13,7
Záncara	1,93
Zapardiel	1,14
Zújar	9,053

A su vez se ha programado el macro de una barra porcentual, la cual permite seleccionar cuanto porcentaje del caudal medio anual se desea emplear para turbinar en la central mini hidráulica. Esta barra porcentual abarca un rango desde el 1% hasta el 100% del caudal medio anual.

En la figura 21 se puede apreciar la barra porcentual mencionada anteriormente, junto a la **celda I12 de la hoja de datos**, en la cual se detalla el valor del porcentaje elegido (redondeado en rojo) y la **celda H10 de la hoja de Datos**, en la que se indica cuál es el valor del caudal a emplear a partir del porcentaje elegido.

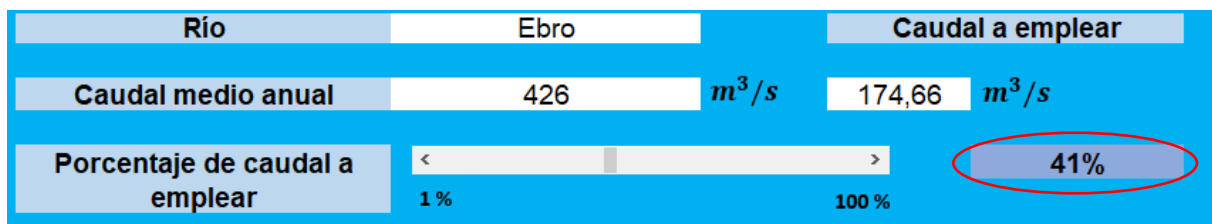


Figura 21. Datos de caudal en la herramienta de simulación

De nuevo para la selección de la altura 1 y altura 2 y, por consiguiente, poder hallar la diferencia de alturas en metros, se ha empleado en las **celdas F15 y F17 de la hoja de Datos**, la herramienta validación de datos. En este caso en ambas celdas se ha creado una lista numérica desplegable, que abarca un rango desde 1 m hasta 1.000 metros.

Para poder saber la altura bruta resultante, en la **celda I16 de la hoja de Datos** la cual se puede visualizar en la figura 22, bordeada en verde, se ha introducido la siguiente fórmula: **SI(F15-F17>0; F15-F17; "ALTURA NO VALIDA")**. La fórmula **SI** permite realizar comparaciones lógicas entre un valor y un resultado que espera, la fórmula **SI** puede tener dos resultados. El primer resultado es si la comparación es verdadera y el segundo si la comparación es falsa [19]. En la herramienta de simulación, la fórmula indica que, si la diferencia entre la altura 1 y altura 2 es mayor que 0 m, la **celda I16 de la hoja de Datos** toma el valor de la diferencia de alturas, sin embargo, si la diferencia entre la altura 1 y la altura 2 es negativa, la celda **I16** indicará que esta altura no es válida, puesto que la altura 1 siempre debe ser más alta que la altura 2.

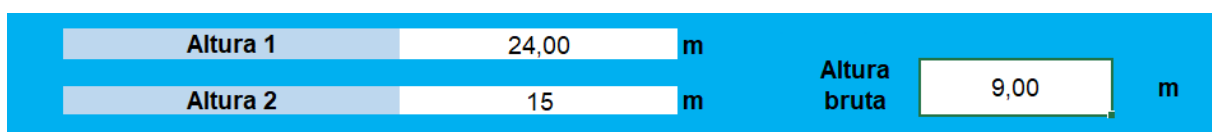


Figura 22. Datos de las alturas en la herramienta de simulación

Después, se tendrá que seleccionar el número de horas de funcionamiento de la central en la **celda F19 de la hoja de Datos** como se aprecia en la figura 23, la cual de nuevo tiene aplicada la herramienta de validación de datos, con una lista de tiempos en horas, con un rango desde la media hora hasta las veinte horas.

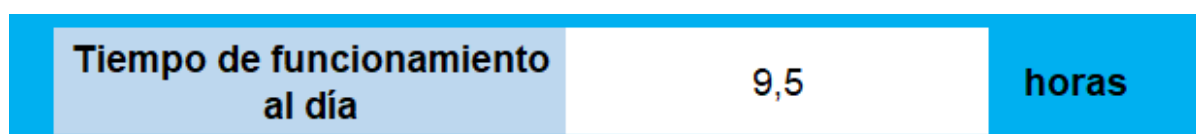
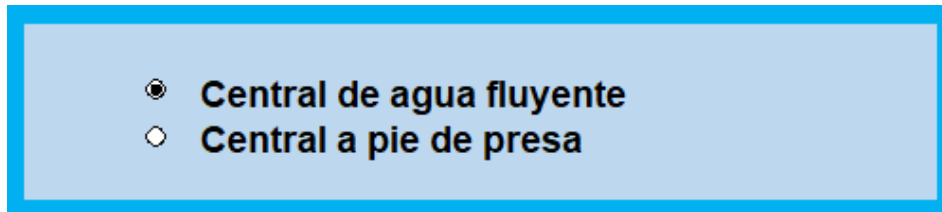


Figura 23. Datos de tiempo de funcionamiento en la herramienta de simulación

Y, por último, seleccionaremos el tipo de central que se quiere dimensionar como se puede ver en la figura 24, lo cual se empleará posteriormente para saber el coste aproximado la central.



Central de agua fluyente
 Central a pie de presa

Figura 24. Datos del tipo de central en la herramienta de simulación

Este macro emplea un botón de opción, el cual se ha programado mediante la **pestaña de programador >> Insertar>> Controles de formulario>> Botón de opción**; nos permite que, si la **celda F25 de la hoja de Datos** toma el valor uno, la calculadora detectará que es una central de agua fluyente y si la **celda F25 de la hoja de Datos** toma el valor dos, se tiene una central a pie de presa.

Una vez se han introducido todos estos parámetros explicados anteriormente, en la parte derecha de la herramienta de simulación, aparecerán los resultados del dimensionamiento de la central. Estos cálculos se realizarán internamente en la **hoja de Central** y se mostrarán visualmente en la **hoja de Datos**, como se puede apreciar en la figura 16.

Los datos del municipio de la **celda Q6 de la hoja de Datos** y del río de la **celda Q8 de la hoja de Datos** que se aprecian en la figura 25, se sacarán automáticamente de los datos introducidos en las **celdas F6 y F8 de la hoja de Datos**.



Localización	Soraluze
Río	Ebro

Figura 25. Resultados de localización de la herramienta de simulación

El siguiente resultado que se muestra en la columna de resultados es la potencia máxima instalada recomendada para la central en kW y MW como se muestra en la figura 26. Los cálculos para la obtención de este dato se realizan internamente en la **hoja Central** concretamente en la **celda D17**, mediante la fórmula (3) empleando los datos del caudal medio anual útil, el salto neto y un rendimiento medio del 0,85.



Potencia instalada	4.402,24 kW	4,40	MW
--------------------	-------------	------	----

Figura 26. Resultado de potencia máxima instalada en la herramienta de simulación

Además, es importante destacar que cuando la potencia instalada supere los 10 MW, como se puede apreciar en la figura 27, se indicará la potencia instalada en kW en la **celda Q19 de la hoja de Datos** y en la **celda S9 de la hoja de Datos** se indicará que **NO ES UNA CENTRAL MINI HIDRAULICA**.



Figura 27. Resultados cuando no es una central mini hidráulica en la herramienta de simulación

Según la fórmula (3), para el cálculo de la potencia máxima recomendada, son necesarios los valores de: altura neta, caudal a emplear y el valor de un rendimiento medio de todos los equipos. A continuación, se detalla la obtención y cálculo de estos parámetros.

El cálculo del salto neto, se obtiene a partir de la altura bruta obtenida en la **celda I16 de la hoja de Datos**. La altura neta se muestra en la **celda D10 de la hoja de Central**, que es igual a **la Altura bruta*0,9**. Ya que como previamente se ha expuesto, las pérdidas de carga son aproximadamente iguales al 10% de la altura bruta.

Altura bruta	9,00
Altura neta	8,1
	8,1

Figura 28. Cálculo interno de alturas en la herramienta de simulación

Lo primero para obtener el caudal útil que se puede aprovechar, es tener en cuenta que debe existir siempre en el río un caudal ecológico mínimo el cual no se puede turbinar bajo ninguna circunstancia. El caudal ecológico suele tener un valor de entorno el 10% del caudal medio anual. Es por ello que en la **celda D13 de la hoja Central**, se obtiene el cálculo del caudal ecológico del río seleccionado como se aprecia en la figura 29.

Sin embargo, el caudal útil depende además de otro parámetro, el porcentaje de caudal que se desea emplear. Este parámetro se ha seleccionado previamente mediante la barra porcentual que se encuentra en la **hoja de Datos**. Por ello, teniendo en cuenta lo explicado, obtenemos que el caudal útil que se muestra en la celda **D15 de la hoja de Central** es igual a: **Caudal medio anual*Porcentaje-Caudal ecológico**.

Caudal ecológico (10% de Q)	28,97
Caudal util	260,71

Figura 29. Cálculo interno de caudales en la herramienta de simulación

Una vez obtenidos los dos parámetros clave (altura neta y caudal útil), en la celda **D17 de la hoja de Central** se aplicará la fórmula (3), y puesto que este resultado puede tener valores decimales, se realizará en la **celda D19 de la hoja de central**, un redondeo del valor mediante la fórmula **REDONDEAR.MENOS(D17; -2)**, la cual redondea las centenas [20].

Potencia instalada máxima	1.368
Potencia instalada	1.400,00

Figura 30. Cálculo interno de potencia en la herramienta de simulación

El siguiente dato que muestra la visual de resultados de la hoja de Datos, es el tipo de turbina recomendada. Para la obtención de cuál es la turbina más idónea, se han empleado los rangos de caudal que se muestran en la Tabla 3. Tabla de rangos de caudal y altura neta para turbinas. Cabe destacar que previamente también se realizaron pruebas con los rangos de alturas para la elección de turbina, pero después de varias simulaciones se comprobó que los rangos de caudal se ajustaban más a la realidad (corroboración mediante datos de centrales existentes).

Para aplicar los rangos y obtener el tipo de turbina recomendada, en la **celda H10 de la hoja de Central** se ha aplicado la siguiente formula, que como previamente se ha explicado, permite realizar comparaciones lógicas entre un valor y un resultado que se espera. **SI(CAUDAL<=0,3;"PELTON";SI(CAUDAL<=20;"FRANCIS";SI(CAUDAL>20;"KAPLAN";FALSO)))**.

Tipo de turbina	KAPLAN
-----------------	--------

Figura 31. Resultado de tipo de turbina en la herramienta de simulación

Después, aparecerán los resultados de tiempo de funcionamiento de la turbina en horas, que se obtiene directamente desde la **celda F19 de la hoja de Datos**. También, aparecerá el tipo de central, que se obtendrá mediante la siguiente formula, **SI(F25=1;"CENTRAL DE AGUA FLUYENTE";"CENTRAL A PIE DE PRESA")**, en función del valor de la **celda F25 de la hoja de Datos**.

Tiempo de funcionamiento de la turbina	9,5	horas
Tipo de central	CENTRAL DE AGUA FLUYENTE	

Figura 32. Resultado de tipo de central y horas de funcionamiento en la herramienta de Figura simulación

Es importante matizar que además de proporcionar datos técnicos, la herramienta de simulación también posee la capacidad de calcular ciertos parámetros económicos mencionados previamente como son el índice de potencia, el periodo de retorno o el índice de energía. Para la obtención de estos índices preliminarmente se ha calculado la energía que podría generar la central diseñada en un año y cuál sería su presupuesto inicial aproximado.

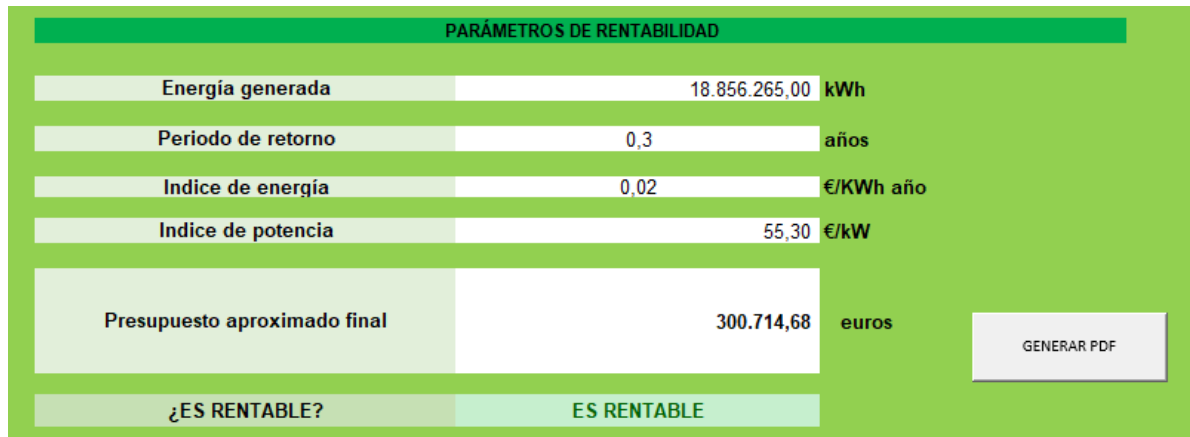


Figura 33. Resultado de los parámetros económicos de una central mini hidráulica en la herramienta de simulación

El cálculo del valor de la energía generada que se puede apreciar en la figura 33, se calcula internamente en la **hoja de Central** implementando en la **celda G15 de la hoja Central** la fórmula (5), empleando los datos de potencia instalada en kW de la **celda D19 de la hoja de Central** y el tiempo de funcionamiento al día en horas, seleccionado previamente en la **celda F19 de la hoja de Datos**.

Para la obtención del resto de parámetros económicos será necesario primero, realizar el cálculo de un presupuesto aproximado, teniendo en cuenta el tipo de central y los porcentajes correspondientes ya detallados en las gráficas de las figuras 12 y 13.

Como previamente se detallaba en el apartado 1.4.3.4. Parámetros económicos, existen unas ecuaciones en función del caudal y altura de la central que nos facilitan el cálculo económico que supondría la obra civil en euros. Estas fórmulas se han implementado internamente en la **celda M10 de la hoja de Central** mediante el algoritmo lógico que se muestra a continuación:

```
SI(ALTURA<=10;0,0059*CAUDAL^4+1,3343*CAUDAL^3-109,11*CAUDAL^2+4403,1*CAUDAL+39637;SI((ALTURA)<=25;0,0075*CAUDAL^4+1,6694*CAUDAL^3+132,37*CAUDAL^2+5003,5*CAUDAL+39970;SI((ALTURA)<=100;0,0749*CAUDAL^4+7,9206*CAUDAL^3+320,04*CAUDAL^2+6978,7*CAUDAL+38533;SI((ALTURA)<=500;37,81*CAUDAL^3+3944,14*CAUDAL^2+11055*CAUDAL+38533;SI(ALTURA>500;"10^10*CAUDAL^2+12844*CAUDAL+38533";))))).
```

Este algoritmo permite que en función del rango en el que se encuentre la altura neta, se seleccione una ecuación que depende directamente del caudal útil.

Gracias a las estructuras de costes de las figuras 12 y 13, se calcularán los porcentajes correspondientes a turbina, equipo eléctrico e ingeniería a partir del coste de la obra civil en euros, que abarca entorno al 35-45% de los gastos totales de la central en función de su tipología. Obteniéndose finalmente en la **celda M8 de la hoja Central**, el coste total de la inversión, como resultado del sumatorio de todos los costes multiplicado por el 10% de I.V.A, que directamente se mostrará en la **celda Q29 de la hoja de Datos**, como se aprecia en la figura 33.

A partir del dato del coste inicial total en euros y de la energía generada anualmente en kWh/año, suponiendo unos beneficios anuales equivalentes a la energía generada al año en kWh · 0,05 €/kWh y unos gastos anuales por mantenimiento de entorno al 5% del coste

total de la inversión al año, se obtienen los beneficios anuales en la **celda D23 de la hoja Central** y gastos anuales en la **celda D25 de la hoja Central**, que posteriormente se emplearán para el cálculo del periodo de retorno simple.

Gracias a los datos calculados anteriormente como son los gastos, ingresos, potencia y energía, se han implementado las formulas (6), (7) y (8) en las **celdas J22, J24 y J26 de la hoja de Central** respectivamente para la obtención de los índices que se muestran en la figura 33, los cuales permiten saber si nuestra central es rentable económicamente y energéticamente hablando.

En la herramienta de simulación se ha establecido que una central mini hidráulica es rentable si su periodo de retorno es menor a 12 años o su índice de energía es menor de 0,7 €/KWh· año. Estas condiciones se ha efectuado mediante la siguiente formula: **SI (Q10/1000<=10;SI(Q23<=12;"ES RENTABLE";SI(Q25<=0,7;"ES RENTABLE";"NO ES RENTABLE")))**. En caso de que se cumplan estas condiciones, en la **celda Q31 de la hoja Datos** aparecerá lo que se muestra en la figura 34.



Figura 34. Resultado de rentabilidad favorable en la herramienta de simulación

En caso de que la central se amortice en más tiempo o su índice de energía sea superior al establecido, la central no será rentable y aparecerá lo que se muestra en la figura 35.

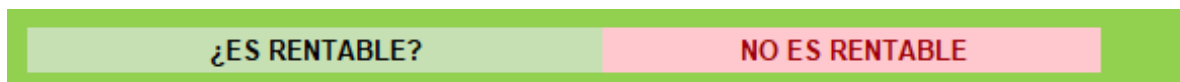


Figura 35. Resultado de rentabilidad desfavorable en la herramienta de simulación

Y finalmente, es importante indicar que, si la central no cumple con el parámetro de potencia menor a los 10 MW, aparecerá lo siguiente como se muestra en la figura 36, indicando que no se pueden calcular.

PARÁMETROS DE RENTABILIDAD		
Energía generada	14.177.512,50	kWh
Periodo de retorno	NO SE PUEDE CALCULAR	años
Índice de energía	NO SE PUEDE CALCULAR	€/KWh año
Índice de potencia	NO SE PUEDE CALCULAR	€/kW
Presupuesto aproximado final	NO SE PUEDE CALCULAR	euros
<input type="button" value="GENERAR PDF"/>		
¿ES RENTABLE?		

Figura 36. Resultado de rentabilidad no aplicables en la herramienta de simulación

Es apreciable destacar que la herramienta cuenta con un botón que da la opción de generar un Pdf automático como se aprecia en la figura 36, con los datos introducidos y los resultados obtenidos. Esta macro se ha creado mediante la herramienta Botón y se le ha asignado el siguiente código de programación:

Sub ExportarPDF()

```
ActiveSheet.ExportAsFixedFormat Type:=xlTypePDF, _
```

```
Filename:=ThisWorkbook.Path & "\RESULTADOS.pdf",
```

```
Quality:=xlQualityStandard, _
```

```
IncludeDocProperties:=True, IgnorePrintAreas:=False,
```

```
OpenAfterPublish:=True
```

End Sub

2.3. MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN CON LA HERRAMIENTA

Para la verificación de que la herramienta de simulación previamente descrita está bien diseñada, se va a realizar la comparativa de datos de una central ya existente con los datos obtenidos mediante la calculadora.

Se ha elegido la Central Hidroeléctrica Virgen de las Viñas, situada Finca Cantaburros. T.M. Ctra. Soria. km 266, Aranda de Duero. Esta central de agua fluyente, situada en el margen derecho del cauce del río Duero fue construida en 1995 y cuenta además con una presa de gravedad de 17 m de altura y 26 m de longitud, la cual fue creada para el almacenamiento de agua con una capacidad de 1,2 millones de m³, además de para generar un salto bruto de agua de manera artificial de entorno 8,5 metros. [2] [21]



Figura 37. Central Hidroeléctrica Virgen de las Viñas. Fuente: Diario de Burgos

En la presa existe una toma la cual se encarga de llevar hacia la turbina una pequeña parte del caudal del río (en torno a 25-27 m³/s del caudal total del río). El edificio de la central cuenta con un grupo de generación, sistema eléctrico de potencia a 13.200 V y 6.000 V, sistema de control, sistemas auxiliares de accionamiento, grupo electrógeno de emergencia para las compuertas de la presa, puente grúa y complementos de seguridad y vigilancia [2].

La central está equipada con una turbina de tipología Kaplan como la que se aprecia en la ilustración 38, de doble regulación y generador síncrono trifásico de 2.290 kVA, con una potencia instalada de 1.670,00 kW nominales que se estima que llega a producir entorno a 6.600 MWh/año. [2]



Figura 38. Turbina Kaplan de la central Virgen de las Viñas. Fuente: IDAE

Una vez recopilados y verificados los datos de la central existente seleccionada, se han introducido en la herramienta de simulación como se puede apreciar en la figura 39.

DATOS A INTRODUCIR			
Localización	Aranda de Duero		
Río	Duero	Caudal a emplear	
Caudal medio anual	675 m^3/s	27 m^3/s	
Porcentaje de caudal a emplear	<input type="range" value="4"/>		4%
	1%	100%	
Altura 1	17,00 m	Altura bruta	8,50 m
Altura 2	8,5 m		
Tiempo de funcionamiento al día	11	horas	
<input checked="" type="radio"/> Central de agua fluyente <input type="radio"/> Central a pie de presa			
Las alturas deben encontrarse comprendidas entre 1 y 1000 m			

Figura 39. Datos introducidos en la herramienta de simulación correspondientes a la central mini hidráulica de Virgen de las Viñas

Obteniendo los resultados que se pueden apreciar en la figura 40. Los cuales se analizan en el siguiente apartado 2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

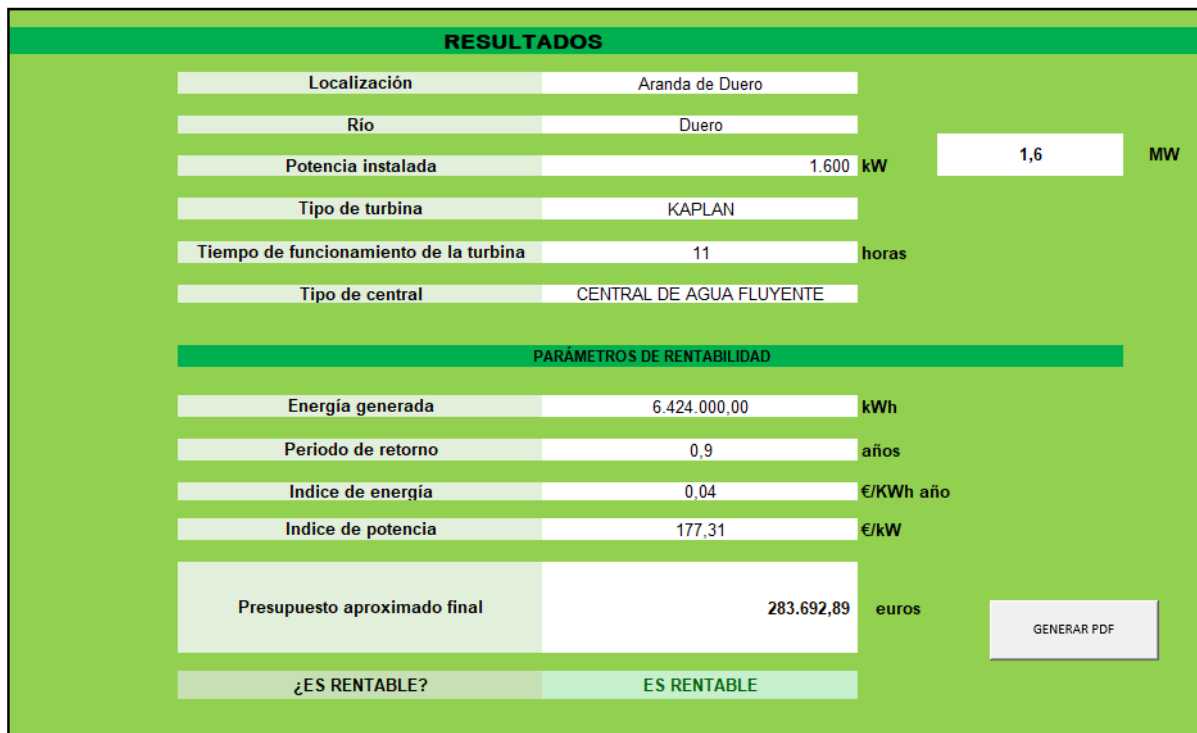


Figura 40. Resultados obtenidos en la herramienta de simulación correspondientes a la central mini hidráulica de Virgen de las Viñas

2.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de obtener los resultados de la simulación que se aprecian en la figura 40, se puede afirmar que los cálculos que realiza la herramienta de simulación diseñada se asemejan bastante a los parámetros reales de la central ya existente. Este análisis ha servido para verificar que la calculadora de dimensionamiento de centrales mini hidráulicas está bien modelizada y se ajusta a la realidad.

La potencia instalada en la central Virgen de las Viñas según la herramienta, debería de ser de entorno 1,6 MW siendo la potencia real instalada 1,67 MW. Esta fluctuación seguramente se debe a que la calculadora emplea un coeficiente de rendimiento estándar del 0,85 el cual puede oscilar en función de la turbina. Sin embargo, la tipología de turbina coincide con la instalada en la central actualmente, una turbina Kaplan.

En cuanto a las ratios de producción anual estimadas, se puede afirmar que con un funcionamiento medio de 11 horas diarias al día se llegan a producir aproximadamente 6.424,00 MWh/año. Este dato es similar al determinado por el IDAE [2], el cual ronda un valor de 6.600 MWh/año.

Asimismo, gracias a los cálculos económicos implementados en la herramienta, cualquier persona que quiera simular una central podrá saber un coste aproximado, el periodo de amortización y otros parámetros como el índice de energía que ayudarían a saber si la propuesta es económica y energéticamente rentable.

Finalmente es importante destacar que se han realizado dos simulaciones más, para analizar en que influye la fluctuación del precio de venta de la electricidad:

- Suponiendo un aumento del precio de venta de la electricidad a 0,08 €/kWh
- Suponiendo una reducción del precio de venta de la electricidad a 0,03€/kWh

En la primera simulación se ha podido comprobar como al aumentar el precio de venta de la electricidad se ha conseguido reducir el periodo de retorno a 7 meses, manteniéndose el resto de parámetros como el índice de energía o el índice de potencia invariables.

Sin embargo, en la segunda simulación, al reducir el precio de venta de la electricidad se ha podido comprobar como los ingresos anuales disminuyen en un 60% respecto a los estimados con un precio de venta de la electricidad de 0,05 €/kWh. Asimismo el periodo de retorno ha aumentado sustancialmente hasta el año y medio, manteniéndose el resto de parámetros como el índice de energía o el índice de potencia invariables.

3. APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1. UBICACIÓN Y DATOS

Con el objetivo del aprovechamiento eléctrico del recurso hidráulico del río Bidasoa, se pretenden rediseñar y crear varias centrales mediante la herramienta de simulación, que permitan el autoabastecimiento de los pueblos que se encuentran en el cauce del río como Subilla, Igantzi, Lesaka, Etxalar y Bera de Bidasoa. Estas simulaciones se van a realizar con la herramienta puesto que previamente en el apartado 2.3. Modelización y simulación, ya se ha verificados que los resultados obtenidos son adecuados, gracias a la comparación con una central ya existente.

El río Bidasoa es un río muy caudaloso que nace en Erratzu (Navarra) y discurre por las provincias de Navarra y Guipúzcoa. Según la Confederación Hidrográfica del Norte, la dinámica real del río Bidasoa ($765,17 \text{ hm}^3/\text{año}$ y un caudal medio de $24,7 \text{ m}^3/\text{s}$) es muy variable en algunos tramos concretos, debido a la gran cantidad de centrales hidráulicas que se crearon en los años 80, de las cuales únicamente siguen en uso ocho. [22]

Se han estudiado las diferentes ubicaciones del río donde se situarán las centrales a diseñar o restaurar, analizando las diferencias de altitud para encontrar mejoras que implementar o la creación de nuevos aprovechamientos hidráulicos.

La primera central a rediseñar es la de Yanci I o también llamada central de Igantzi, situada en las coordenadas $43.23212815^\circ \text{ N } 1.67497207^\circ \text{ O}$, en los municipios de Sunbilla e Igantzi. Actualmente cuenta con una potencia instalada de 1.160 kW , un salto bruto de $38,2 \text{ m}$ y un caudal útil de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ [22] [23]. Esta central cuenta con una capacidad de producción anual de $5.274.834 \text{ kWh/año}$ gracias a sus $4.547,27$ horas de funcionamiento al año, lo que es equivalente a $12,5$ horas al día. El objetivo de su rediseño es el conseguir una mayor potencia instalada para poder autoabastecer a los dos municipios cercanos, turbinando más caudal. [23]

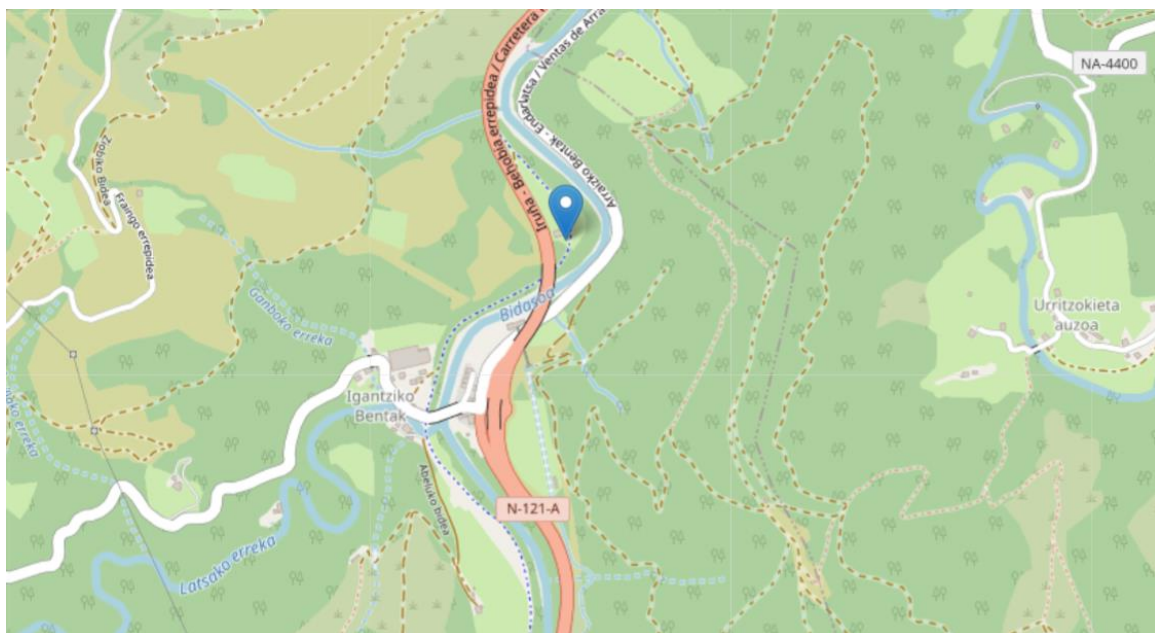


Figura 41. Ubicación de la central Yanci I, en Igantzi

Posteriormente se diseñará una central de agua fluyente en el municipio navarro de Lesaka, aprovechando el azud existente perteneciente a una antigua central, el cual se encuentra de desuso y se pretende derribar en caso de que no se encuentre uso alguno al mismo.

La antigua central contaba con una potencia instalada de 200 kW y una producción anual de 1.018.270 kWh/año. Este azud se tomará como ubicación 1 de nuestra central puesto que se encuentra a una altura de 68 metros, en las siguientes coordenadas: 43.26108892764023° N, 1.684754492191325° O. [24]

Las ubicaciones para la futura central son las siguientes: ubicación 1 a una altura de 68 metros y la ubicación 2 a una altura de 33 metros, provocando un salto bruto de 35 metros.

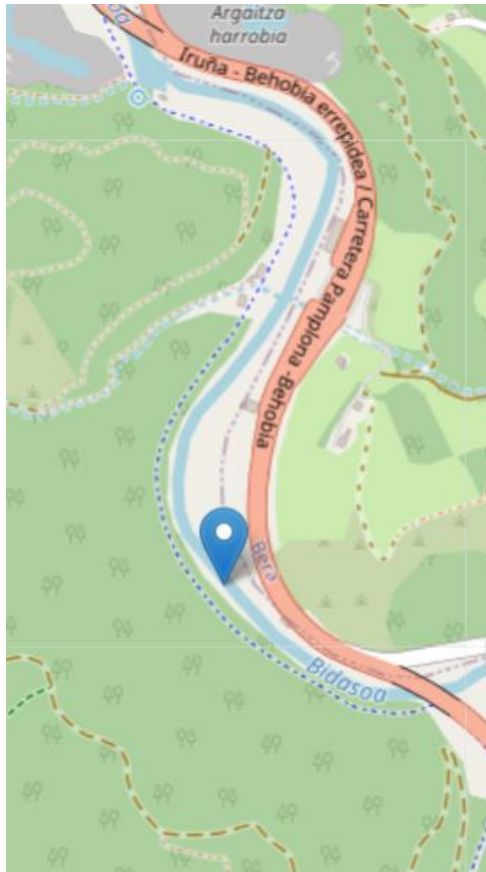


Figura 43. Ubicación azud. Altura 1

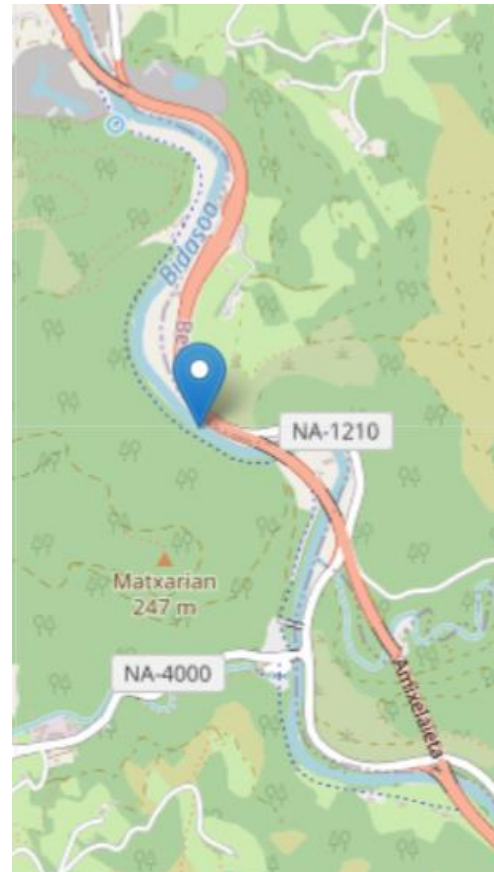


Figura 42. Ubicación azud. Altura 2

Para poder analizar el potencial hidráulico de la ubicación de forma más exacta, primero se debe estudiar el caudal que indica la estación de aforo más cercana, en nuestro caso es la estación de aforo de Endarlatsa, la cual indica que el río Bidasoa tiene un caudal medio de 24,7 m³/s el cual rara vez baja de los 9 m³/s. Por ello se tomará un caudal de entorno 8,6 m³/s.

Finalmente se diseñará una nueva central junto a la ya existente central de Bera de Bidasoa, la cual ha sido cedida hace poco tiempo al gobierno de Navarra por parte de Iberdrola. [25]

Con el objetivo nuevamente de ampliar la potencia instalada y caudal turbinado, ya que actualmente cuenta con una potencia instalada de 408 kW, un caudal turbinable de 8,6 m³/s y un salto bruto de 7 metros, generando un total de 1.876.546 kWh/año, se diseñará una central contigua de mejores prestaciones. [23] [26]

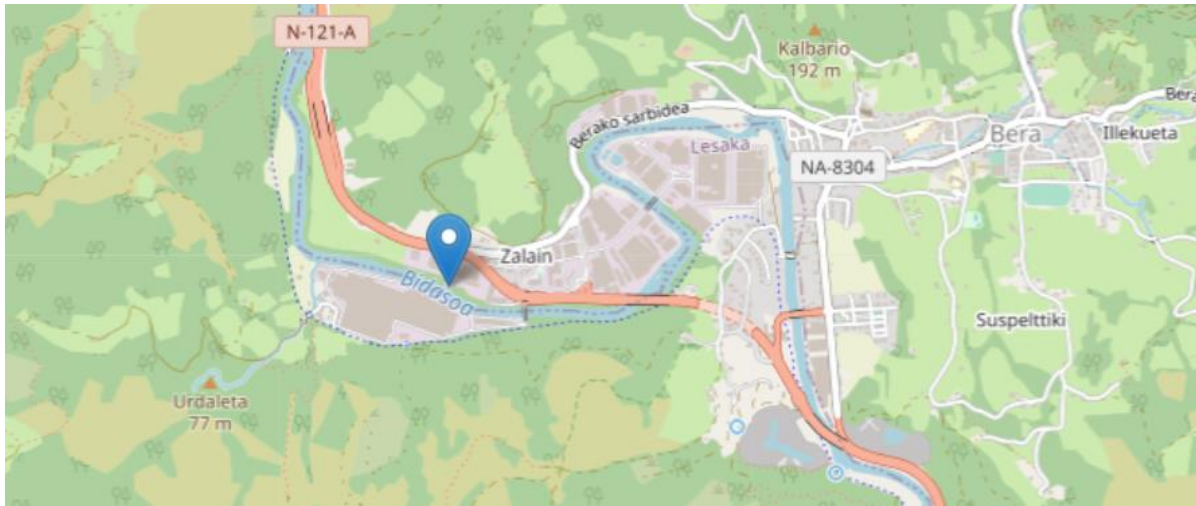


Figura 44. Ubicación de la central de Bera de Bidasoa

3.2. DISEÑO DE LAS CENTRALES Y ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación, mediante la herramienta de simulación diseñada se va a proceder a dimensionar tres centrales del cauce del río Bidasoa, para conseguir un mayor aprovechamiento hidráulico.

3.2.1 Diseño de la mini central hidráulica de Yanci

Tal y como se ha comentado previamente, con el objetivo de aumentar la producción de la central de agua fluyente Yanci I situada en Igantzi, se va a proceder a redimensionar aumentando el caudal turbinable y las horas de funcionamiento, puesto que la altura al ser una central ya construida, y querer aprovechar la infraestructura existente debe ser fija. [22]

A continuación, se han introducido los datos en la herramienta de simulación. Aumentando el caudal de $7 \text{ m}^3/\text{s}$ a $8,6 \text{ m}^3/\text{s}$ y el tiempo de funcionamiento a 13 horas al día de media. [23]

DATOS A INTRODUCIR			
Localización	Igantzi		
Río	Bidasoa	Caudal a emplear	
Caudal medio anual	24,7 m^3/s	8,6 m^3/s	
Porcentaje de caudal a emplear	<input type="range" value="35%"/>		35%
Altura 1	102,20 m	Altura bruta	38,20 m
Altura 2	64 m		
Tiempo de funcionamiento al día	13 horas		
<input checked="" type="radio"/> Central de agua fluyente <input type="radio"/> Central a pie de presa			
Las alturas deben encontrarse comprendidas entre 1 y 1000 m			

Figura 45. Datos a introducir del redimensionamiento de la central de Yanci I

A partir de los datos introducidos que se aprecian en la figura 45, se han obtenido los siguientes resultados:

RESULTADOS			
Localización	Igantzi		
Río	Bidasoa		
Potencia instalada	2.200 kW	2,2	MW
Tipo de turbina	FRANCIS		
Tiempo de funcionamiento de la turbina	13 horas		
Tipo de central	CENTRAL DE AGUA FLUYENTE		
PARÁMETROS DE RENTABILIDAD			
Energía generada	10.439.000,00 kWh		
Periodo de retorno	0,5 años		
Indice de energía	0,02 €/KWh año		
Indice de potencia	109,88 €/kW		
Presupuesto aproximado final	241.726,29 euros		GENERAR PDF
¿ES RENTABLE?	ES RENTABLE		

Figura 46. Resultados obtenidos del redimensionamiento de la central de Yanci I

Analizando los valores obtenidos, se puede afirmar que la potencia instalada se ha aumentado de 1,16 MW a 2,2 MW, manteniéndose el tipo de turbina, lo que ha conllevado a un aumento de la energía generada hasta el valor de 10.439.000,00 kWh/año.

Respecto a los parámetros económicos se puede observar como la central es rentable a primera vista con unos indicadores económicos muy positivos. Sin embargo, como se ha comentado previamente se debe tener en cuenta que la herramienta de simulación está pensada para centrales de nueva construcción, por lo que en este caso, estos parámetros económicos no serían totalmente precisos, siendo el presupuesto por consiguiente más bajo, ya que existen instalaciones como el canal de derivación, azud o el mismo edificio de la central con su correspondiente centro de transformación, los cual únicamente se tendrían que revisar para verificar su buen estado y correcto funcionamiento.

3.2.2 Diseño de la mini central hidráulica de Lesaka

En este caso, se diseñará una central de agua fluyente de nueva construcción, aprovechando únicamente el azud existente, el cual pertenecía a una antigua central, la cual ya no existe. Para el diseño de esta nueva central mini hidráulica se tendrán en cuenta los parámetros de la antigua central, intentando mejorar el aprovechamiento del río.

Como previamente se ha detallado, el azud se encuentra a una altura de 68 metros, por lo que se ha decidido que el edificio de la central, donde se encuentra la turbina se situé en la ubicación 2, que se muestra en la figura 43, a una altura de 33 metros.

A continuación, se han introducido los datos en la herramienta de simulación, tal y como se puede apreciar en la figura 47, aumentando el caudal hasta el valor 7,4 m³/s y estableciendo un tiempo de funcionamiento de 6,5 horas al día de media, para poder cubrir los picos de demanda del municipio de Lesaka.

DATOS A INTRODUCIR

Localización	Lesaka		
Río	Bidasoa	Caudal a emplear	
Caudal medio anual	24,7 m^3/s	7,4 m^3/s	
Porcentaje de caudal a emplear	<input type="range" value="30"/>		30%
Altura 1	68,00 m	Altura bruta	35,00 m
Altura 2	33 m		
Tiempo de funcionamiento al día	6,5 horas		

Central de agua fluyente

Central a pie de presa

Las alturas deben encontrarse comprendidas entre 1 y 1000 m

Figura 47. Datos a introducir del dimensionamiento de la central de Lesaka

A partir de los datos introducidos en la figura 47, se han obtenido los siguientes resultados:

RESULTADOS

Localización	Lesaka		
Río	Bidasoa		
Potencia instalada	1.800 kW	1,8	MW
Tipo de turbina	FRANCIS		
Tiempo de funcionamiento de la turbina	6,5 horas		
Tipo de central	CENTRAL DE AGUA FLUYENTE		

PARÁMETROS DE RENTABILIDAD

Energía generada	4.270.500,00 kWh		
Periodo de retorno	1,1 años		
Indice de energía	0,05 €/KWh año		
Indice de potencia	127,53 €/kW		

Presupuesto aproximado final: 229.557,88 euros

¿ES RENTABLE? ES RENTABLE

Figura 48. Resultados del dimensionamiento de la central de Lesaka

Observando los valores obtenidos que se muestran en la figura 48, se puede ver claramente como se ha conseguido un mayor aprovechamiento hidráulico, consiguiendo una potencia instalada de 1,8 MW, la cual es notablemente superior a la de la antigua central (200 kW). Por consiguiente y manteniendo una ratio de funcionamiento medio de 6,5 horas diarias, se estima que se pueden llegar a generar entorno a 4.270.500,00 kWh/año. Este valor de energía generada, sería totalmente suficiente para poder alimentar a un total de entorno a 1.300 viviendas de 4 personas con unos consumos medios de 3.272,00 kWh/año. [27]

En cuanto a los parámetros económicos se puede observar como la central es rentable, amortizándose en un periodo de un año y un mes. Para este caso, cabe destacar que los parámetros económicos si serían precisos puesto que la herramienta de simulación está pensada para centrales de nueva construcción.

3.2.3 Diseño de la mini central hidráulica de Bera de Bidasoa

Finalmente, como ya se ha indicado en la introducción, se va a diseñar una nueva central junto a la ya existente central de Bera de Bidasoa, que se puede apreciar en la figura 49.

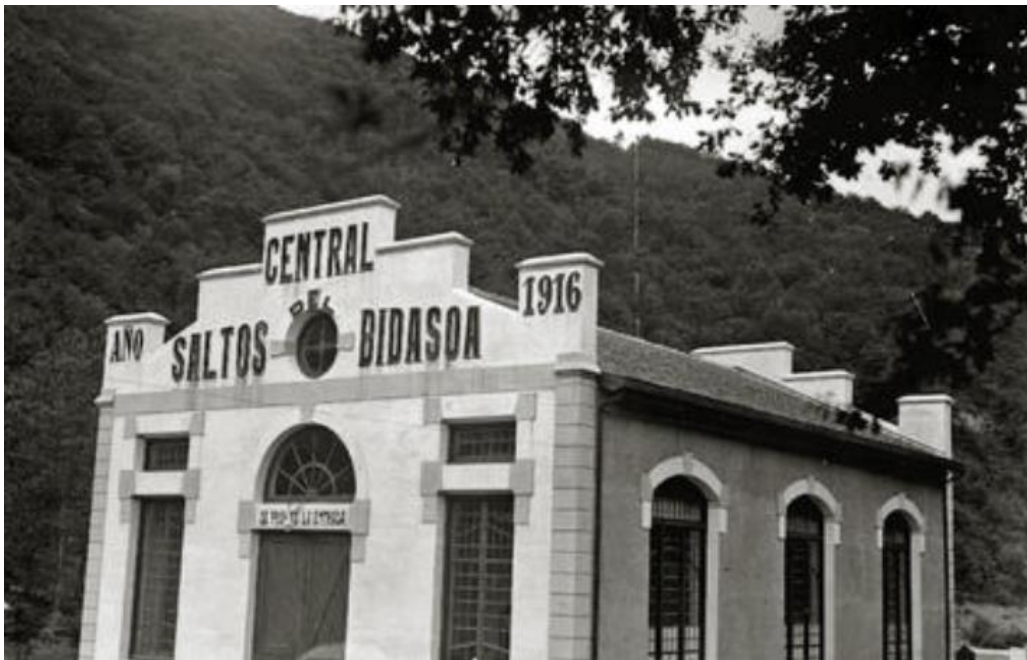


Figura 49. Central de Bera de Bidasoa. Fuente: Alamy

Como el objetivo en este caso es construir una nueva central contigua para ampliar la potencia instalada y caudal turbinado, se va a aprovechar la misma altura bruta de 7 metros que es obtenida de la diferencia de dos alturas, una a 35 metros y otra a 28 metros. [23] [26]

Seguidamente, se han introducido los datos en la herramienta de simulación como se puede ver en la figura 50. Aumentando el caudal hasta el valor 9,9 m³/s, y estableciendo un tiempo de funcionamiento de 12 horas al día de media.

DATOS A INTRODUCIR			
Localización	Bera		
Río	Bidasoa	Caudal a emplear	
Caudal medio anual	24,7 m^3/s	9,9 m^3/s	
Porcentaje de caudal a emplear	<input type="range" value="40%"/>		40%
	1%	100%	
Altura 1	35,00 m	Altura bruta	7,00 m
Altura 2	28,00 m		
Tiempo de funcionamiento al día	12 horas		
<input checked="" type="radio"/> Central de agua fluyente <input type="radio"/> Central a pie de presa			
Las alturas deben encontrarse comprendidas entre 1 y 1000 m			

Figura 50. Datos a introducir del dimensionamiento de la central de Bera de Bidasoa II

A partir de los datos introducidos se han obtenido los siguientes resultados:

RESULTADOS			
Localización	Bera		
Río	Bidasoa		
Potencia instalada	500,00 kW	0,5	MW
Tipo de turbina	FRANCIS		
Tiempo de funcionamiento de la turbina	12,00 horas		
Tipo de central	CENTRAL DE AGUA FLUYENTE		
PARÁMETROS DE RENTABILIDAD			
Energía generada	2.190.000,00 kWh		
Periodo de retorno	2,3 años		
Indice de energía	0,10 €/KWh año		
Indice de potencia	446,68 €/kW		
Presupuesto aproximado final	223.342,47 euros		
¿ES RENTABLE?	ES RENTABLE		

Figura 51. Resultados del dimensionamiento de la central de Bera de Bidasoa II

Analizando los datos que se aprecian en la figura 51, se puede afirmar que se ha logrado una potencia instalada de 500 kW para la nueva central, que junto con la central Bera de Bidasoa I existente, alcanzarán hasta los 900 kW de potencia nominal. Además, se conseguirá un valor total de energía generada anualmente de 4.066.546,00 kWh/año.

Examinando los parámetros económicos de la figura 51, se puede afirmar de nuevo que esta central es rentable, ya que se amortiza en dos años y cinco meses, valor que es claramente inferior a los doce años máximos de amortización para que este tipo de instalaciones sean rentables. [2]

4. CONCLUSIONES

Tras estudiar en detalle la energía mini hidráulica para poder diseñar la herramienta de simulación de centrales mediante el programa Excel, se ha podido comprobar que existe poca información sobre este tipo de tecnología. La energía mini hidráulica es una tecnología de generación convencional - renovable, que tuvo su momento álgido en la década de los ochenta en nuestro país, pero que, sin embargo, al contrario que las energías fotovoltaica o eólica se ha estancado y ha sido relegada por centrales de gran potencia.

Tras estudiar en profundidad el tema, se han podido comprender los diferentes tipos de centrales hidráulicas de pequeña escala que existen, los elementos que conforman estas instalaciones y sus grandes beneficios respecto a las grandes centrales. Estas instalaciones destacan por sus múltiples opciones de crecimiento debido a la diversidad de caudales y alturas aprovechables. Además, de ser más económicas, accesibles y de provocar menos impacto ambiental en el ecosistema en donde se sitúan.

Es por ello que se ha decidido realizar el diseño de una herramienta de simulación, ya que existen pocos programas de diseño que permitan conocer si este tipo de instalaciones tienen unos costes rentables o no. El aspecto más importante para saber si este tipo de instalaciones son rentables económicamente hablando, es su inversión inicial. Este importe depende de diversos factores como la orografía del terreno, los accesos, el tipo de instalación, el tamaño, la potencia y el punto de conexión. Además, hay que tener en cuenta las distintas partes del proceso y los costes que implica cada una.

Para el diseño de la herramienta de simulación, se han recopilado múltiples fórmulas y parámetros característicos relevantes en los que fundamentar la herramienta, los cuales posteriormente se han implementado en el programa Excel, con el objetivo de conseguir una calculadora de visual sencilla y cálculos rápidos. Siendo importante de destacar la gran exactitud de resultados tanto energéticos como económicos, que se consiguen al simular una central mini hidráulica de nueva construcción, lo cual ha sido corroborado en el apartado 2.3. Modelización y simulación con la herramienta. En este apartado se han comparado los datos de una central real: Central Hidroeléctrica Virgen de las Viñas, situada Finca Cantaburras, con los obtenidos gracias a la herramienta, obteniéndose unos valores muy similares a los reales recogidos por el IDAE en el [2].

También es transcendental destacar el gran potencial energético sin aprovechar que existe en el río Bidasoa. Este río cuenta con el potencial hidráulico suficiente para poder llegar a satisfacer la demanda energética de los pueblos que se encuentran a lo largo de su cauce, sin dañar el ecosistema de la zona. Para el caso del río Bidasoa, se han diseñado tres centrales en su cauce, las cuales podrían llegar a generar 16.899.500 kWh/año. Siendo este caso extrapolable al resto del Estado, puesto que existen gran cantidad de ríos y presas que se podrían emplear para turbinar agua y generar electricidad de forma limpia y respetuosa con el medio ambiente.

Como se ha podido analizar realizando esta herramienta, el mundo de la energía mini hidráulica cuenta con un amplio abanico de posibilidades tecnológicas todavía por descubrir, las cuales pueden satisfacer nuestras necesidades. Además, es una tecnología que debe desplegarse más en el sector de autoconsumo tanto residencial como industrial. Donde esta tecnología podría ayudar a conseguir un modelo de municipio verde, más sostenible, que junto con otras tecnologías renovables y otros aspectos de ahorro energético podría evitar grandes gastos de energía y reducir emisiones contaminantes.

5. ANEXO I: MANUAL DE USO

A continuación, se detallarán los pasos a seguir para el empleo de la calculadora de centrales mini hidráulicas y cómo interpretar los resultados.

Para el cálculo de los parámetros de la central mini hidráulica que se desea diseñar, únicamente se empleará la primera hoja del Excel llamada: **Datos**. El resto de hojas **no se tocarán**, ya que la calculadora las emplea para hacer cálculos internos. Únicamente podrán ser manipuladas por técnicos cualificados.

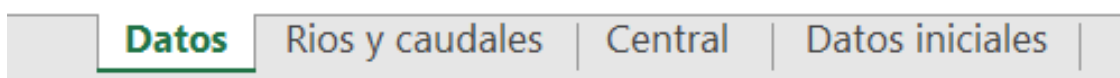


Figura 52. Hojas del Excel que se encuentran en el documento de la herramienta de simulación

Es importante resaltar que únicamente se deben rellenar los campos que se encuentran en la zona azul de la visual. En la figura 53 se puede apreciar marcada en rojo la zona azul. En la zona verde aparecerán los resultados obtenidos.

Figura 53. Visual de la herramienta de simulación

A continuación, se explican los campos que se deben rellenar de la zona azul:

- 1. Localización:** Se introducirá el nombre del municipio donde se desea diseñar la central. La herramienta cuenta con una lista desplegable de los municipios más importantes del Estado. En caso de que no se encuentre en la lista, se escribirá a mano.

Figura 54. Lista desplegable de municipios

2. **Río:** Se introducirá el nombre del río que se desea emplear para turbinar agua. La herramienta cuenta con una lista desplegable de los ríos más importantes del Estado. En caso de que no se encuentre en la lista, se escribirá a mano.

Figura 55. Lista desplegable de ríos del Estado

3. **Caudal medio anual:** En caso de que el río que se ha elegido previamente se encuentre en la lista desplegable, el caudal medio anual aparecerá automáticamente. En caso de que no estuviera el río en la lista desplegable, se debe buscar cuál es su caudal medio anual en otras fuentes, e introducirlo manualmente en m^3/s en la celda que se encuentra redondeada de azul en la figura 56.

- a. **Porcentaje de caudal a emplear:** Tal y como se puede apreciar en la figura 56, existe una barra la cual se manipulará manualmente para seleccionar el porcentaje del caudal medio anual que se desea turbinar.

En la figura 56, se puede apreciar redondeado en verde el porcentaje seleccionado a partir de la barra y en rojo se puede apreciar el valor de caudal correspondiente a dicho porcentaje. Estos datos no deben manipularse bajo ninguna circunstancia, ya que dependen de cálculos internos.

Figura 56. Caudal medio anual y porcentaje a emplear

- 4. Altura 1:** Se introducirá el valor de la altura más alta en metros que se ha seleccionado para la central. La herramienta cuenta con una lista desplegable de 1 a 1.000 metros. En caso de que no se encuentre el valor en la lista, se escribirá a mano.
- 5. Altura 2:** Se introducirá el valor de la altura más baja en metros que se ha seleccionado para la central. La herramienta cuenta con una lista desplegable de 1 a 1.000 metros. En caso de que no se encuentre el valor en la lista, se escribirá a mano.
- 6. Altura bruta:** Corresponde a la diferencia de alturas seleccionadas previamente. Este valor saldrá automáticamente y **no debe ser manipulado**. En caso de que la altura 2 sea mayor que la altura 1, aparecerá un mensaje indicando que no se puede calcular la altura bruta.

Altura 1	35,00	m	Altura bruta	7,00	m
Altura 2	28,00	m			

Figura 57. Altura 1, altura 2 y altura bruta en metros

- 7. Tiempo de funcionamiento:** Se introducirá el valor del tiempo de funcionamiento en horas/día que se desea emplear para turbinar agua. La herramienta cuenta con una lista desplegable de valores comprendidos entre las 0,5 y 20 horas. En caso de que no se encuentre el valor en la lista, se escribirá a mano, siempre y cuando este sea **inferior a 24 horas**, ya que es el máximo de horas de un día.

Tiempo de funcionamiento al día	12	horas
---------------------------------	----	-------

Figura 58. Horas de funcionamiento de la central al día

- 8. Central a pie de presa o central de agua fluyente:** Se debe seleccionar el tipo de central que se desea diseñar. Se clicará en el botón junto al tipo de central que se quiere. En función del tipo de central que seleccionemos, la calculadora tomará un modelo de costes u otro, para poder calcular el presupuesto y amortización.

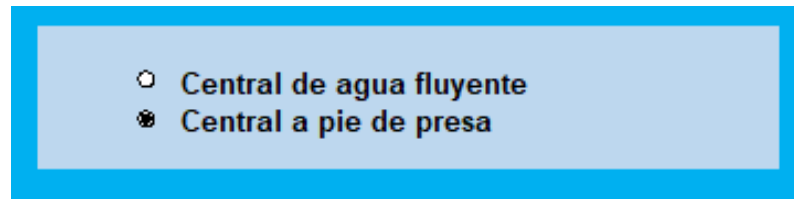


Figura 59. Botones de selección para el tipo de central

INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez rellenados todos los campos que se han explicado, se obtendrán los resultados automáticamente en la columna verde de la visual, que se puede apreciar en la figura 53.

- 1. Localización:** Aparecerá el dato de la ubicación introducida previamente.
- 2. Río:** Aparecerá el dato del río a emplear seleccionado previamente



Figura 60. Resultados de Localidad y río

- 3. Potencia instalada:** Aparecerá el valor de la potencia nominal instalada en kW y MW. Este valor se obtiene como resultado del producto del caudal útil a emplear en m^3/s , la altura neta en metros, el valor de la gravedad ($9,8 m/s^2$) y una eficiencia media de 0,85. Como previamente se ha detallado, es la potencia que entrega la turbina cuando opera con el salto nominal y una apertura total. [3]. Este valor indicará la potencia recomendada que debe tener nuestro generador o grupo de generadores.



Figura 61. Resultado del valor de la potencia instalada en kW y MW

- 4. Tipo de turbina:** Se indicará el tipo de turbina recomendada entre Kaplan, Francis y Pelton para la instalación, teniendo en cuenta el caudal y el salto neto.



Figura 62. Resultado de la tipología de turbina más idónea

- 5. Tiempo de funcionamiento:** Aparecerá el valor de horas de funcionamiento al día de nuestra central, que previamente hemos seleccionado en la columna azul de la visual.
- 6. Tipo de central:** Se indicará el tipo de central diseñada entre central de agua fluyente o central a pie de presa.

Tiempo de funcionamiento de la turbina	9,5	horas
Tipo de central	CENTRAL DE AGUA FLUYENTE	

Figura 63. Resultados de la tipología de central elegida y el tiempo de funcionamiento en horas

- 7. Energía generada:** Aparecerá el valor de la energía generada aproximadamente en kWh por la central durante un año. Este dato se obtiene como resultado de las horas de funcionamiento al día seleccionadas, la potencia instalada en kW y 365 días/año.
- 8. Periodo de Retorno simple:** Este valor es un indicador que mide en cuánto tiempo se recuperará el total de la inversión a día de hoy. Puede indicarnos con precisión, en años y meses, la fecha en la cual será cubierta la inversión inicial. [28]. Se considerará que es un periodo de retorno económicamente rentable hasta el valor de los 12 años. [2] En caso de que el periodo de retorno sea superior a este valor se analizará el índice de energía para ver si este parámetro es positivo.
- 9. Índice de energía:** Este valor es un indicador que nos señala cual es el costo del kW generado. Para que una central sea económicamente rentable este valor debe encontrarse entre 40 – 70 cent€/kWh.
- 10. Índice de potencia:** Valor que nos muestra cual es el coste del kW instalado. Para que este valor sea económicamente positivo debe ser menor de 1500€/kW.
- 11. Presupuesto aproximado final:** Cifra total aproximada en euros teniendo en cuenta la obra civil, ingeniería, equipo eléctrico y turbina más el 10% de IVA, de lo que supondría la construcción de la central diseñada. Este presupuesto cabe destacar que está pensado para centrales de nueva construcción, por lo que en caso de que fuera una rehabilitación no sería del todo preciso. Siendo este valor más bajo, ya que no se partiría desde cero en la obra civil.
- 12. Rentabilidad:** Se indicará con un **ES RENTABLE** como se aprecia en la figura 64, que el dimensionamiento pensado es adecuado económicamente, sin embargo, en caso de que el dimensionamiento no sea rentable, aparecerá un **NO ES RENTABLE** como se muestra en la figura 65.

¿ES RENTABLE?	ES RENTABLE
---------------	-------------

Figura 64. Resultado de rentabilidad positiva

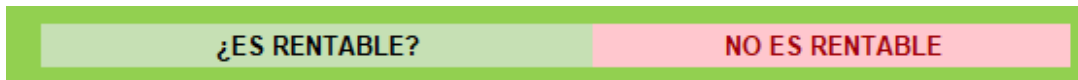


Figura 65. Resultado de rentabilidad negativa

- **Exportación de la información:** Para facilitar la recopilación de los datos y resultados obtenidos. Simplemente pulsado en el botón generar Pdf que se puede apreciar en la figura 66, se abrirá automáticamente en nuestro ordenador, un Pdf de dos hojas en el que se mostrarán los datos introducidos y los resultados obtenidos.

PARÁMETROS DE RENTABILIDAD		
Energía generada	18.856.265,00	kWh
Periodo de retorno	0,3	años
Indice de energía	0,02	€/KWh año
Indice de potencia	55,30	€/kW
Presupuesto aproximado final	300.714,68	euros
¿ES RENTABLE?	ES RENTABLE	

Figura 66. Resultados económicos

OBSERVACIONES A TENER EN CUENTA:

- **Esta herramienta es una mera aproximación de diseño. En caso de que se quisiera llevar a cabo una instalación de estas características, se deberían tener en cuenta más aspectos y concebir un estudio más exhaustivo.**
- **Esta calculadora está pensada para centrales mini hidráulicas, es decir, de menos de 10 MW. En caso de que a partir de los datos introducidos aparezca una potencia superior a este valor, la herramienta nos informará de que los parámetros no se pueden calcular, ya que no es una central mini hidráulica.**
- **Es importante mantenernos en la hoja de Datos y no modificar el resto de hojas del documento, puesto que se podría provocar un gran desorden en la herramienta.**

6. REFERENCIAS

- [1] Anónimo (). La importancia de las energías renovables | ACCIONA | BUSINESS AS UNUSUAL. Available: <https://www.accionacom.es/energias-renovables/>.
- [2] IDAE, Mini Centrales Hidroeléctricas. 2006.
- [3] E. Sánchez Conde, "Aprovechamientos hidroeléctricos en el Sil medio," Informes De La Construcción, vol. 10, (92), pp. 101-112, 2017. Disponible en: <https://doaj.org/article/f8b94913bb8c4a3486a60d05d54a8f23>. DOI: 10.3989/ic.1957.v10.i092.5708.
- [4] Anónimo (). AGUAS SUPERFICIALES. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/aguas-superficiales>.
- [5] Anónimo (). "Curso virtual de Energías renovables-Energía hidráulica," .
- [6] Anónimo (). La Presa de las Tres Gargantas, la hidroeléctrica más grande del mundo . Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/megaestructuras/presa-tres-gargantas-hidroelectrica-mas-grande-mundo>.
- [7] Anónimo (). Presa de las Tres Gargantas. Disponible en: <https://www.viaje-a-china.com/guia-yichang/atracciones/presa-de-las-tres-gargantas.htm>.
- [8] (27 septiembre). La Presa de las Tres Gargantas: un monstruo hidroeléctrico situado en China y la planta energética más grande del mundo. Disponible en: <https://www.xataka.com/otros/presa-tres-gargantas-monstruo-hidroelectrico-situado-china-planta-energetica-grande-mundo>.
- [9] José A. Roca, "La energía hidroeléctrica mundial aumentó su capacidad en 21,8 GW en 2018," El Periódico De La Energía, 2019. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-energia-hidroelectrica-mundial-aumento-su-capacidad-en-218-gw-en-2018/>.
- [10] José A. Roca, "Las 10 mayores centrales hidroeléctricas de España," El Periódico De La Energía, 2015. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-centrales-hidroelectricas-de-espana/>.
- [11] IDAE, "Informe estadístico energías renovables en España," IDAE, Marzo de. 2021.
- [12] Asignatura: Fuentes De Generación Eléctrica, Otras and A. Microrredes Tema, Energía Hidráulica. 2013.
- [13] Anónimo (). "ENERGÍA MINI HIDRÁULICA Aplicación a su desarrollo en Latinoamérica y Caribe,".
- [14] Ente Vasco De La Energía, Mini hidráulica En El País Vasco. 2021.

- [15] Iberdrola, Comunidad de Madrid and Canal de Isabel, I I, Recorrido De La Energia Mini Hidráulica. 2002.
- [16] Lucia García Iturri Gallego, "Análisis De La Estructura De Costes Y De Viabilidad De Una Central Hidroeléctrica. Particularización Al Caso De Estudio De Central En El Río Saja Y Determinación De Variables Críticas. ." , Universidad de Cantabria, 2018.
- [17] Anónimo (). ¿Qué es Excel y para qué sirve? Disponible en: <https://excelparatodos.com/que-es-excel/>.
- [18] Anónimo (). Excel para Microsoft 365: SI (función SI). Disponible en: <https://support.microsoft.com/es-es/office/si-funci%C3%B3n-si-69aed7c9-4e8a-4755-a9bc-aa8bbff73be2>.
- [19] Anónimo (). SI.ERROR en Excel: cómo lidiar con contratiempos. Disponible en: <https://www.ionos.es/digitalguide/online-marketing/vender-en-internet/sierror-en-excel/>.
- [20] Anónimo (). Excel para Microsoft 365: REDONDEAR.MENOS (función REDONDEAR.MENOS) Disponible en: <https://support.microsoft.com/es-es/office/redondear-menos-funci%C3%B3n-redondear-menos-2ec94c73-241f-4b01-8c6f-17e6d7968f53>.
- [21] IDAE, "CENTRAL HIDROELÉCTRICA PIE DE PRESA “VIRGEN DE LAS VIÑAS” EN ARANDA DE DUERO (BURGOS)," IDAE: Instituto Para La Diversificación Y Ahorro De La Energía, Disponible en: <https://www.idae.es/eu/argitalpenak/central-hidroelectrica-pie-de-presa-virgen-de-las-vinas-en-aranda-de-duero-burgos>
- [22] O. Curtisii and A. Torralba, "BASES TÉCNICAS PARA EL PLAN DE GESTIÓN DE LA ZONA ESPECIAL DE CONSERVACIÓN (ZEC) versión final RÍO BIDASOA-BIDASOA IBAIA (ES2200014)," 2014.
- [23] Reseña estadística de Navarra and INE, "Anexo _III1CARACTERISTICAS DE LAS PRINCIPALES CENTRALES HIDROELECTRICAS EN NAVARRA (1958)," 1961.
- [24] Gran Enciclopedia de Navarra. ENDARLATSA, CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE. Disponible en: http://www.enciclopedianavarra.com/?page_id=8790.
- [25] ALICIA DEL CASTILLO and Diario Vasco, "Gobierno de Navarra adquiere la central de Bera cedida por Iberdrola," Diario Vasco, 2014. Disponible en: <https://www.diariovasco.com/bidasoa/201412/07/gobierno-navarra-adquiere-central-20141207002350-v.html>.
- [26] Gran Enciclopedia de Navarra. VERA DE BIDASOA, CENTRAL HIDROELÉCTRICA DE. Disponible en : http://www.enciclopedianavarra.com/?page_id=20589.

[27] Red Eléctrica de España. Cómo consumimos electricidad. Available: https://www.ree.es/sites/default/files/interactivos/como_consumimos_electricidad/como-varia-mi-consumo.html.

[28] Enrique Santa Cruz (24 de enero). El PRI: uno de los indicadores que más llama la atención de los inversionistas. Disponible en: <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/el-pri-uno-de-los-indicadores-que-mas-llama-la-atencion-de-los-inversionistas/>.