



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

APROVECHAMIENTO DE SALTO DE AGUA MEDIANTE TURBINA EN POBLADO DE ZIMBABWE

Autor: Miguel Ángel Barruso Recuero

Director: Manuel Moreno García

Madrid

26 de agosto de 2020

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título **Aprovechamiento de salto de agua mediante turbina en poblado de Zimbabwe** en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2020/21 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Miguel Ángel Barruso Recuero

Fecha: 26/ 08/ 21

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Manuel Moreno García

Fecha: 26/ 08/ 21

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. Miguel Ángel Barruso Recuero

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Aprovechamiento de salto de agua mediante turbina en poblado de Zimbabwe, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 26 de agosto de 2021

ACEPTA



Fdo: Miguel Ángel Barruso Recuero

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

APROVECHAMIENTO DE SALTO DE AGUA MEDIANTE TURBINA EN POBLADO DE ZIMBABWE

Autor: Barruso Recuero, Miguel Ángel

Director: Moreno García, Manuel

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

Resumen del proyecto

Este proyecto consiste en la construcción de una central hidroeléctrica con el objetivo principal de abastecer energéticamente al poblado de Kazai, situado en Zimbabue. El proyecto forma parte de Project Zimbabwe, una iniciativa promovida por la Fundación de Ingenieros de ICAI y la ONG Child Future Africa, que lleva varios años realizando proyectos de índole similar con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los habitantes de un país que carecen de los recursos necesarios para ser autosuficientes. Un aspecto fundamental de Project Zimbabwe es la participación de los locales en la construcción de los proyectos, siendo esto de vital importancia para crear un vínculo y ayudarles a desarrollarse personalmente al colaborar en el desarrollo de su comunidad.

África es un continente en el que 645 millones de personas no tienen acceso a la electricidad, siendo proyectos de estas características fundamentales para lograr mejorar esta situación. Uno de los objetivos principales de este proyecto es el de aportar evidencias de la viabilidad de las centrales hidroeléctricas de pequeñas dimensiones como esta para abastecer energéticamente a zonas rurales donde es realmente difícil y costoso transportar electricidad desde las grandes centrales.

Para conseguir lograr los objetivos planteados se realizará un análisis de la zona y de las posibilidades reales de generación, estudiando diferentes alternativas para el diseño, tratando de que la instalación sea lo más eficiente posible, existiendo una evidente limitación de recursos económicos y materiales. Además, se tratará de que esta sea simple y robusta con el fin de que pueda funcionar de forma prolongada sin necesidad de supervisión técnica.

La realización del proyecto estaba planeada para el verano de 2021, teniendo que ser aplazado a 2022 por la situación con el Covid-19.

Abstract

This project consists of the construction of a hydroelectric power plant with the main objective of supplying energy to the village of Kazai, located in Zimbabwe. The project is part of Project Zimbabwe, an initiative promoted by Fundación de ingenieros de ICAI and the NGO Child Future Africa, which has been carrying out projects of a similar nature for several years with the aim of improving the quality of life of the inhabitants of a country that lacks the necessary resources to be self-sufficient. A fundamental aspect of Project Zimbabwe is the participation of the locals in the construction of the projects, this being of vital importance to create a bond and help them develop personally, by collaborating in the development of their community.

Africa is a continent where 645 million people do not have access to electricity, and projects of this nature are essential to improve this situation. One of the main objectives of this project is to provide evidence of the viability of small hydroelectric power plants such as this one to supply energy to rural areas where it is really difficult and expensive to transport electricity from the large power plants.

In order to achieve the proposed objectives, a study of the area and the real possibilities of generation will be carried out, studying different alternatives for its design, trying to make the installation as efficient as possible, given the obvious limitation of economic and material resources. Furthermore, it will be necessary to keep it simple and robust so that it can operate for a long period of time without the need for technical supervision.

The realization of the project was planned for the summer of 2021, having to be postponed to 2022 due to the situation with Covid-19.

Contenido

| | |
|--|----|
| Índice de ilustraciones..... | 8 |
| 1. Memoria..... | 11 |
| 1.1 Introducción..... | 11 |
| 1.2 Situación del país..... | 11 |
| 1.2.1 Historia..... | 12 |
| 1.2.2 Economía..... | 13 |
| 1.2.3 Demografía y religión..... | 14 |
| 1.2.4 Condiciones climatológicas..... | 15 |
| 1.3 Motivación y objetivos..... | 17 |
| 1.4 Estado de la cuestión..... | 18 |
| 1.4.1 Energía solar..... | 19 |
| 1.4.2 Energía eólica..... | 20 |
| 1.4.3 Energía hidráulica..... | 21 |
| 1.4.4 Proyectos previos..... | 22 |
| 1.5 Metodología de trabajo..... | 25 |
| 1.6 Recursos..... | 27 |
| 2. Centrales hidroeléctricas..... | 28 |
| 2.1 Clasificación..... | 30 |
| 2.2 Elementos constructivos..... | 34 |
| 2.3 Equipamiento electromecánico..... | 42 |
| 3. Conceptos fundamentales..... | 51 |
| 3.1 Caudal..... | 51 |
| 3.2 Salto hidráulico..... | 53 |
| 3.3 Potencia..... | 54 |
| 3.4 Pérdidas de carga..... | 56 |
| 3.5 Fenómenos a evitar..... | 62 |
| 4. Máquinas hidráulicas..... | 66 |
| 4.1 Clasificación..... | 66 |
| 4.2 Turbomáquinas hidráulicas..... | 69 |
| 4.3 Ecuación de Euler y el triángulo de velocidades..... | 79 |
| 4.4 Velocidad específica..... | 84 |
| 5. Datos y observaciones iniciales..... | 87 |
| 5.1 Estimación de demanda energética..... | 87 |
| 5.2 Desnivel disponible..... | 88 |
| 5.3 Disponibilidad de agua..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| 5.4 Conclusiones..... | 92 |
| 6. Cálculos | 95 |
| 6.1 Caudal de diseño | 95 |
| 6.2 Pérdidas de carga | 97 |
| 6.3 Dimensionamiento y selección de la turbina hidráulica | 99 |
| 6.4 Dimensionamiento de la obra civil..... | 112 |
| 7. Conclusiones..... | 131 |
| 8. Plan de implementación..... | 133 |
| 9. Plan de mantenimiento..... | 135 |
| 10. Viabilidad económica | 136 |
| 10.1 Financiación..... | 136 |
| 10.2 Presupuesto | 138 |
| 11. Bibliografía | 141 |

Índice de ilustraciones

| | |
|---|----|
| Ilustración 1: Logo de Project Zimbabwe y ubicación de Kazai, Zimbabwe. Fuente: Project Zimbabwe y Google Maps..... | 11 |
| Ilustración 2: Mapa de Rodesia del Sur. Fuente: [1] | 12 |
| Ilustración 3: Billete de 100 “trillones” de dólares. Fuente: [2]..... | 13 |
| Ilustración 4: Evolución por años de los porcentajes de población que pertenecen a una determinada religión. Fuente: [3] | 15 |
| Ilustración 5: Ubicación exacta de la presa. Fuente: Google Maps | 16 |
| Ilustración 6: Precipitaciones y temperaturas mensuales de Zimbabwe. Fuente: [4]..... | 16 |
| Ilustración 7: Cantidad de precipitaciones mensuales en Zimbabwe. Fuente: [4]..... | 17 |
| Ilustración 8: Objetivos ODS marcados por la ONU a cumplir en 2030. Fuente: [5] | 18 |
| Ilustración 9: Mapa de África donde se puede ver la intensidad de la radiación solar. Fuente [6] | 19 |
| Ilustración 10: Radiación solar en Zimbabwe Fuente [6]..... | 20 |
| Ilustración 11: Mapa de África indicando su potencial para la energía eólica. Fuente: [7] | 21 |
| Ilustración 12: Gráfico donde puede verse la potencia instalada en 2019 por países. Fuente: [7] | 21 |
| Ilustración 13: Situación energética de África y su potencial hidráulico. Fuente [8]..... | 22 |
| Ilustración 14: Prototipo de la turbina de proyecto Kumbo construida en ICAI. Fuente: Fundación ingenieros ICAI..... | 23 |
| Ilustración 15: Mapa conceptual de la instalación. Fuente: [9] | 24 |
| Ilustración 16: Principales puntos para la metodología de trabajo: Fuente propia | 25 |
| Ilustración 17: Diagrama ilustrando los periodos temporales que se han seguido para la realización del proyecto. Fuente propia | 26 |
| Ilustración 18: Imágenes de la Fundación de ingenieros de ICAI en varios proyectos en África. Fuente: Fundación de ingenieros de ICAI | 27 |
| Ilustración 19: Esquema de central hidroeléctrica. Fuente: [10]..... | 28 |
| Ilustración 20: Ciclo hidrológico y su influencia para la generación de energía. Fuente [11] | 29 |
| Ilustración 21: Esquema de una central de agua fluyente. Fuente [12] | 31 |
| Ilustración 22: Partes de una central a pie de presa. Fuente [12] | 32 |
| Ilustración 23: Sección y planta de un ensanchamiento del canal. Fuente [11]..... | 33 |
| Ilustración 24: Central a partir de una toma de agua mediante un ‘pico de pato’. Fuente: [11]33 | 33 |
| Ilustración 25: Esquema de una central hidroeléctrica reversible. Fuente [11] | 34 |
| Ilustración 26: Esquema de un azud. Fuente: [13]..... | 35 |
| Ilustración 27: Tipos de azud según el material utilizado. Fuente [11]..... | 35 |
| Ilustración 28: Presa de gravedad construida a base de hormigón. Fuente [14] | 36 |
| Ilustración 29: Presa en arco. Fuente [15] | 36 |
| Ilustración 30: Esquema de funcionamiento de una presa hinchable. Fuente [11] | 37 |
| Ilustración 31: Mapa conceptual de un sistema de automatización. Fuente propia..... | 49 |
| Ilustración 32: Cilindro con parámetros para calcular el caudal. Fuente: [16] | 52 |
| Ilustración 33: Tubería donde se muestra un caudal atravesando una sección ‘S’ con velocidad ‘v’. Fuente [16] | 52 |
| Ilustración 34: Esquema básico donde se muestran los diferentes tipos de salto. Fuente: [11] 54 | 54 |
| Ilustración 35: Representación del flujo laminar y turbulento. Fuente: [17]..... | 57 |
| Ilustración 36: Diagrama de Moody. Fuente: [19] | 60 |
| Ilustración 37: Diferentes valores de rugosidad absoluta según el material. Fuente [19] | 60 |

| | |
|--|-----|
| Ilustración 38: Diferentes valores del coeficiente 'K' para distintos elementos. Fuente: [19] ... | 61 |
| Ilustración 39: Ilustración de por qué se forman las burbujas de la cavitación. Fuente: [20] | 62 |
| Ilustración 40: Ilustración cualitativa del efecto Venturi Fuente: [20] | 63 |
| Ilustración 41: Daños provocados por cavitación. Fuente [20]..... | 63 |
| Ilustración 42: Proceso que origina el golpe de ariete. Fuente [21] | 64 |
| Ilustración 43: Esquema cualitativo de funcionamiento de una máquina transmisora. Fuente: [22] | 67 |
| Ilustración 44: Máquina alternativa de émbolo. Fuente [22] | 68 |
| Ilustración 45: Máquina rotativa de engranajes. Fuente [22] | 68 |
| Ilustración 46: Tornillo de Arquímedes. Fuente [22] | 68 |
| Ilustración 47: Máquina radial. Fuente [22]..... | 70 |
| Ilustración 48: Máquina axial. Fuente [22] | 70 |
| Ilustración 49: Máquina mixta. Fuente [23]..... | 71 |
| Ilustración 50: Planos de una turbina Pelton con partes enumeradas (parte 1). Fuente: [24] .. | 73 |
| Ilustración 51: Planos de una turbina Pelton con partes enumeradas (parte 2). Fuente: [24] .. | 73 |
| Ilustración 52: Esquema de turbina Michell-Banki. Fuente: [25]..... | 74 |
| Ilustración 53: Diseño de turbina Ossberger y gráfica mostrando la admisión parcial y su rendimiento en función del caudal. Fuente [25]..... | 75 |
| Ilustración 54: Esquema de turbina Francis. Fuente: [24] | 76 |
| Ilustración 55: Esquema de turbina Kaplan. Fuente[24]..... | 77 |
| Ilustración 56: Triángulo de velocidades. Fuente: [26]..... | 79 |
| Ilustración 57: Rodete de turbomáquina motora girando a una velocidad ω . Fuente: [26] | 80 |
| Ilustración 58: Rodete donde se representa el distribuidor y la holgura entre estos dos. Fuente [26] | 81 |
| Ilustración 59: Triángulo de velocidades para la entrada. Fuente: [26] | 81 |
| Ilustración 60: Triángulo de velocidades para la salida. Fuente: [26]..... | 82 |
| Ilustración 61: Tabla mostrando la velocidad específica de diferentes tipos de turbina según el salto. Fuente [27] | 85 |
| Ilustración 62: Mapa de la zona donde se quiere llevar a cabo el proyecto. Fuente propia usando Google Earth pro | 88 |
| Ilustración 63: Mapa topográfico de la zona del proyecto. Fuente: Proyecto de reconstrucción de presa de Project Zimbabwe..... | 89 |
| Ilustración 64: Mapa donde se muestra la cota de la presa y el perfil de inclinación de la tubería forzada. Fuente propia | 89 |
| Ilustración 65: Mapa donde se muestra la cota del punto medio de la tubería forzada. Fuente propia | 90 |
| Ilustración 66: Mapa donde se muestra la cota del punto donde se construirá la casa de máquinas. Fuente propia | 90 |
| Ilustración 67: Perfil de la zona donde se construirá la presa. Fuente: Proyecto de reconstrucción de presa de Project Zimbabwe..... | 91 |
| Ilustración 68: Esquema cualitativo de la instalación a construir. Fuente: [28] | 94 |
| Ilustración 69: Captura de un proyecto de referencia en Chile obtenida en la página web de Ossberger. Fuente: [29]..... | 102 |
| Ilustración 70: Triángulos de velocidades en turbina Banki-Michell. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE | 102 |
| Ilustración 71: Perfiles de inyectores para turbinas Michell-Banki. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE | 104 |
| Ilustración 72: Plano del inyector y álabe directriz a diseñar. Fuente propia..... | 105 |

| | |
|---|-----|
| Ilustración 73: Perfil del inyector y álabe directriz de la turbina. Fuente propia..... | 107 |
| Ilustración 74: Perfil del álabe directriz para De=125 mm. Fuente propia | 108 |
| Ilustración 75: Perfil del rodete. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE..... | 109 |
| Ilustración 76: Esquema del rodete con parámetros calculados. Fuente propia | 110 |
| Ilustración 77: Simulación realizada con Pipe Flow Expert [I]. Fuente propia | 115 |
| Ilustración 78: Simulación realizada con Pipe Flow Expert [II]. Fuente propia | 116 |
| Ilustración 79: Simulación realizada con Pipe Flow Expert [III]. Fuente propia | 117 |
| Ilustración 80: Comparación de datos obtenidos con Pipe Flow Expert y los calculados..... | 117 |
| Ilustración 81: Esquema de la tubería forzada con anclajes y apoyos. Fuente [30] | 118 |
| Ilustración 82: Lugar concreto donde se ubicará el primer anclaje. Fuente propia | 120 |
| Ilustración 83: Diagrama de fuerzas a tener en cuenta para el diseño de los anclajes de la tubería forzada. Fuente propia | 121 |
| Ilustración 84: Modelo del anclaje a utilizar con sus cotas indicadas. Fuente propia | 126 |
| Ilustración 85: Plano de la casa de máquinas. [Planta]. Fuente propia | 129 |
| Ilustración 86: Plano de la casa de máquinas y canal de descarga. [Perfil]. Fuente propia..... | 130 |
| Ilustración 87: Diagrama mostrando los plazos que tomará cada fase del plan de implementación. Fuente propia..... | 134 |
| Ilustración 88: Cartel del torneo de padel organizado por Project Zimbabwe. Fuente: Project Zimbabwe..... | 136 |
| Ilustración 89: Camisetas y pulseras de Project Zimbabwe. Fuente: Project Zimbabwe..... | 137 |
| Ilustración 90: Cartel del sorteo realizado por Project Zimbabwe. Fuente: Project Zimbabwe..... | 137 |

1. Memoria

1.1 Introducción

Este proyecto forma parte de Project Zimbabwe, una serie de proyectos que buscan mejorar las condiciones de vida de la población de Mashonaland Central, provincia ubicada en la parte noreste de Zimbabwe, África. Algo a destacar de Project Zimbabwe, es la búsqueda de la integración de los locales en la realización de los diferentes proyectos, siendo esto una parte fundamental del proceso, ya que al ser ellos quienes van a darle uso, en caso de cualquier futura avería o intento de ampliación de la instalación, su colaboración para llevar a cabo la construcción facilitaría enormemente llevar a cabo estas tareas. Además, se busca la realización personal de los habitantes de la zona con su participación, ya que así podrán sentir que al colaborar con estos proyectos están ayudando a prosperar a su comunidad.

Esta iniciativa está impulsada por la Fundación de ingenieros de ICAI en colaboración con la ONG Child future Africa, habiendo hecho años anteriores proyectos similares a este.

EL proyecto consiste en aprovechar el salto de agua de una presa que hay en Kazai, un poblado de unos 2000 habitantes, para generar electricidad mediante una turbina. Esta presa, por falta de recursos para mantenerla, está en unas condiciones pésimas, por lo que su reconstrucción también va a ser una iniciativa impulsada por Project Zimbabwe.



PROJECT
ZIMBABWE



1.2 Situación del país

1.2.1 Historia

Zimbabue, al igual que la gran mayoría de países africanos, fue víctima de la codicia de los europeos, siendo una colonia británica desde 1850 hasta 1980. Los británicos la nombraron Rodesia del sur en honor a Cecil Rhodes, miembro de la Compañía Británica Sudafricana.

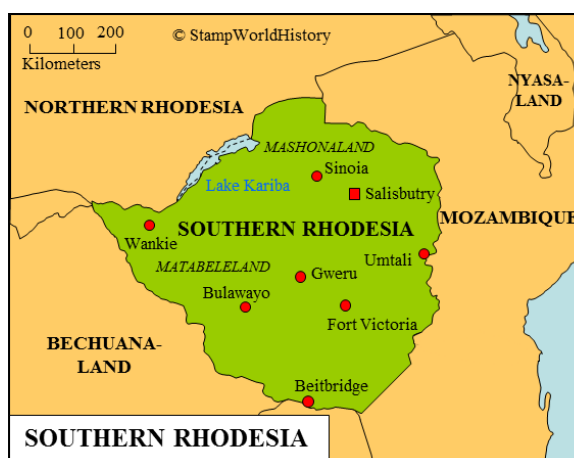


Ilustración 2: Mapa de Rodesia del Sur. Fuente: [1]

Aunque en 1965 se proclamó como República Independiente de la mano de Ian Smith, ni la corona británica ni la ONU la reconocieron, porque, entre otras razones, se pretendía imponer la supremacía blanca al estilo del 'apartheid', un sistema político que surgió en Sudáfrica donde la población negra no podía votar, debían vivir en zonas alejadas de los blancos, no podían utilizar los mismos servicios que los blancos, y otras muchas restricciones.

Finalmente, en 1980, Mugabe se alzó en el poder tras unas elecciones pactadas con el otro líder nacionalista, Knomo, convirtiéndose ese mismo año oficialmente en Zimbabue. Mugabe fue uno más de tantos líderes que prometían actuar en beneficio del pueblo y acabó manipulando elecciones, cambiando la constitución a su favor y expropiando propiedades a los habitantes del país. Se mantuvo en el poder hasta 2017, cuando hubo un golpe de estado por parte de las fuerzas armadas, pasando el cargo de presidente a Emmerson Mnangagwa, el cual sigue ejerciendo el cargo en la actualidad.

Como se puede ver, Zimbabue ha sido un país con mucha inestabilidad política, lo que ha hecho que su población se vea perjudicada y se hayan violado sus derechos humanos en reiteradas ocasiones, habiendo sido esto denunciado tanto por la Unión Europea como por Estados Unidos.

1.2.2 Economía

El gobierno de Zimbabue se enfrenta a una amplia variedad de difíciles problemas en su economía. Esos problemas incluyen una notoria falta de divisas, hiperinflación y escasez de provisiones y artículos. Su participación en la guerra de 1998 a 2003 con la República Democrática del Congo, por ejemplo, significó una pérdida de cientos de millones de dólares para el país. El muy necesitado apoyo del FMI no llegó, debido a que el gobierno de Zimbabue fracasó en alcanzar los objetivos presupuestarios.

La tasa de inflación se incrementó de un 32 % por año en 1998 a un 586 % a finales de 2005, llegando a alcanzar en 2008 una inflación del 100 000%, teniendo así la tasa de inflación más alta de todos los países del mundo.

La dinámica decadente de la economía nacional ha sido atribuida, principalmente, a la mala gestión, a la corrupción del gobierno de Mugabe y a la expropiación de las tierras de más de 4000 granjeros blancos durante la controvertida redistribución de la tierra del año 2000. Desde el principio de esta redistribución las exportaciones agrícolas, y especialmente el tabaco, han decaído de manera notoria.

La Zimbabwe Conservation Task Force publicó un informe en junio de 2007 que estimaba la muerte de un 60 % de la biosfera salvaje del país desde 2000. El informe también advierte que la pérdida de vida junto con la deforestación salvaje es potencialmente peligrosa para la industria turística.

En julio de 2008 el Banco Central de Zimbabue puso en circulación un billete de 1000 millones de dólares zimbabuenses para agilizar el uso de dinero en metálico. Sin embargo, este nuevo billete tenía aproximadamente el valor de un dólar estadounidense. Por lo tanto, apenas servía para comprar una barra de pan o cuatro naranjas.



Ilustración 3: Billeto de 100 “trillones” de dólares. Fuente: [2]

Desde 2009, la moneda oficial es el dólar de EE. UU. o el rand Sudafricano, y la moneda local como medio de pago ha caído totalmente en desuso. De hecho, desde el 30 de junio de 2009 ésta ya no es de curso legal. Desde entonces, la situación económica mejoró, con crecimientos superiores al 5 % en 2009, 2010 y 2011. En 2015, para solventar el problema de la falta de cambio en dinero metálico, el Banco de Reserva de Zimbabwe emitió sus propias monedas bono de centavos de dólar estadounidense.

A pesar de la supuesta mejoría económica por la suplantación de la moneda, y en estrecha relación con el alto índice de corrupción presente en ese país, en enero de 2013 el ministro de Finanzas de Zimbabwe, Tendai Biti, reconoció que el país solo contaba con 217 USD en las reservas del banco central.

1.2.3 Demografía y religión

Zimbabwe cuenta con una población de 14,65 millones de habitantes, con una pirámide poblacional compuesta por 37,2 % entre 0 y 14 años, 59,3 % entre 15 y 64 años y 3,5 % de 65 años y más.

La mayoría de la población es negra (98,8 %), entre los que se distinguen los shonas (80-85 %) y los ndebele (8-10 %). Se estima que cerca de un millón de ndebeles pueden haber dejado el país entre 2000 y 2005, emigrando hacia Sudáfrica en busca de una mejoría económica. Los mestizos y asiáticos alcanzan el 1 % de la población, mientras que los blancos conforman el otro 0,2 % restante (en 1975 eran unos 275 000, el 4,5 % de la población). Gran parte de la minoría blanca abandonó el país a principios del siglo XXI ante la campaña iniciada por el gobierno para desposeerla de sus propiedades. No obstante, desde la salida del poder de Mugabe y la oficialidad del cambio de gobierno se ha detectado un lento regreso de la minoría blanca al país. El gobierno de Zimbabwe intenta promover esta inmigración con medidas como ofrecer arrendamiento de 99 años para trabajar la tierra, en lugar de los 5 años que establecía el acuerdo anterior, a los agricultores de raza blanca.

El idioma oficial es el inglés. Los grupos étnicos shona y ndebele también poseen su propio idioma y además existen numerosos dialectos tribales. El afrikáans era hablado por algunos sectores de la población blanca, pero el abandono del país por la mayor parte de la misma redujo sus hablantes a un porcentaje anecdótico, y puede decirse que prácticamente no quedan hablantes de ese idioma en el país.

La esperanza de vida es de 39 años. La tasa de natalidad es de 3,08. El 90,7 % de la población está alfabetizada, siendo este índice uno de los más altos de África. De acuerdo a estimaciones hechas en 2013, cuatro de las localidades más pobladas de Zimbabwe superaban los 150 000 residentes. Estas son: la capital, Harare (1 485 000 habitantes), Bulawayo (653 337), Chitungwiza (356 840) y Mutare (262 124).

Respecto a la religión, cabe decir que Zimbabwe es un país mayoritariamente creyente, con un 97,4% de la población que dice serlo. El cristianismo es la religión principal, identificándose el 80% de la población como tal, destacando las iglesias protestantes, evangélicas e independientes. A continuación, se muestra una tabla con la evolución de las distintas corrientes religiosas en el país con el paso de los años.

| Fecha | Cristianismo | Islam | Hinduismo | Budismo | Animismo | Judaísmo | Bahaísmo | Otros | No creyentes |
|-------|--------------|-------|-----------|---------|----------|----------|----------|-------|--------------|
| 2010 | 81,88% | 1,07% | 0,15% | | 13,54% | 0,09% | 0,21% | 0,49% | 2,56% |
| 2005 | 79,74% | 0,58% | 0,14% | | 13,70% | 0,09% | 0,16% | 3,53% | 2,04% |
| 2000 | 64,82% | 0,72% | 0,15% | | 26,57% | 0,09% | 0,28% | 5,86% | 1,50% |
| 1995 | 71,77% | 0,72% | 0,13% | | 23,00% | 0,09% | 0,29% | 3,04% | 0,96% |
| 1990 | 69,90% | 0,85% | 0,14% | 0,01% | 25,30% | 0,10% | 0,31% | 2,48% | 0,91% |
| 1985 | 65,02% | 0,90% | 0,11% | 0,01% | 32,00% | 0,10% | 0,26% | 1,02% | 0,58% |
| 1980 | 61,26% | 0,99% | 0,07% | | 37,00% | 0,10% | 0,20% | 0,18% | 0,18% |
| 1975 | 55,58% | 0,96% | 0,07% | | 42,00% | 0,10% | 0,19% | 0,91% | 0,18% |
| 1970 | 52,23% | 0,96% | 0,07% | | 46,00% | 0,10% | 0,19% | 0,28% | 0,17% |
| 1965 | 48,27% | 0,96% | 0,07% | | 49,30% | 0,10% | 0,18% | 0,96% | 0,17% |

Ilustración 4: Evolución por años de los porcentajes de población que pertenecen a una determinada religión. Fuente: [3]

1.2.4 Condiciones climatológicas

Para el desarrollo del proyecto será importante conocer las condiciones climatológicas de Kazai, siendo de especial importancia las precipitaciones, ya que el embalse depende exclusivamente de estas para llenarse al carecer de un río con caudal constante que lo abastezca.

La ubicación donde se llevará a cabo el proyecto se adjunta en la siguiente imagen, donde se pueden observar las coordenadas de la ubicación de la presa actual.



Ilustración 5: Ubicación exacta de la presa. Fuente: Google Maps

Debido a los pocos recursos disponibles en la zona, no hay mediciones concretas en el poblado, por lo que habrá que deducir la situación estudiando los datos del país entero.

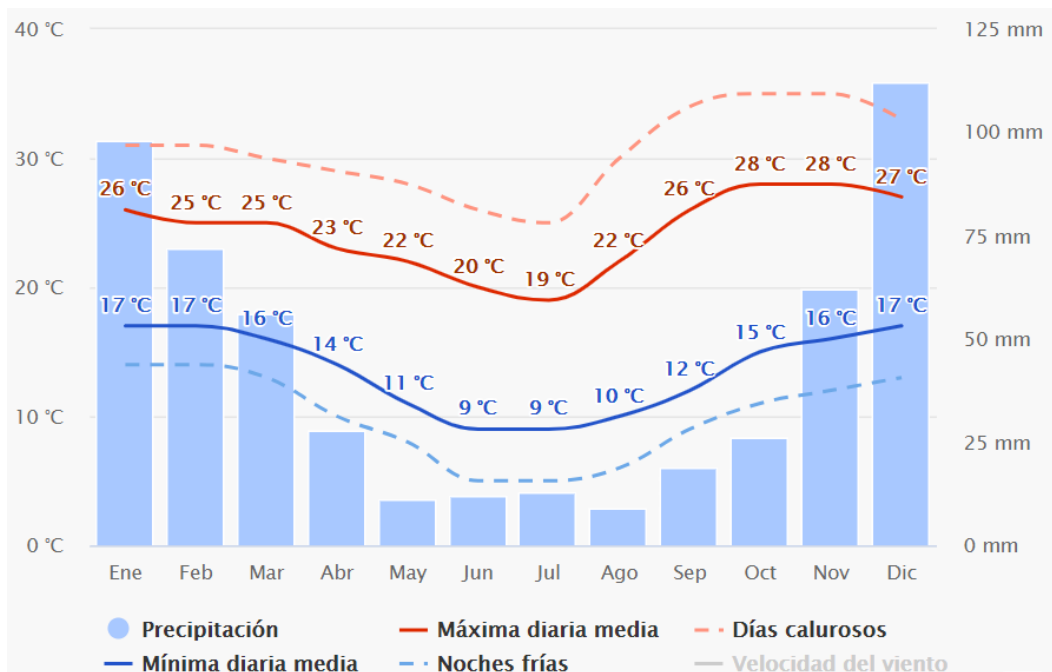


Ilustración 6: Precipitaciones y temperaturas mensuales de Zimbabwe. Fuente: [4]

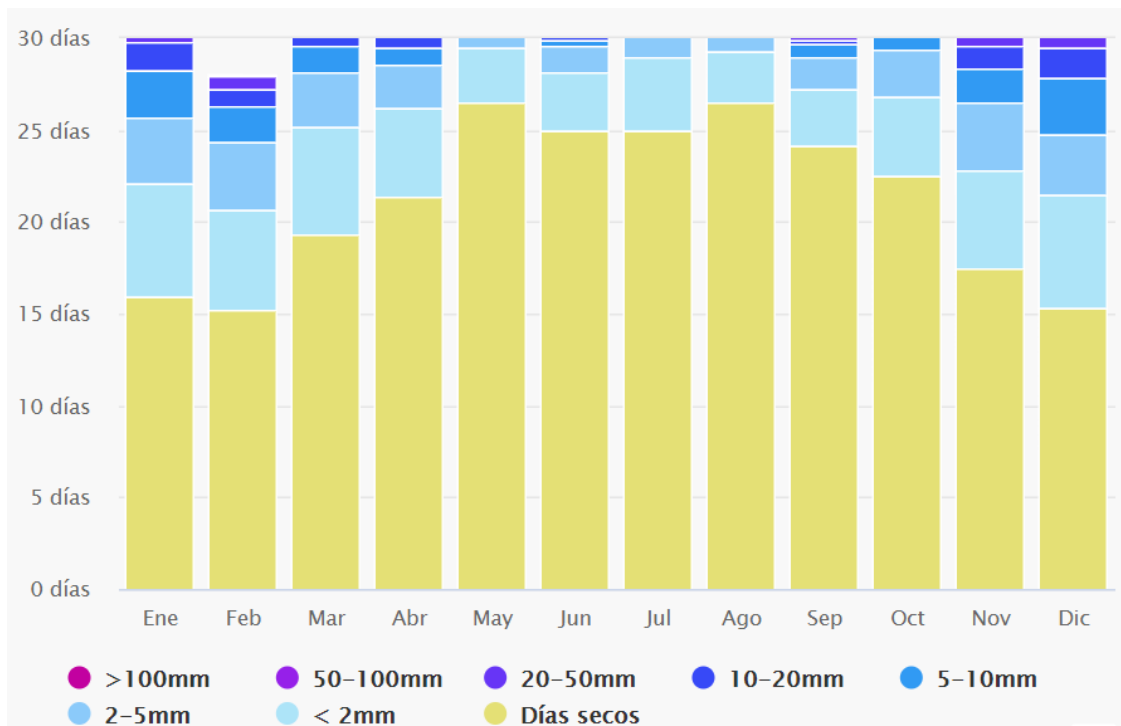


Ilustración 7: Cantidad de precipitaciones mensuales en Zimbabwe. Fuente: [4]

Analizando la [ilustración 6](#) y la [ilustración 7](#), se puede ver como entre Abril y Octubre las precipitaciones son mínimas, no pudiendo así utilizar la instalación a construir durante esos meses debido a que no habrá agua en el embalse, y si la hubiera, se destinaría a otras finalidades como el consumo humano. Entre Noviembre y Marzo las precipitaciones aumentan considerablemente, siendo así esta, la época en la que se intentará aprovechar la máxima cantidad posible de agua para la generación de energía.

Respecto a las temperaturas se puede ver cómo, al contrario que en España, la estación en la que hace menos calor es verano, coincidiendo con la época de menos lluvias, siendo esto idóneo para la construcción de la instalación.

1.3 Motivación y objetivos

La principal motivación es proporcionar energía al poblado de Kazai, que no tiene los recursos necesarios para ser autosuficiente energéticamente, mejorando así en gran medida las condiciones de vida de sus habitantes. Otro aspecto muy interesante, y que fue un motivo de peso a la hora de escoger este TFG, es el hecho de realizar un proyecto de estas características sobre el papel y una vez hecho, llegar a verlo funcionar con tus propios ojos.

Además, pienso que es una gran oportunidad para conocer y aprender de una cultura totalmente diferente a la occidental, contribuyendo tanto a mi formación profesional

como personal. Por desgracia, por la situación actual con el COVID-19 no va a ser posible viajar a Zimbabue para la realización del proyecto, quedando aplazado al año 2022.

Los objetivos principales son los siguientes:

1. **Cubrir la demanda eléctrica de Kazai.** Se pretende cubrir una gran parte de la demanda energética actual y futura del poblado con la construcción de la microcentral hidroeléctrica, mejorando así las condiciones de vida de los habitantes y dándoles la oportunidad de evolucionar como sociedad.
2. **Aportar evidencias de la viabilidad de pequeñas instalaciones hidráulicas como fuente de recursos.** Cada vez son más los proyectos de pequeñas centrales hidroeléctricas con el fin de alimentar energéticamente a pequeñas zonas rurales, este proyecto pretende dar pruebas de que es posible y conveniente con la tecnología actual apostar por este tipo de fuente de energía.
3. **Energía asequible y no contaminante ODS**
4. **Fin de la pobreza ODS**



Ilustración 8: Objetivos ODS marcados por la ONU a cumplir en 2030. Fuente: [5]

1.4 Estado de la cuestión

En un continente tan vasto como África, con numerosos países y regímenes políticos, una población dispersa, una infraestructura de transporte muy variable y una amplia gama de climas y terrenos, la generación y la distribución eficaz de la energía es todo un desafío, habiendo más de un 50 % de africanos sin acceso a la electricidad.

Al haber avanzado tanto las tecnologías renovables en los últimos años, estas han pasado a ser una opción muy interesante para suministrar electricidad a zonas remotas y dispersas de países en desarrollo. A continuación, se hará un resumen de las opciones más viables hoy en día para solucionar el problema energético de África.

1.4.1 Energía solar

África a menudo es llamada el continente Sol, no sin razón, ya que es con diferencia el continente que más horas recibe de Sol del mundo, esto se refleja sobre todo en el Sahara oriental, donde el sol brilla durante unas 4300 horas al año. La baja latitud de la masa de tierra es otro activo, ya que gran parte del continente se encuentra en la zona intertropical, donde la intensidad y la fuerza de la luz solar siempre son altas.

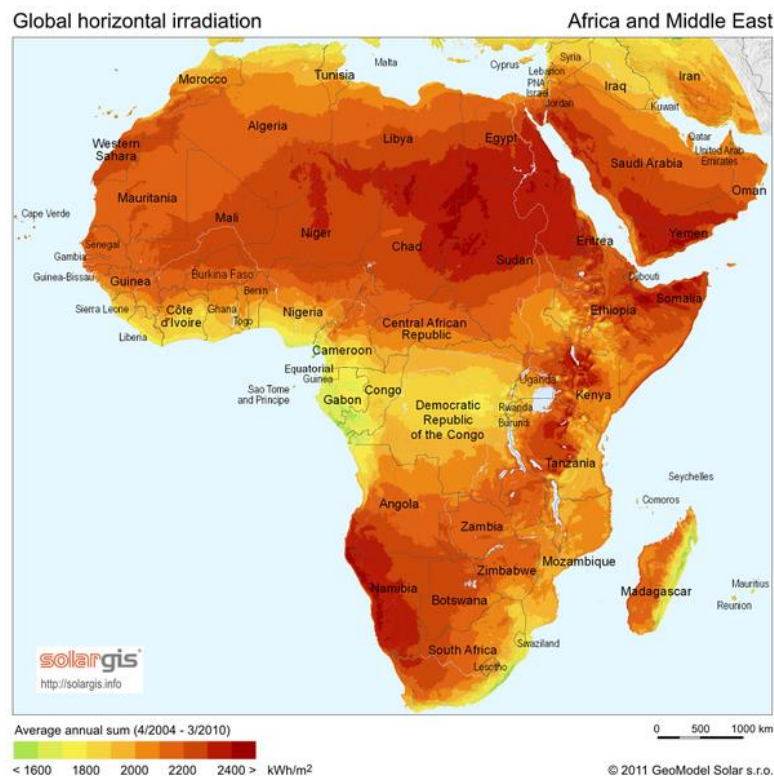


Ilustración 9: Mapa de África donde se puede ver la intensidad de la radiación solar. Fuente [6]

Cabe destacar que el mayor proyecto de energía solar por concentración del mundo está en Marruecos, llamado complejo solar Noor. Esta instalación cuenta con 500MW de potencia y ha evitado la emisión de 760 mil toneladas de CO₂ al año. Otros proyectos de interés pueden ser:

- Proyecto solar De Aar. Situado en Cabo Norte, Sudáfrica, es una instalación que cuenta con 175MW de potencia instalada, generando así suficiente electricidad para abastecer a 100 mil hogares sudafricanos.
- Proyecto solar Benban. Situado en Benban, Egipto, cuenta con 165,5 MW de potencia instalada, alimentando energéticamente a 80 mil hogares y evitando la generación de 156 mil toneladas de CO₂ al año

- KaXu Solar One. Situado en Sudáfrica, es la primera planta de energía solar termoeléctrica operada comercialmente en este país, y cuenta con 100 MW de potencia instalada. Es capaz de abastecer a aproximadamente 80 mil hogares.

Sudáfrica está apostando fuerte por este tipo de energía, contando con otras seis grandes instalaciones de energía solar además de las mencionadas, y Zimbabwe no quiere quedarse atrás, habiéndose marcado como objetivo alcanzar los 1575 MW de energía solar para 2030.

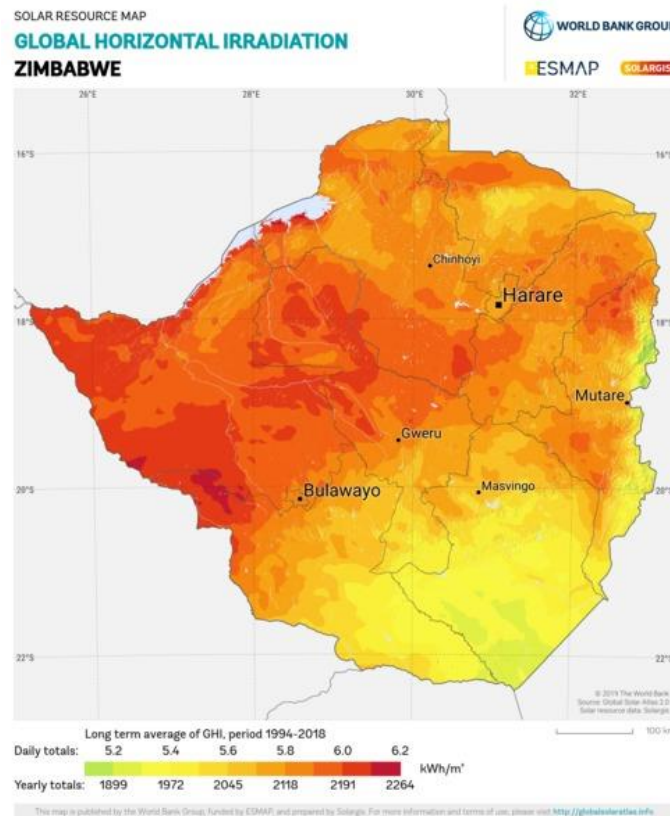


Ilustración 10: Radiación solar en Zimbabwe Fuente [6]

1.4.2 Energía eólica

Este tipo de energía tiene un gran potencial en África, siendo Marruecos y Egipto los principales países con grandes instalaciones de este tipo. Los últimos datos publicados por el consejo mundial de energía eólica (GWEC), muestran que Africa y Oriente Medio instalaron 894MW de capacidad de energía eólica en 2019. Se esperaba que entre 2020 y 2024 se instalaran unos 10,7GW de este tipo de energía, pero por la situación con el Covid-19 estas estimaciones se han visto frustradas, al menos de momento.

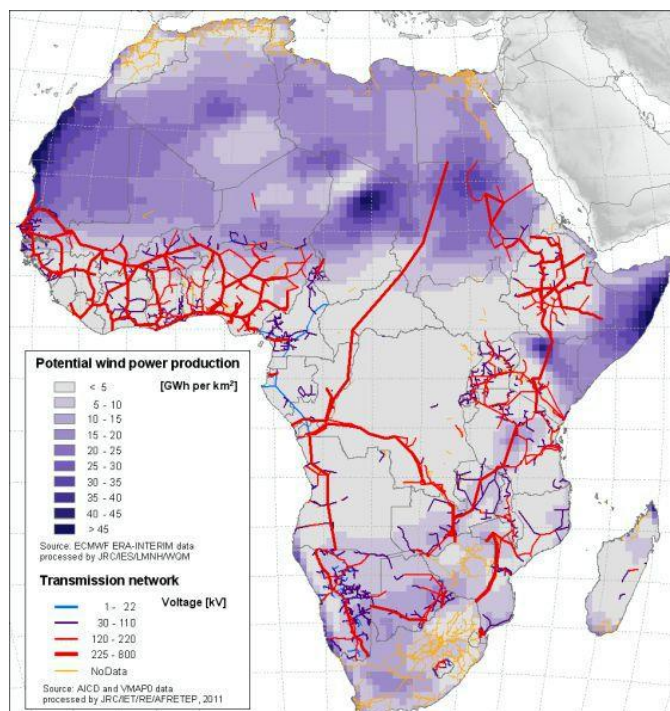


Ilustración 11: Mapa de África indicando su potencial para la energía eólica. Fuente: [7]

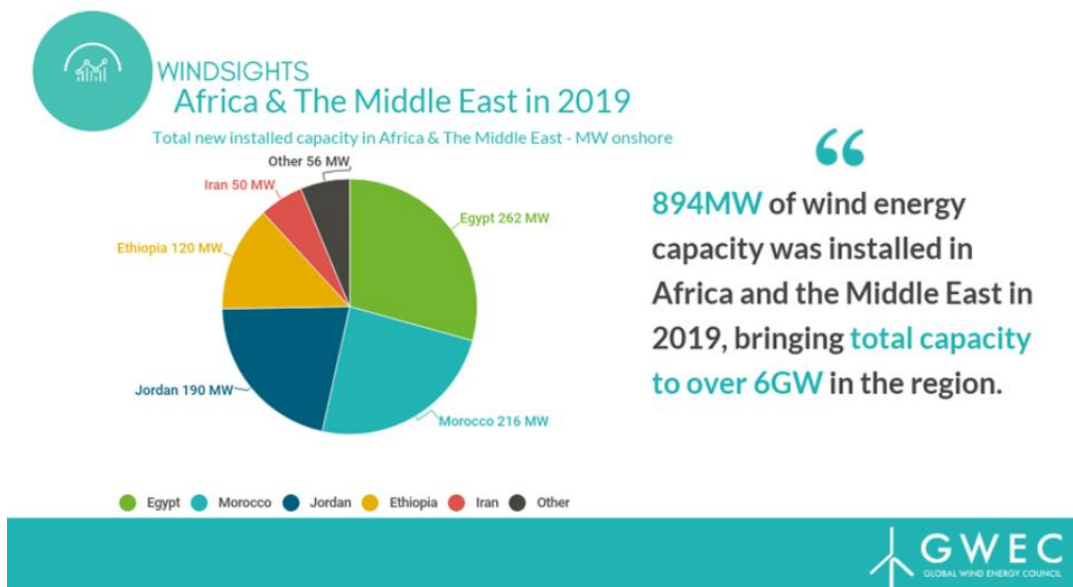


Ilustración 12: Gráfico donde puede verse la potencia instalada en 2019 por países. Fuente: [7]

1.4.3 Energía hidráulica

En concreto, la energía hidráulica tiene un gran futuro en África, ya que, siendo su potencial de explotación similar al de Europa, sólo se aprovecha un 10 % de este. De

hecho, es tal el potencial, que se quiere realizar el mayor proyecto hidroeléctrico del mundo en la República Democrática del Congo, contando con 40 000MW de potencia.

En la actualidad, la energía hidroeléctrica representa el 85% de la potencia instalada en fuentes renovables en África, ya que es una de las opciones más rentables teniendo un impacto medioambiental mínimo.

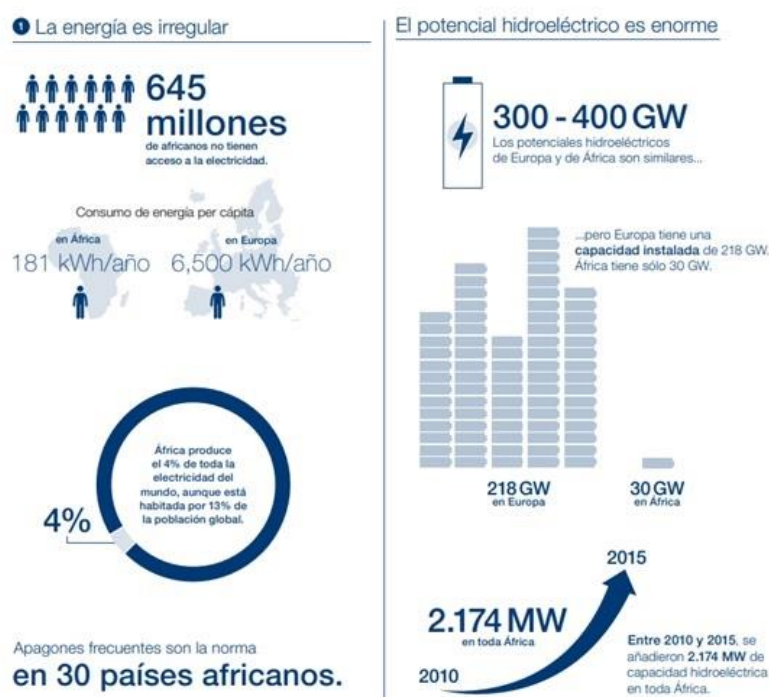


Ilustración 13: Situación energética de África y su potencial hidráulico. Fuente [8]

1.4.4 Proyectos previos

A continuación, se explicarán dos iniciativas que servirán de referencia para llevar a cabo el proyecto actual.

Proyecto Kumbo:

Esta iniciativa nace como fruto de la colaboración entre Ingenieros del ICAI para el desarrollo y Energía sin fronteras. El proyecto incluye cinco tecnologías renovables diferentes, aunque en este caso se explicará la microhidráulica que es la tecnología de interés para la realización de este proyecto.

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Suministrar energía eléctrica a una granja escuela en Kumbo, Camerún
- Cubrir la demanda energética de 150 alumnos y 5000 beneficiarios indirectos
- Fabricar un prototipo de turbina de 1kW con materiales y procedimientos artesanales

La mayor parte de mano de obra serán habitantes de la zona y se pretende que en un futuro, ellos mismos sean capaces de fabricar sus propias turbinas, facilitando así enormemente la expansión de esta tecnología.



Ilustración 14: Prototipo de la turbina de proyecto Kumbo construida en ICAI. Fuente: Fundación ingenieros ICAI

Microcentral hidroeléctrica en la localidad de Usme, Bogotá.

Este es un proyecto realizado en 2017 en el que se diseñó una instalación hidroeléctrica de unos 7KW para alimentar energéticamente a una zona rural de la localidad de Usme.

Las características del proyecto son las siguientes:

- Salto aprovechable de unos 8 metros
- Caudal constante de, aproximadamente, $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$
- Materiales básicos para la construcción
- Turbina Pelton de una tobera
- No existe una presa, por lo que se trata de una central de agua fluyente

La principal diferencia respecto a este proyecto, es la existencia de un caudal constante durante todo el año, siendo esto un factor a tener en cuenta para el diseño de la instalación y la elección de la turbina.

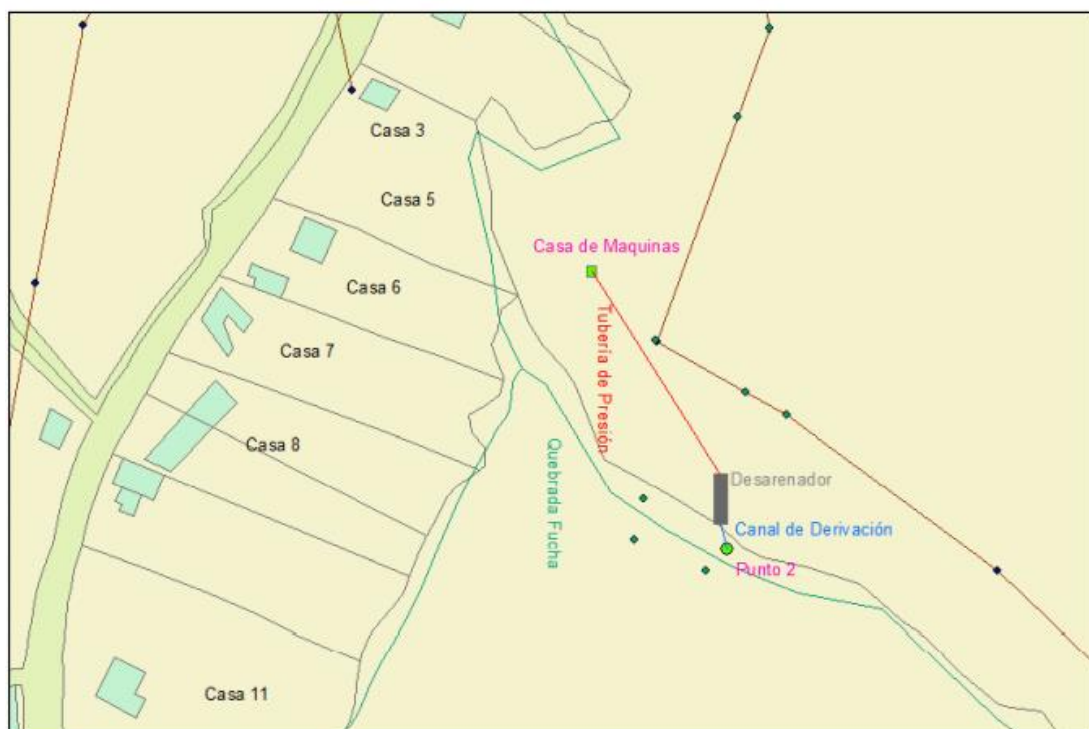


Ilustración 15: Mapa conceptual de la instalación. Fuente: [9]

1.5 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo en este caso está tremendamente condicionada por el lugar y las condiciones en el que se realiza el proyecto, teniendo a disposición pocos recursos tanto monetarios como materiales. A raíz de esto la metodología estará fundamentada en cuatro aspectos: coste, sencillez, disponibilidad y mantenimiento.



Ilustración 16: Principales puntos para la metodología de trabajo: Fuente propia

1. Debido a las condiciones presentes, los costes deben mantenerse al mínimo ya que los fondos son limitados. Para la financiación se hará una recaudación de fondos durante el curso como se indica en la [Ilustración 17](#).
2. Se buscará la sencillez a la hora de diseñar la instalación, a la vez que robustez, con el objetivo de conseguir así la mayor fiabilidad posible.
3. Se intentará que la máxima cantidad de elementos utilizados para la construcción de la instalación estén disponibles en la región donde se realiza el proyecto para así poder disponer de repuestos en caso de alguna futura avería.
4. Por último, la instalación debe ser capaz de funcionar de forma prolongada sin necesitar supervisión técnica, buscando así que el mantenimiento necesario sea el mínimo posible.

A continuación, se muestra un Diagrama de Gantt en el que se pueden ver las distintas etapas del proyecto y el periodo temporal que ha ocupado cada una.

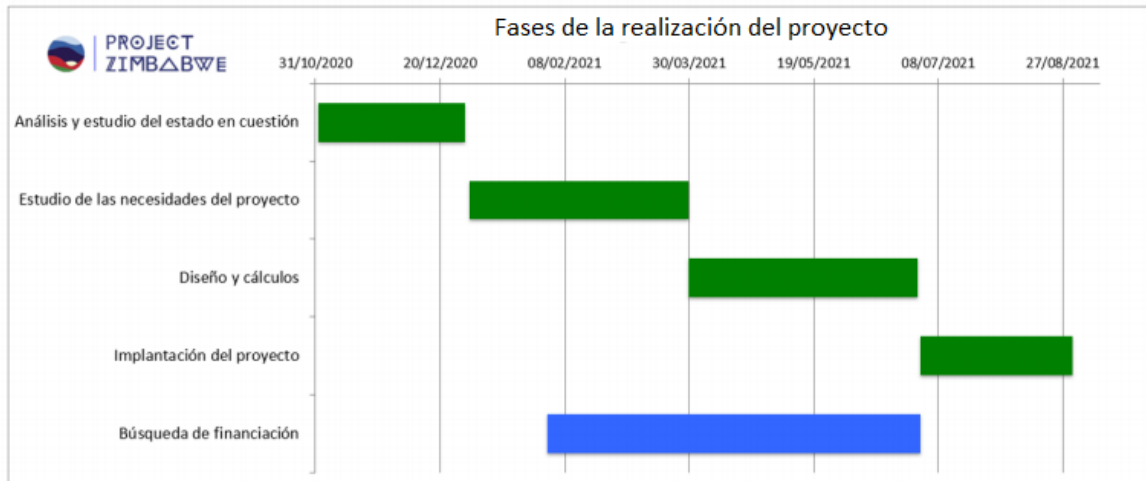


Ilustración 17: Diagrama ilustrando los periodos temporales que se han seguido para la realización del proyecto. Fuente propia

Por desgracia, como se ha comentado anteriormente, no ha sido posible viajar a Zimbabwe para realizar el proyecto por la situación actual con el Covid-19 por lo que la fase de implantación del proyecto no ha sido posible realizarla.

1.6 Recursos

La situación de Kazai es muy precaria por lo que los recursos materiales y económicos serán escasos, teniendo que adaptar el diseño del proyecto a estas condiciones. Sólo se comprará lo estrictamente necesario y se contará con mano de obra local para la construcción. Se intentará utilizar materiales simples que puedan conseguirse por la zona, facilitando así posibles reparaciones y labores de mantenimiento de la instalación en el futuro.

El recurso más valioso para la realización de este proyecto es la información que se puede obtener al investigar proyectos similares o al buscar en internet y libros información que pueda ser relevante para el diseño de la instalación.



Ilustración 18: Imágenes de la Fundación de ingenieros de ICAI en varios proyectos en África. Fuente: Fundación de ingenieros de ICAI

2. Centrales hidroeléctricas

Una central hidroeléctrica es una instalación que utiliza energía hidráulica para la generación de energía eléctrica. Son el resultado actual de la evolución de los antiguos molinos hidráulicos que aprovechaban la corriente de los ríos para generar energía.

Una instalación clásica de este tipo es un sistema que consiste en tres partes: una central eléctrica en la que se produce la electricidad; una presa que puede abrirse y cerrarse para controlar el paso del agua; y un depósito en que se puede almacenar agua. El agua de detrás de la presa fluye a través de una entrada y hace presión contra las palas de una turbina, lo que hace que éstas se muevan. La turbina hace girar un generador para producir la electricidad. La cantidad de electricidad que se puede generar depende de hasta dónde llega el agua y de la cantidad de ésta que se mueve a través del sistema. La electricidad puede transportarse mediante cables eléctricos de gran longitud hasta casas, fábricas y negocios. Esto lo hace de una forma limpia, sin consumo de combustible y alterando lo menos posible el medio natural.

La viabilidad de este tipo de centrales está más que demostrada, como se puede comprobar en el estado de Washington, Estados Unidos, donde existe una de las mayores centrales hidroeléctricas del mundo que abastece energéticamente al 70% del estado.

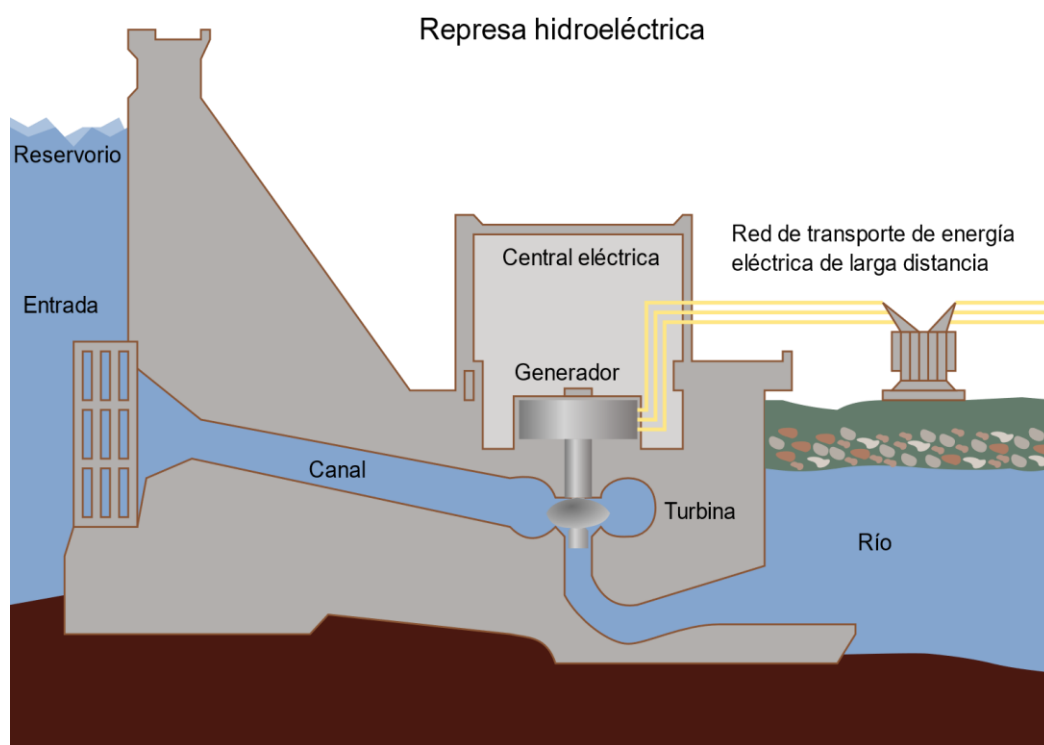


Ilustración 19: Esquema de central hidroeléctrica. Fuente: [10]

Esta energía proviene indirectamente del sol, ya que este es el responsable del ciclo hidrológico, explicado gráficamente en la [ilustración 20](#). Aprovechando este fenómeno, las centrales transforman esa energía potencial “creada” por este ciclo en electricidad.

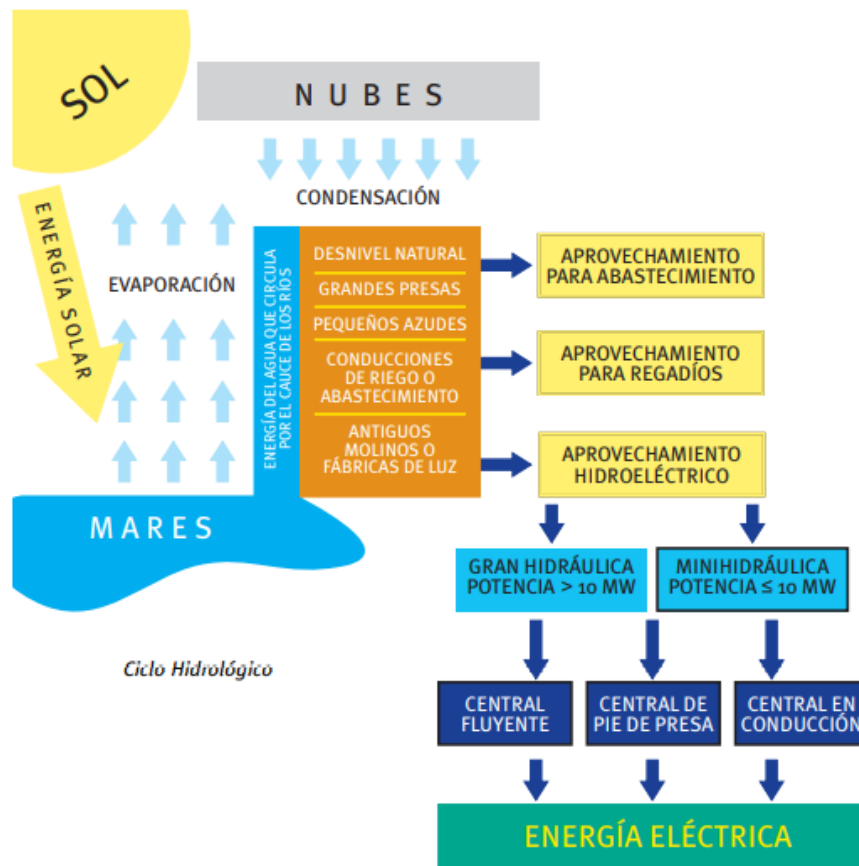


Ilustración 20: Ciclo hidrológico y su influencia para la generación de energía. Fuente [11]

2.1 Clasificación

Las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar según su potencia instalada:

- **Centrales hidráulicas de gran potencia:** Más de 10 MW de potencia eléctrica
- **Minicentrales hidroeléctricas:** Entre 1MW y 10MW
- **Microcentrales hidroeléctricas:** Menos de 1MW
- **Picocentrales hidroeléctricas:** Esta última designación es menos común, pero serían las instalaciones con una potencia entre 0,5KW y 150KW.

Es importante recalcar que esta clasificación no es de consenso global, ya que por ejemplo países como China consideran que una central de hasta 30MW podría catalogarse como una minicentral hidroeléctrica.

Otro criterio para clasificarlas se rige por las características del lugar donde va a ser ubicada. Hay que tener en cuenta que la topografía del terreno influirá tanto en la obra civil como en la selección de la maquinaria. Según el emplazamiento las centrales se pueden clasificar en:

- **Centrales de agua fluyente:** Son aquellas centrales en las cuales no existe un gran desnivel en el terreno. Su funcionamiento consiste en desviar parte del agua del río mediante una toma y a través de canales llevar el agua hasta la central donde esta será turbinada. Aunque hay varias formas de realizar el proceso de generación de energía, la característica común en este tipo de centrales es que dependen directamente del caudal del río, no teniendo capacidad de controlar el caudal turbinado, siendo así necesario que el caudal sea lo suficientemente constante durante el año para asegurar una potencia mínima.

Para conseguir que las pérdidas de carga sean mínimas y poder mantener la altura hidráulica, los conductos por los que circula el agua desviada deben construirse con la mínima pendiente posible, consiguiendo así que la velocidad del agua transportada sea lo más baja posible, ya que las pérdidas son proporcionales al cuadrado de la velocidad cómo se verá en el apartado [Pérdidas de carga](#).

A continuación, se muestra una imagen con las partes de una central de este tipo. Cabe recalcar que dependiendo del lugar donde se construya, no todos los elementos serán siempre necesarios.

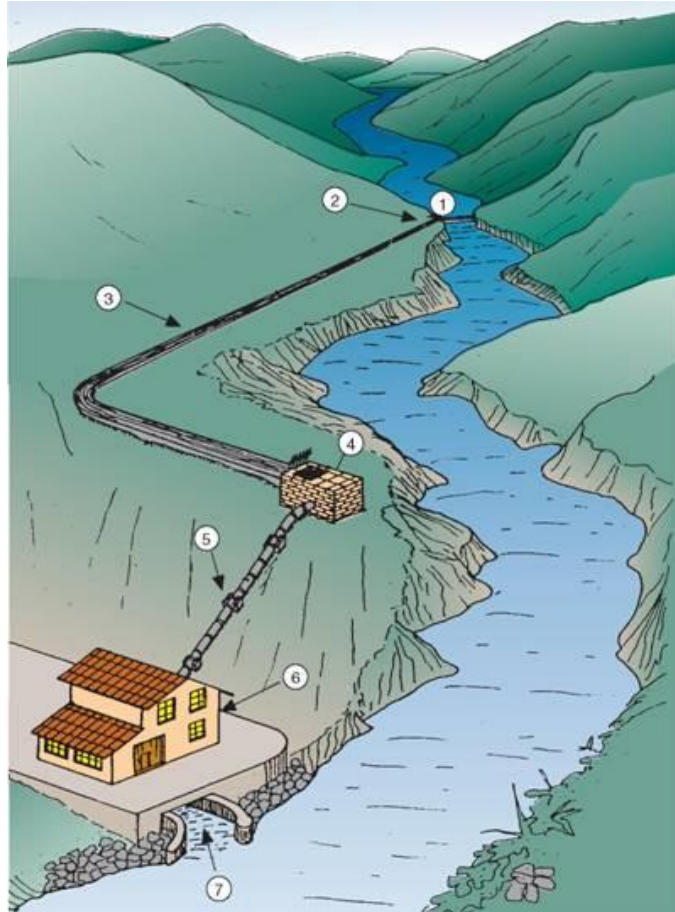


Ilustración 21: Esquema de una central de agua fluyente. Fuente [12]

Las partes enumeradas se nombran a continuación:

1. Azud
 2. Toma de agua
 3. Canal de derivación
 4. Cámara de carga
 5. Tubería forzada
 6. Edificio con su equipamiento electromecánico
 7. Canal de salida
- **Centrales a pie de presa:** Son aquellas centrales en las que existe la posibilidad de construir un embalse en el cauce de un río, pudiendo almacenar así las aportaciones de este, además del agua procedente de las lluvias y el deshielo. La diferencia más importante con las centrales de agua fluyente es que estas cuentan con la capacidad

de regulación de los caudales de salida del agua, que será turbinada en los momentos que se precise.

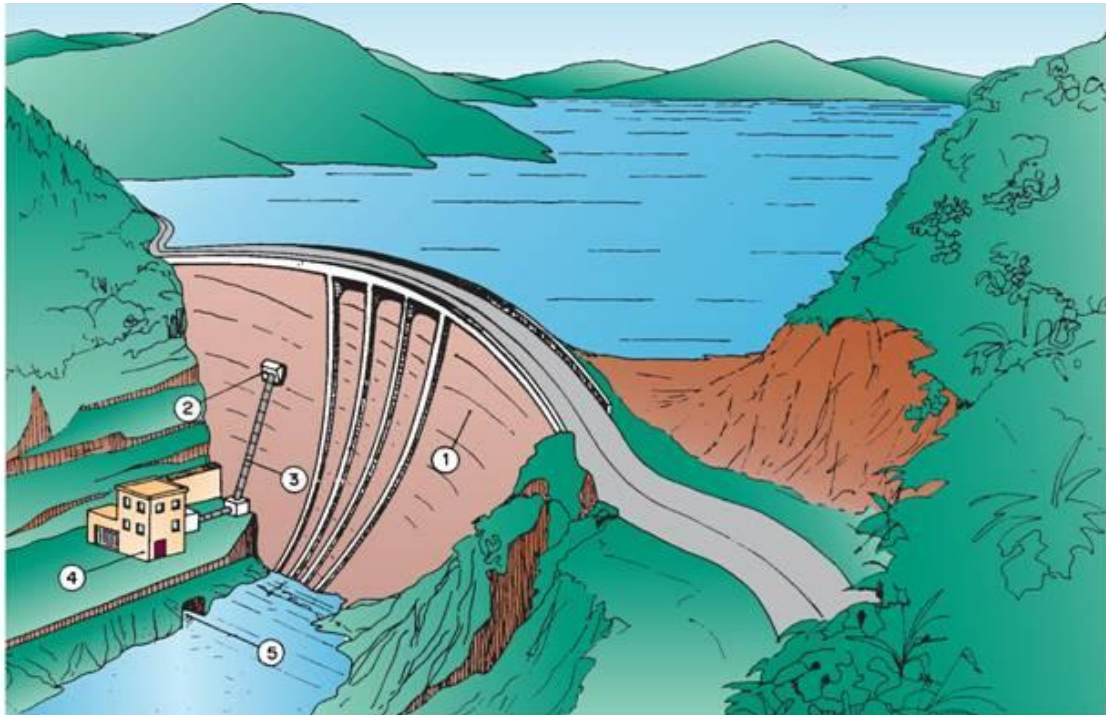


Ilustración 22: Partes de una central a pie de presa. Fuente [12]

Las partes enumeradas se nombran a continuación

1. Presa
 2. Toma de agua
 3. Tubería forzada
 4. Edificio con equipamiento electromecánico
 5. Canal de salida
- **Centrales integradas en redes de agua:** Consisten en centrales ubicadas en redes de agua existentes, reduciendo así la inversión necesaria, ya que gran parte de las estructuras ya están construidas y generando un impacto ambiental prácticamente nulo. Son centrales con un funcionamiento intermitente ya que dependen directamente de las épocas de regadío. Existen dos tipos de centrales de estas características según donde se implante.

- **En sistemas de agua potable o tuberías en presión:** La conducción de agua potable a una población se suele plantear como una tubería a presión que conduce el agua desde un embalse a la estación de tratamiento, a cuya entrada, un sistema de válvulas especialmente concebidas para ello se encargan de disipar la energía hidrostática. Existe la posibilidad de disipar esa energía mediante una turbina que genere electricidad. En caso de hacerlo, es necesario tener un circuito paralelo con válvulas disipadoras en caso de parada de la turbina.
- **En canales de riego:** Cuando la central se instala en un canal de riego tenemos, al menos, dos formas de hacerlo:
 - Ensanchando el canal para poder instalar en él la toma de agua, la central y el canal de derivación

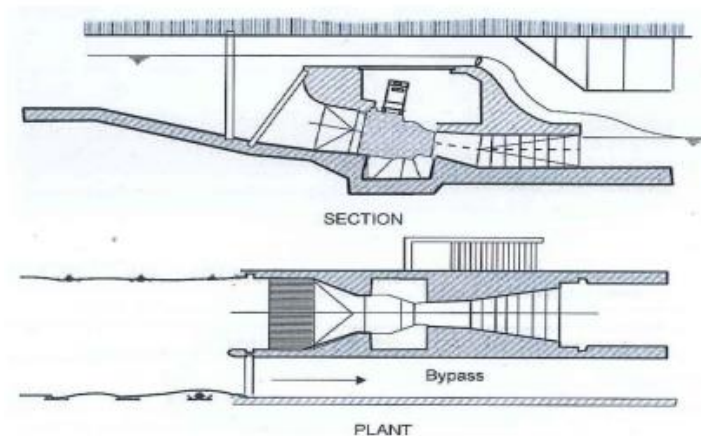


Ilustración 23: Sección y planta de un ensanchamiento del canal. Fuente [11]

- Si el canal ya está en funcionamiento, se realiza la toma de agua mediante un aliviadero en pico de pato, reduciendo así su anchura y facilitando la implementación de la central.

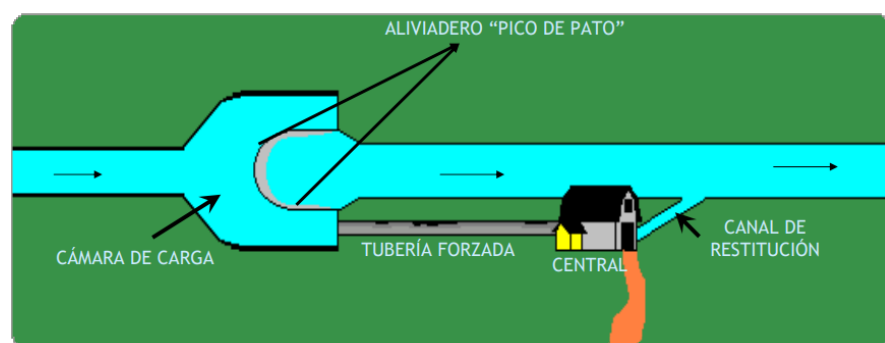


Ilustración 24: Central a partir de una toma de agua mediante un 'pico de pato'. Fuente: [11]

- **Centrales de bombeo o reversibles:** Son centrales hidroeléctricas que además de funcionar como una central convencional generando energía, tienen la capacidad de elevar el agua desde un embalse inferior a un embalse superior consumiendo energía eléctrica. Esta última operación se realizará en momentos del día donde la demanda sea mínima, horas valle en la curva de demanda, aprovechando así la posible energía sobrante que generen otras centrales. Este tipo de centrales son novedosas y muy interesantes, ya que solucionan el gran problema que tienen las energías renovables, que no se puede disponer de ellas siempre que se necesiten.

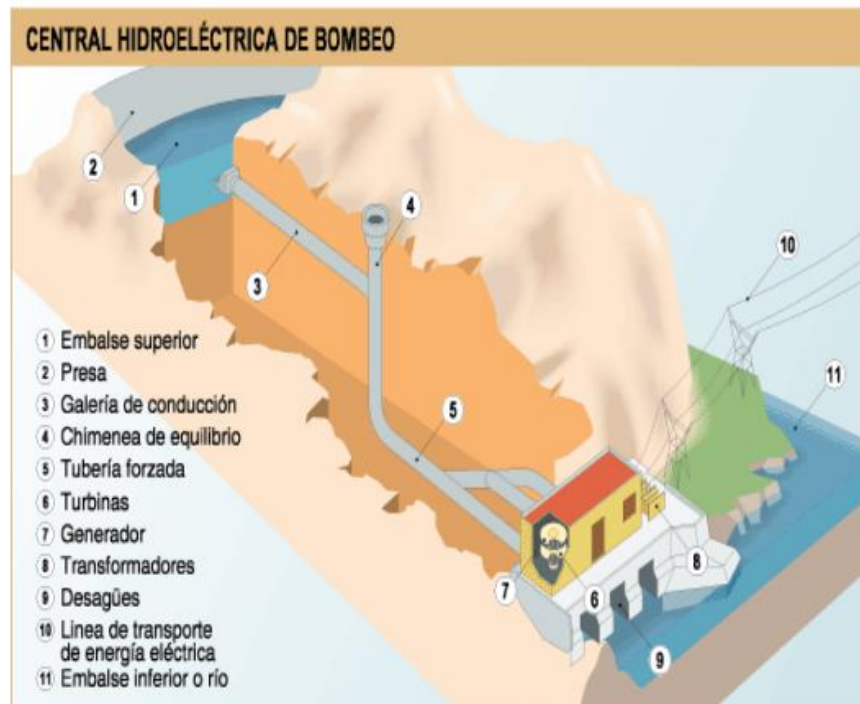


Ilustración 25: Esquema de una central hidroeléctrica reversible. Fuente [11]

2.2 Elementos constructivos

Instalaciones de obra civil

La obra civil engloba 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.

Se compone de los siguientes elementos:

1. Azudes y presas.

La obra llevada a cabo para provocar una retención en el cauce de un río puede ser de dos tipos:

- **Azud:** Muro transversal al curso del río, de poca altura, que provoca un remanso de agua sin llegar a producir una elevación notable del nivel. Su función es desviar parte del caudal a la toma de la central, dejando otra parte del caudal siguiendo el curso normal del río.

Los materiales para la construcción del azud pueden variar mucho dependiendo del presupuesto disponible y las condiciones del terreno, pudiendo ser de hormigón, ladrillos, escollera o incluso tierra. En los dos últimos casos se suele colocar un anclaje al terreno para mejorar su estabilidad.

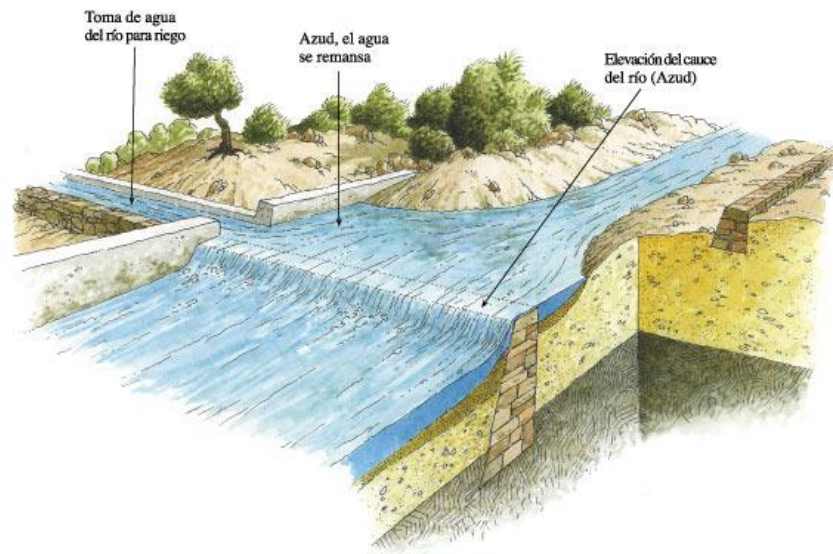


Ilustración 26: Esquema de un azud. Fuente: [13]

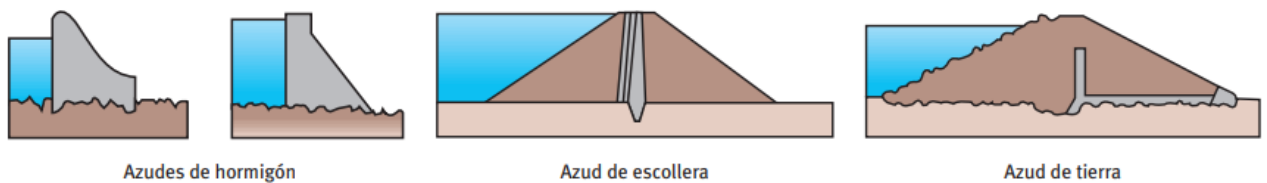


Ilustración 27: Tipos de azud según el material utilizado. Fuente [11]

- **Presa:** En este caso, el muro que retiene el agua es de gran altura, provocando una elevación notoria del nivel de agua mediante la creación de un embalse. Hay varios tipos de presas, según la forma en la que resisten el empuje hidrostático.
 - Presa de gravedad. Son aquellas presas que contrarrestan el empuje del agua con su propio peso, debido a esto es de gran importancia tener en cuenta las condiciones del terreno donde se construye, ya que la estabilidad de la presa

depende enormemente de este. Según el material utilizado para la construcción de la presa podemos dividir las presas de gravedad en dos tipos:

- i. De tierra o escollera: Suelen construirse con los materiales propios del material donde se asienta, siendo así presas de gran base y poca altura normalmente.
- ii. De hormigón: Se construyen sobre terrenos consistentes, son presas de larga duración y que necesitan poco mantenimiento. Además, al ser de hormigón pueden ser presas mucho más grandes que las de tierra o escollera.



Ilustración 28: Presa de gravedad construida a base de hormigón. Fuente [14]

- o Presa en arco: Su pared tiene forma curva, transmitiendo el esfuerzo del empuje del agua hacia las paredes del valle. Cuando las condiciones son favorables, es decir, el valle cuenta con laderas rocosas de buena calidad, la estructura necesita menos hormigón que una presa de gravedad, reduciendo así el coste de la construcción.

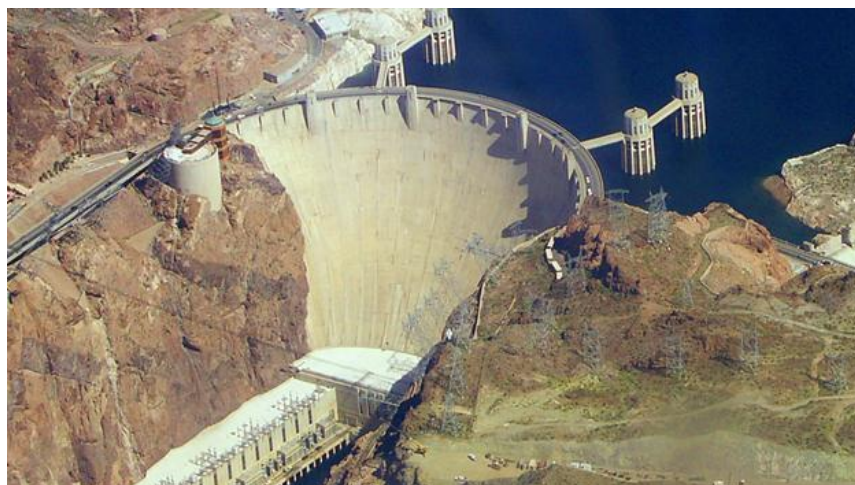


Ilustración 29: Presa en arco. Fuente [15]

- Presa hinchable: Estas presas se utilizan para elevaciones de poca altura de la lámina de agua, consistiendo en un tubo de material resistente y deformable relleno de agua o aire a una presión determinada. El sistema de apoyo está formado por una base de hormigón donde se sujeta la parte inferior del tubo.

Cuando el nivel de agua sube, ésta se desborda pasando por encima de la presa. El peso de la lámina acuática deforma el material y el tubo se aplasta ligeramente, dejando que el agua pase. Si el caudal continúa aumentando, a determinada altura se abre una válvula y el tubo se vacía, quedando completamente aplastado por el peso del agua sobre él. Cuando los caudales vuelvan a normalizarse, el agua o aire se reinyecta y la presa recupera su forma y funcionamiento normales.

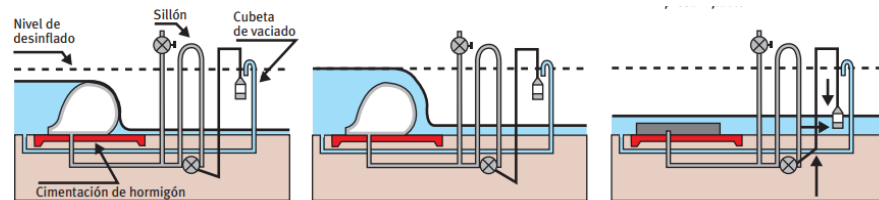


Ilustración 30: Esquema de funcionamiento de una presa hinchable.
Fuente [11]

Existen otros tipos de presa como puede ser la de contrafuertes, pero se va a omitir la explicación de estas ya que por su complejidad y coste no son de interés para este proyecto.

2. Aliviaderos, compuertas y válvulas

Las centrales hidroeléctricas deben disponer de dispositivos que permitan el paso del agua desde el embalse hasta el cauce del río aguas abajo, ya que en caso de que el nivel de agua del embalse suba repentinamente es necesario poder evacuar el agua sobrante sin que esta tenga que pasar por la central. De esto se encargarán las compuertas y válvulas. Existen diferentes posibilidades:

- Aliviaderos de superficie: Descargan las aguas próximas a la superficie libre del embalse, según el tipo de compuerta podemos clasificarlos de la siguiente forma:
 - Compuertas verticales: El elemento de cierre es un tablero de chapa reforzado que se sube y baja verticalmente guiado por unas ranuras en los pilares adyacentes. Cuando el empuje que ejerce el agua embalsada sobre la compuerta es grande, las guías sufren un fuerte rozamiento, en este caso se

utilizan “compuertas vagón”, cuyos bordes verticales están provistos de ruedas con rodamientos que apoyan en ambos carriles.

- Compuertas de segmento o Taintor: Consiste en una estructura metálica con una superficie en forma cilíndrica, la cual gira alrededor de un eje al que está unido mediante unos brazos radiales. La apertura se realiza con un movimiento hacia arriba.
- Compuertas de sector: Son parecidas a las de segmento, pero se diferencian en la forma de apertura. En este caso, el movimiento es de arriba hacia abajo, dejando libre el paso para que el agua vierta por encima de la compuerta. Este tipo de compuertas necesitan un alojamiento horizontal donde guardar la compuerta cuando esté abierto el paso de agua.
- Desagües de fondo o medio fondo: Este tipo de desagüe permite la salida controlada de aguas de las capas más profundas, pudiendo ser de aguja, de mariposa, de compuerta o de chorro hueco. Un problema a tener en cuenta en este tipo de desagües es la entrada de elementos gruesos en los conductos, siendo esto solucionable mediante la colocación de unas rejillas que funcionen a modo de filtro a la entrada de la válvula.

3. Toma de agua

Es la estructura encargada de desviar parte del agua del cauce del río hacia la central desde el azud o la presa por medio de canales o tuberías.

Esta estructura debe disponer de una rejilla que actúe de filtro para evitar la entrada de elementos sólidos al canal que puedan ocasionar obstrucciones o averías. Además, se recomienda instalar una ataguía, es decir, una compuerta de seguridad que nos permita cerrar la entrada de agua al canal en caso de emergencia o cuando se vaya a realizar una inspección de la instalación.

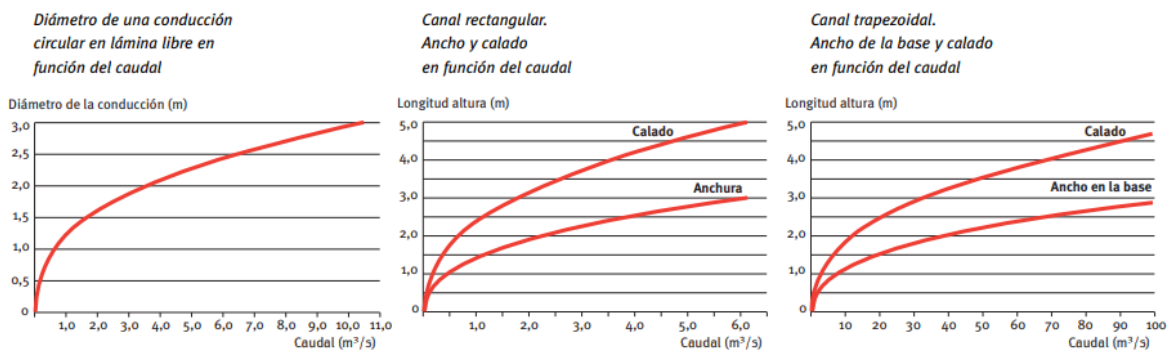
La toma de agua puede colocarse en la superficie o sumergida, siendo esta última más común en las centrales de montaña por el poco impacto medioambiental que tiene y por la sencillez de su construcción.

4. Canales, túneles y tuberías

Como se ha visto anteriormente, según el tipo de central que se construya, la red de conductos utilizada para transportar el agua tendrá que ser mayor o menor. Por ejemplo, una central a pie de presa no tiene cámara de carga por lo que el recorrido que tendrá que hacer el agua para llegar a la sala de máquinas donde se ubica la turbina será menor que en una central de agua fluyente. Estos conductos pueden dividirse en dos tipos, abiertos y cerrados.

- **Abiertos:** Suelen denominarse como canales, el fluido está en contacto con el aire y su desplazamiento depende directamente del efecto de la gravedad. Suelen utilizarse en el tramo que va desde la toma de agua a la cámara de carga, procurando que el fluido se desplace muy lentamente minimizando así las pérdidas de carga. Esto se consigue diseñando los canales con una pendiente mínima, del orden de [0,5:1000 – 1:1000].

La forma de estos conductos dependerá principalmente del terreno donde se construyan, siendo habitual la sección rectangular para canales en roca y trapezoidal para canales en tierra. A continuación, se muestran tres gráficos donde se da una estimación del calado (altura de la lámina de agua) y del ancho de la solera del canal en función del caudal. Para la representación de las curvas, se han fijado valores de taludes, pendientes y rugosidades habituales en este tipo de construcción.



Gráfica 1: Estimación del diámetro de la conducción, altura del calado y ancho de la solera en función del caudal. Fuente: [11]

- **Cerrados:** Consisten en un conducto que rodea al fluido, no estando este en contacto con el aire. En este caso, el movimiento del fluido se produce principalmente por la presión a la que el fluido es sometido. La sección de los conductos cerrados también es variable, aunque en el caso de las tuberías suelen ser circulares.

5. Cámara de carga

Es un depósito situado al final del canal de derivación. Se utiliza para almacenar agua y así poder proporcionar un caudal constante a la tubería forzada, garantizando así el correcto funcionamiento de la turbina y evitando posibles entradas de aire en la tubería que podrían causar sobrepresiones.

A la hora de diseñarla hay que tener en cuenta que, si el conducto utilizado para transportar el fluido desde la toma de agua a la cámara no es un canal, sino un conducto cerrado, es necesario que la cámara de carga sea cerrada y cuente con una chimenea de equilibrio, la cual protegerá la cámara ante cambios de presión y golpes de ariete.

La geometría de esta buscará minimizar las pérdidas de carga y los remolinos que se puedan producir. Además, es posible que sea necesario instalar una reja que actúe de filtro o un desarenador, que es una instalación encargada de eliminar por sedimentación parte del caudal sólido que entra por la toma de la central.

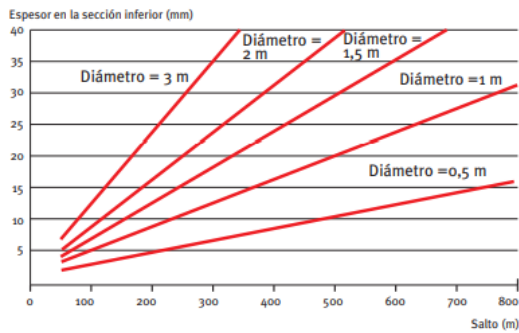
Necesitaremos un aliviadero como los explicados anteriormente para poder evacuar el agua en caso de parada de la central. Por último, es importante que la tubería forzada este suficientemente sumergida, ya que el rendimiento de la central podría verse afectado por vibraciones producidas por las sobrepresiones mencionadas anteriormente.

6. Tubería forzada

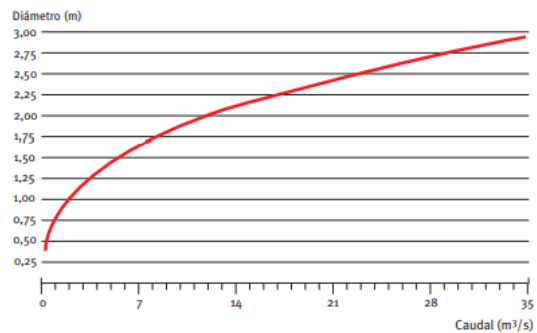
Es la tubería encargada de conducir el agua desde la cámara de carga hasta la turbina. Está especialmente diseñada para minimizar las pérdidas que se pudieran producir, además de estar preparada para soportar la presión que produce la columna de agua y la posible sobrepresión que puede causar el golpe de ariete en caso de parada brusca de la central. Al inicio de la tubería es recomendable instalar algún dispositivo de cierre que nos permita evitar el paso de agua y vaciar la tubería progresivamente.

Esta tubería suele construirse con acero, siendo también interesante la consideración de otros posibles materiales como el plástico reforzado con fibra de vidrio, la fundición o el fibrocemento, dependiendo del desnivel existente. Para la geometría de la tubería, se estudiará el tipo de salto y el caudal, siendo el espesor mínimo de esta de unos 3mm y el diámetro dependiendo directamente del caudal.

Espesor de la tubería forzada en la sección inferior en función del salto y el diámetro



Diámetro de la tubería en función del caudal



Gráfica 2: Estimaciones del espesor y diámetro de la tubería forzada en función del salto y el caudal. Fuente [11]

Dependiendo de la orografía, la tubería forzada puede ser subterránea o aérea:

- **Subterránea:** Son habituales en terrenos rocosos, se suele disponer de una cama de arena en el fondo de la zanja sobre la que se apoya la tubería y en los cambios de dirección de la tubería se instalan anclajes de hormigón. Al ser subterránea, hay ciertos terrenos en los que la tubería podría sufrir problemas de corrosión, siendo recomendable la aplicación de una protección catódica.
- **Aérea:** La tubería está en contacto con el aire, siendo sujeta por apoyos y anclajes en los cambios de dirección. Además, al estar expuesta a las condiciones meteorológicas, es necesario instalar juntas de dilatación que compensen los esfuerzos originados por los cambios de temperatura.

7. Casa de máquinas

Es el edificio donde se sitúa el equipamiento de la central: Generadores, turbinas, bancadas, alternadores... etc.

Las características del proyecto del edificio dependen de la maquinaria a utilizar, siendo muy variable la cantidad y tamaño del equipamiento utilizado según el salto y el caudal disponible. Independientemente de esto, la casa de máquinas siempre debe contar con los conductos necesarios para que el agua pueda llegar a la turbina con las menores pérdidas de carga posibles, además, es necesario un desagüe hacia el canal de descarga.

El emplazamiento de la construcción debe estudiarse con mucha cautela, ya que, según las características geológicas, orográficas y de accesibilidad, se podrá situar junto a la presa, al pie de esta, estar separado aguas abajo cuando existe la posibilidad de aumentar el salto, o incluso bajo tierra.

8. Elementos de cierre o regulación

Estos elementos son los ya mencionados anteriormente que nos permiten aislar la turbina en caso de parada o inspección. Es imprescindible la correcta colocación de estos elementos, siendo los más importantes: Ataguías, compuertas y válvulas.

2.3 Equipamiento electromecánico

1. Turbinas hidráulicas:

Es el elemento más importante de la central hidráulica, encargándose de transformar la energía cinética y potencial que contiene el agua en un movimiento de rotación. Esta rotación es transferida mediante un eje al generador, que lo convierte en energía eléctrica mediante un proceso que se explicará en detalle en el siguiente apartado. Existen diferentes tipos de turbina según su funcionamiento, estos tipos se explicarán en el apartado [Turbomáquinas hidráulicas](#).

2. Generador

Es la máquina encargada de convertir la energía mecánica de rotación producida por la turbina en energía eléctrica. Su funcionamiento está basado en la inducción electromagnética, y concretamente, en la ley de Faraday, la cual establece que al moverse un conductor eléctrico en un campo magnético se produce una corriente eléctrica a través de él.

Las partes básicas de un generador son:

- **Rotor:** Es la parte móvil del generador, se encarga de generar un campo magnético variable al girar arrastrado por la turbina. Es el inductor.
- **Estátor:** Parte fija del generador, es la parte sobre la que se genera la corriente eléctrica aprovechable. Es el inducido.

Dependiendo de la forma de funcionamiento del generador, podemos dividirlos en dos tipos: Síncrono o asíncrono

- Síncrono: La característica principal de estos generadores es que funcionan siempre a una velocidad constante, esta velocidad se conoce como velocidad de sincronismo. Esta velocidad viene dada por la expresión:

$$N_s = \frac{60 * f}{p} \quad (\text{ecu 1})$$

Donde:

- $N_s =$ *Velocidad de sincronismo [rpm]*
- $f =$ *Frecuencia [Hz] (50 Hz en España y Zimbabue)*
- $p =$ *Número de pares de polos del generador*

Como se ha dicho anteriormente, el generador funciona con el principio de la inducción electromagnética, creándose un campo magnético en los polos del rotor por la corriente eléctrica continua que circula por las bobinas. Para crear esta corriente, existen distintos sistemas de excitación:

- **Excitación independiente:** Se cuenta con una excitatriz independiente de corriente continua, la cual alimenta el rotor a través de un juego de anillos rozantes y escobillas.
 - **Autoexcitación estática:** La corriente utilizada proviene de la propia energía eléctrica generada, previamente transformada de alterna a continua.
 - **Excitación con diodos giratorios:** La fuente de la corriente continua es un rectificador no controlado situado en el rotor, el cual es alimentado mediante alterna por otro generador situado en el mismo eje y cuyo bobinado de campo es excitado desde un rectificador controlado que rectifica la señal generada por el giro de unos imanes permanentes situados en el mismo rotor.
- Asíncrono: Este tipo de generadores cuenta con un rotor de jaula de ardilla o de bobinado, mientras que en los síncronos está compuesto de un imán o electroimán. Además, en este caso, el giro del rotor debe ir retrasado respecto la velocidad del campo magnético rotatorio, el cual gira a la velocidad de sincronismo. Para ello, es necesario que el par mecánico transferido al rotor sea suficiente para que este pueda girar más rápido que la velocidad de sincronismo

y así crear un campo giratorio excitador. Esta diferencia de velocidades debe ser pequeña para reducir pérdidas en el cobre del rotor.

Este tipo de generadores no precisan de regulador de velocidad en la turbina, aunque si necesitan una batería de condensadores para compensar la energía reactiva generada.

Ventajas de usar un generador síncrono o asíncrono:

- Asíncrono:
 - ✓ Son máquinas más robustas y simples, manteniéndose en buen estado sin necesidad de un mantenimiento complejo.
 - ✓ Al estar alimentado por la red eléctrica directamente, no necesita regulación de tensión
 - ✓ No requiere de un circuito independiente para su funcionamiento

- Síncrono:
 - ✓ Control muy preciso de la tensión y/o de la energía reactiva que vierten a la red
 - ✓ Puede construirse con un alto rendimiento en una amplia gama de velocidades, ofreciendo así ahorros de energía notables con una amplia variedad de cargas.
 - ✓ Aumentan el factor de potencia de la red al funcionar también como condensadores síncronos
 - ✓ Velocidad fija independiente de la carga

3. Equipo eléctrico general y línea

Este equipamiento es el encargado de la medición de los distintos parámetros de la corriente eléctrica, de la transformación de tensión para reducir las pérdidas en el transporte, de la conexión a la línea de salida y de la distribución de la energía.

Este equipo podemos dividirlo en tres grupos:

- Transformador de tensión: El objetivo de este es elevar la tensión para así poder transportar la energía eléctrica con las mínimas pérdidas. Dependiendo de la tensión de trabajo, la transformación puede ser baja/media o media/alta tensión. Debe

contar con un sistema de refrigeración, el cual puede ser mediante convección natural o mediante un circuito cerrado de aceite.

- Línea eléctrica: Es la línea encargada de transportar la energía eléctrica creada en la central a las zonas de consumo. Es un punto muy a tener en cuenta a la hora de hacer el presupuesto, ya que podría encarecer el proyecto enormemente.
- Equipos eléctricos en el interior del edificio: Pueden variar según el tipo de estación, pero podríamos decir que son los elementos encargados de las distintas mediciones y medidas de seguridad de la estación. Se pueden dividir en cuatro grupos:
 - a. Transformadores de medida: Como su nombre indica, son los transformadores utilizados para la medición de valores de corriente y tensión. Transforman valores muy altos de tensión y corriente en valores más bajos para así poder medir de forma segura con aparatos de medición (polímetros) convencionales. Se caracterizan por su precisión, ya que deben distorsionar lo menos posible los valores reales.
 - b. Transformadores de equipos auxiliares: Son los encargados de garantizar el suministro de la tensión requerida por los equipos para su correcto funcionamiento.
 - c. Disyuntores y seccionadores: Son aparatos que permiten aislar un elemento de la central o de la red eléctrica por razones de seguridad o en caso de tener que llevar a cabo tareas de mantenimiento. Los seccionadores operan en vacío, lo que quiere decir que los circuitos que deba interrumpir el seccionador deben de hallarse libres de corriente. El disyuntor, sin embargo, no tiene que trabajar en vacío, teniendo que pasar de tener una impedancia prácticamente nula a una impedancia infinita, convirtiéndose así en un aislante.
 - d. Pararrayos: Es un dispositivo de seguridad encargado de absorber las posibles sobretensiones de alta frecuencia producidas por descargas que si no existieran descargarían sobre los aisladores, perforando el aislamiento y ocasionando interrupciones y desperfectos en transformadores u otros equipos.

4. Elementos de regulación, control y protección

Además de los dispositivos mencionados anteriormente, en la central existen una serie de elementos con el fin de controlar y regular el adecuado funcionamiento de la maquinaria. En una central hidroeléctrica de pequeñas dimensiones, los principales bucles de control y sistemas de supervisión son:

- Control de la turbina
 - Regulador de caudal turbinado
 - Reguladores de nivel para grupos asíncronos conectados a la red
 - Regulador de velocidad en caso de contar con grupos síncronos
 - Regulador de potencia generada para centrales en red aislada

- Control del generador:
 - Baterías de condensadores y relé taquimétrico, en caso de haber grupos asíncronos conectados a la red
 - Regulador de tensión para grupos síncronos
 - En caso de haber grupos síncronos conectados a la red será necesario un equipo de sincronización

Como se puede ver, dependiendo del tipo de generador y el funcionamiento previsto, habrá que instalar una serie de controles u otros. Se pueden distinguir tres casos básicos:

- Central con generador asíncrono funcionando conectado a la red:
Del control del generador se encarga una batería de condensadores estáticos, que a su vez están controlados de forma continua por tiristores.

En este caso la frecuencia está mantenida por la red, por lo que no será necesario el control de la turbina. Un servo-oleohidráulico se encarga del mando del distribuidor, y las órdenes de apertura y cierre proceden del regulador de nivel. Por último, será necesario un detector de velocidad para la conexión del grupo a la red, utilizando un relé taquimétrico para proporcionar una señal cuando el grupo alcance la velocidad de sincronismo.

- Central con generador síncrono funcionando conectado a la red: Al igual que en el caso anterior, la frecuencia está mantenida por la red, por lo que no será necesario un regulador de velocidad para el control de la turbina, aunque su instalación es conveniente. Un servo-oleohidráulico se encarga del mando del distribuidor, y las órdenes de apertura y cierre proceden del regulador de nivel.

Respecto al control del generador, será necesario un regulador del factor de potencia, ya que la tensión está fijada por la red y la potencia reactiva suministrada por el grupo será modificada por la variación de la excitación.

- Central con generador síncrono funcionando aislado: Al estar aislado, para que el control de la turbina pueda asegurar en cualquier condición de carga el

mantenimiento de la frecuencia de la red, se necesitará un sistema de regulación de velocidad y potencia.

En el caso del control del generador, para poder mantener la tensión dentro de unos límites admisibles, será necesario un regulador de tensión que actúe sobre la excitación del alternador.

Una central hidroeléctrica no está exenta de riesgos, por lo que será necesario instalar una serie de protecciones para evitar males mayores en caso de que se produzca un hecho anormal en su funcionamiento. Dependiendo del motivo que haya provocado dicha irregularidad, la protección actuará forzando la parada de algún grupo, la parada total de la central en casos graves o simplemente provocando una alarma en los casos más leves.

Estas son las principales causas que podrían producir el accionamiento de alguna protección:

- Protecciones mecánicas:
 - Desconexión de la bomba del aceite de regulación
 - Nivel mínimo hidráulico
 - Temperatura de aceite del multiplicador de velocidad
 - Nivel de circulación del fluido de refrigeración
 - Temperatura de ejes y cojinetes
 - Embalamiento de turbina y generador

- Protecciones eléctricas del generador y transformador:
 - Nivel de frecuencia (Debe mantenerse entre 47,5 y 51 Hz)
 - Intensidad máxima
 - Nivel de tensión (Debe mantenerse entre el 85% y el 100% de la tensión nominal)
 - Calentamiento del generador y/o transformador
 - Producción de gases en el transformador (Protección Buchholz)
 - Derivación en el estátor
 - Retorno de potencia (máxima admitida 5% de la nominal)

- Protecciones de la línea de media tensión:
 - Red de tierra, para limitar la tensión con respecto al terreno
 - Derivación de una fase de tierra
 - Sobreintensidad
 - Cortocircuito o inversión de fases

5. Automatización

Una forma efectiva de reducir los costes de mantenimiento y operación de una central, optimizar el aprovechamiento energético y aumentar la seguridad de los equipos es la automatización de la central. Esta automatización no siempre podrá ser completa, lo que incluiría las operaciones de arranque, regulación y parada de la central, ya que el grado de automatización depende directamente del presupuesto, incluyendo el coste del personal de trabajo, las posibilidades reales de regulación, la ubicación y el tipo de central.

Son tales los beneficios que garantiza la automatización de la central, que hoy en día las centrales de nueva construcción están totalmente automatizadas, y no sólo eso, sino que se están centrando muchos esfuerzos en automatizar centrales antiguas para mejorar su rendimiento energético y reducir los costes de explotación.

Como se ha dicho anteriormente, puede haber distintos grados de automatización, que según la tecnología escogida se pueden dividir en:

- Convencional: Es la opción más sencilla y económica de automatización, basada en los relés electromecánicos o estáticos. Al ser la opción más sencilla, es una automatización que podría encargarse de las operaciones de secuencias de arranque y de secuencias de parada por protecciones.
- Digital: Esta opción está menos limitada que la anterior, ya que al utilizar microprocesadores las posibilidades de automatización son mucho mayores, siendo posible encargarse de las operaciones de arranque y parada normal del grupo, parada de emergencia de grupo, regulación del grupo por nivel o caudal y optimización de funcionamiento del conjunto de la instalación.

A continuación, se muestra un mapa conceptual de un sistema de automatización:

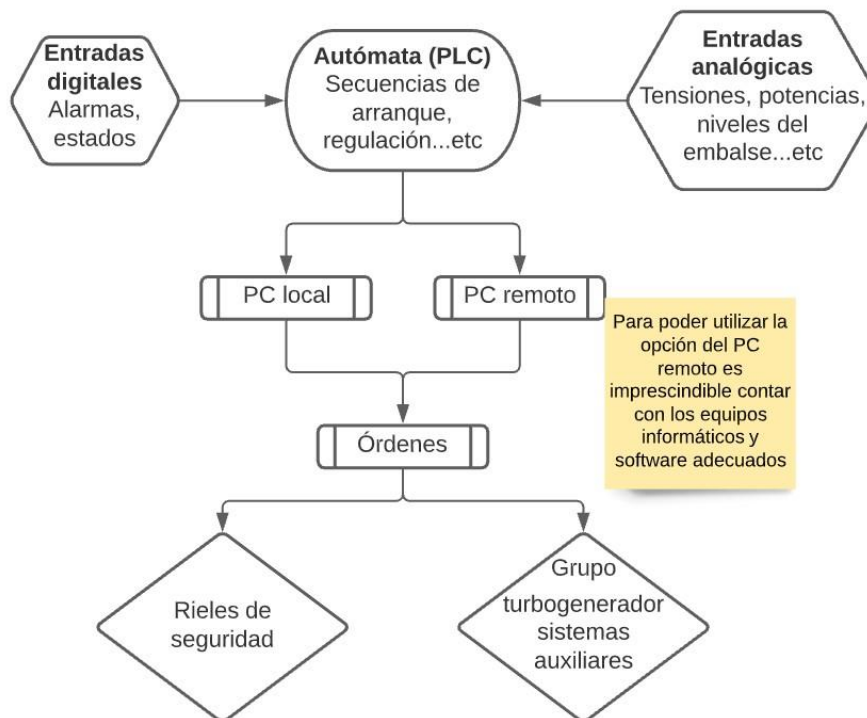


Ilustración 31: Mapa conceptual de un sistema de automatización. Fuente propia

6. Sistemas auxiliares

Son los sistemas que proporcionan energía eléctrica a todas las cargas interiores de una central que lo precisen. Su configuración es un criterio clave del diseño y está directamente relacionado con la disponibilidad, la seguridad y la criticidad de la central, de ahí que se pueda afirmar que, pese a que se llamen sistemas auxiliares, estos son esenciales en la central.

Existen dos tipos de sistemas auxiliares según la corriente utilizada:

- Servicios auxiliares en corriente alterna: Al permitir ceros en su alimentación, alimentan cargas que no sean fundamentales para garantizar la seguridad de las personas o instalaciones. Las cargas típicas que podemos encontrar son:
 - Alumbrado y climatización
 - Motores de accionamiento de bombas, compresores, ventiladores, molinos, aparellaje, etc.
 - Fuerza (tomas de corriente)
 - Resistencias de caldeo, etc

- Servicios auxiliares en corriente continua: Alimentan a las cargas de la instalación necesarias para garantizar la seguridad de las personas o instalaciones, y deben, por tanto, proporcionar suministro eléctrico seguro, aun en caso de pérdida de los sistemas auxiliares en corriente alterna. Las cargas que podemos encontrar son:
 - Sistema de control y mando de todos los elementos de la planta
 - Sistema de protecciones eléctricas
 - Sistema de telecomunicaciones y convertidores de medida
 - Sistema de alumbrado de emergencia
 - Cualquier equipo y motor de emergencia que no pueda quedar sin tensión en los breves periodos de tiempo necesarios para que arranquen los motores diesel de emergencia y repongan la tensión de corriente alterna.

3. Conceptos fundamentales

3.1 Caudal

Para generar energía hidroeléctrica es necesario un determinado caudal y una caída. Se entiende por caudal el volumen de agua que pasa en un tiempo determinado por una sección del río y se mide en m³/s. Se puede expresar con la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (\text{ecu 2})$$

Donde:

- $Q = \text{Caudal} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$
- $V = \text{Volumen} [\text{m}^3]$
- $t = \text{tiempo} [\text{s}]$

En caso de que estemos midiendo el caudal que pasa por una tubería circular, existe otra expresión que podría ser de mayor utilidad. Como el volumen de agua que pasará en un determinado tiempo tendrá la forma de un cilindro con una sección igual a la de la tubería y con una longitud 'd' medida en metros, podemos afirmar que 'V' será equivalente al volumen del cilindro por lo que:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{A * d}{t} \quad (\text{ecu 3})$$

Donde:

- $d = \text{longitud cilindro} [m]$
- $A = \text{Área de la sección que atraviesa el fluido} [m^2]$

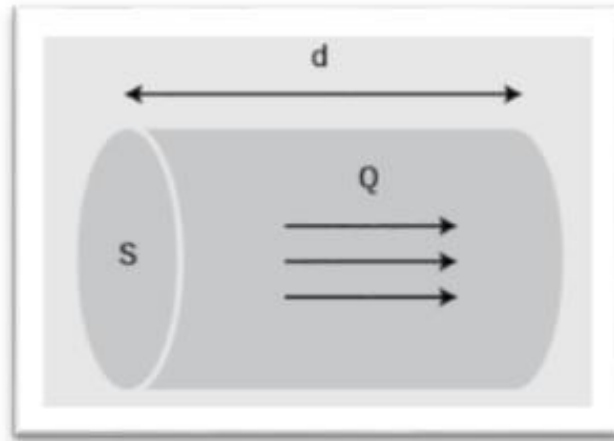


Ilustración 32: Cilindro con parámetros para calcular el caudal. Fuente: [16]

Además, como se puede ver en la expresión (ecu 3) el caudal depende de la distancia recorrida por el agua en un tiempo determinado, lo cual es sabido que es la velocidad a la que circula el agua, por lo que podríamos reducir la expresión a:

$$Q = \frac{A * d}{t} = A * v \quad \text{(ecu 4)}$$

Donde:

- $v = \text{Velocidad de circulación del agua} \left[\frac{m}{s} \right]$

Por lo que podemos concluir que el caudal que circula por el interior de una tubería dependerá de la velocidad de circulación del agua y del ancho del tubo por el que circule.

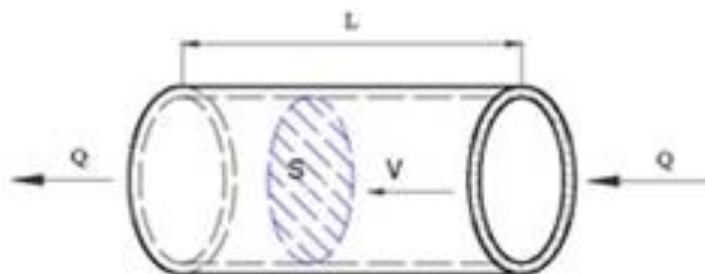


Ilustración 33: Tubería donde se muestra un caudal atravesando una sección 'S' con velocidad 'v'. Fuente [16]

Por último, es importante conocer los términos utilizados para diferenciar los diferentes tipos de caudales existentes a la hora de diseñar la central. Se especificará su uso más adelante.

- Caudal máximo 'QM': Caudal máximo alcanzado en el año o caudal de crecida
- Caudal mínimo 'Qm': Caudal mínimo del año o estiaje
- Caudal de servidumbre 'Qsr': Es el caudal que es necesario dejar en el río por su cauce normal. Está compuesto por el caudal ecológico, que es aquel que permite mantener, como mínimo, la vida de los peces que de manera natural habitan en un río, así como la vegetación de su ribera y por el caudal necesario para otros usos como puede ser el consumo humano o el riego. El caudal ecológico, si no se tienen estimaciones, debería ser el 10% del caudal medio interanual.
- Caudal mínimo técnico 'Qmt': Depende del tipo de turbina a utilizar, ya que se calcula multiplicando un factor 'K' propio de la turbina por el caudal de equipamiento. A continuación, se muestra una tabla con valores aproximados de este parámetro según el tipo de turbina. Sólo se han considerado los valores típicos para los modelos más utilizados:

| Tipo de turbina | K |
|-----------------|------|
| Pelton | 0,1 |
| Kaplan | 0,25 |
| SemiKaplan | 0,4 |
| Francis | 0,4 |

3.2 Salto hidráulico

Para el diseño de una central hidroeléctrica, el salto disponible es un parámetro fundamental, condicionando la potencia que va a ser posible generar por lo que se intentará aprovechar el máximo salto permitido por la topografía del terreno, teniendo siempre en cuenta los posibles incrementos que puede suponer esto en el presupuesto del proyecto y el impacto medioambiental que pueda tener.

Los términos a conocer relacionados con el salto son los siguientes:

- Salto bruto 'Hb': Es la altura existente entre el punto de la toma de agua del azud o presa y el punto de descarga del caudal turbinado al río
- Salto útil 'Hu': Desnivel existente entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y el nivel de desagüe en la turbina. Si no existe cámara de carga, es igual que el salto bruto.
- Salto neto 'Hn': Es la diferencia entre el salto útil y las pérdidas de carga producidas a lo largo de todas las conducciones. Representa la máxima energía que se podrá transformar en trabajo en el eje de la turbina.
- Pérdidas de carga 'Hp': Son las pérdidas por fricción del agua contra las paredes del canal y en la tubería forzada, más las pérdidas ocasionadas por la turbulencia, al cambiar de dirección el flujo, al pasar a través de una rejilla o una válvula, etc.

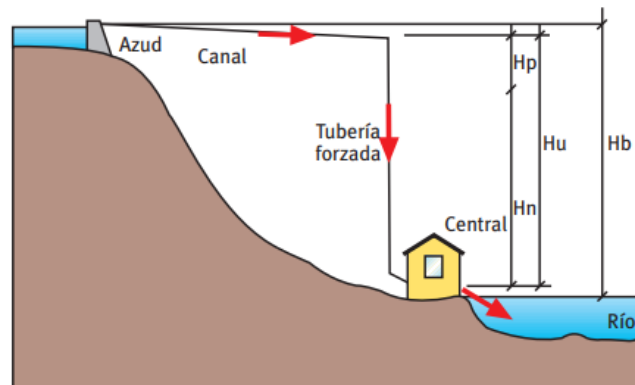


Ilustración 34: Esquema básico donde se muestran los diferentes tipos de salto. Fuente: [11]

3.3 Potencia

La potencia es el trabajo que se ha realizado durante la unidad de tiempo, es decir, la energía desarrollada por unidad de tiempo. Según el sistema que estemos analizando, podemos referirnos a la potencia como eléctrica, mecánica, hidráulica, etc. En este caso nos centraremos en la potencia hidráulica ya que es la de nuestro interés.

La potencia de la que dispondrá la central dependerá del caudal de agua disponible para ser turbinado, del salto existente y del factor de eficiencia de la central, como se puede ver reflejado en la siguiente expresión:

$$P = g * Q * Hn * e \quad (\text{ecu 5})$$

Donde:

- $P = \text{Potencia [KW]}$
- $g = \text{aceleración producida por la gravedad} = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$
- $Q = \text{Caudal de equipamiento} \left[\frac{m^3}{s} \right]$
- $Hn = \text{Salto neto existente [m]}$
- $e = \text{Factor de eficiencia de la central, el cual se expresa de la siguiente forma:}$

$$e = R_t * R_g * R_s \quad (\text{ecu 6})$$

Donde:

- $R_t = \text{Rendimiento de la turbina}$
- $R_g = \text{Rendimiento del generador}$
- $R_s = \text{Rendimiento del transformador de salida}$

Este factor de eficiencia depende del equipo escogido, pero a modo de aproximación, en caso de no contar con los datos necesarios, se podría decir que tiene un valor de 0,87.

El cálculo de la potencia es de gran relevancia en el proyecto de una central, ya que, una vez conocida, es posible calcular la producción media de esta con la siguiente expresión:

$$E = g * Q * Hn * T * e * \eta \quad (\text{ecu 7})$$

Donde:

- $T = n^{\circ} \text{ de horas de funcionamiento}$
- $\eta = \text{Coeficiente de imponderables que refleja las pérdidas de energía debidas al mantenimiento y reparación de la central, incluso la disponibilidad del agua y la necesidad del mercado eléctrico}$

Para este cálculo hay que tener en cuenta que el caudal es variable en función del tiempo, por lo que la energía se calculará en un periodo de tiempo donde el caudal pueda considerarse constante.

3.4 Pérdidas de carga

Las pérdidas y ganancias de energía en un sistema se contabilizan en términos de energía por unidad de peso del fluido que circula por él. Esto también se conoce como carga.

Las pérdidas de carga pueden dividirse en primarias y secundarias según como se produzcan.

- **Pérdidas primarias:** Se producen cuando el fluido en movimiento entra en contacto con las paredes de la tubería, convirtiéndose parte de la energía del sistema en energía térmica.

La expresión utilizada para calcular las pérdidas de carga primarias es la fórmula de Darcy-Weisbach (ecu 8), válida tanto para flujo laminar como turbulento de cualquier líquido en una tubería. Según el tipo de régimen obtenido variará el factor de fricción representado con una 'f'.

$$H_l = f * \frac{L}{D_i} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (\text{ecu 8})$$

Donde:

- o $L =$ Longitud de la tubería [m]
- o $D_i =$ Diámetro interior de la tubería [m]
- o $v =$ Velocidad del fluido [m/s]
- o $H_l =$ Pérdidas de carga primarias [m]
- o $f =$ Factor de fricción de Darcy

Como se ha dicho anteriormente, el factor de fricción dependerá del flujo obtenido, pudiendo ser laminar o turbulento.

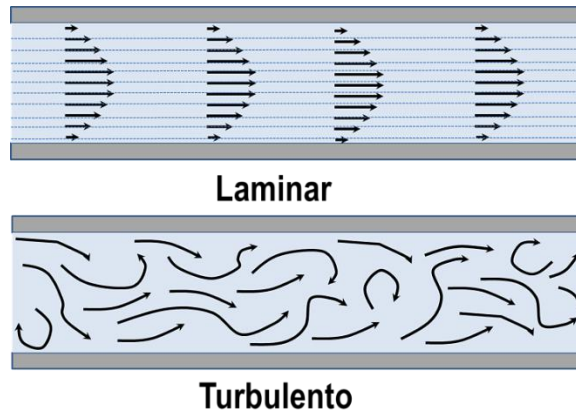


Ilustración 35: Representación del flujo laminar y turbulento. Fuente: [17]

Régimen laminar

En régimen laminar, el factor de fricción es independiente de la rugosidad relativa y depende únicamente del número de Reynolds que se representará como 'Re'.

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re} \quad (\text{ecu 9})$$

El número de Reynolds se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido, es adimensional y su valor indica si el flujo estudiado sigue un modelo laminar o turbulento. Para régimen laminar su valor es $Re < 2300$. Para calcularlo es necesario tener en cuenta el tipo de conducto utilizado, teniendo los siguientes casos:

- Fluido que circula por el interior de una tubería circular recta:

$$Re = \frac{\rho * v * Di}{\mu} = \frac{v * Di}{\nu} \quad (\text{ecu 10})$$

Donde:

- $\rho = \text{Densidad específica del fluido} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
- $\mu = \text{Viscosidad dinámica del fluido} [Pa * s]$
- $\nu = \text{Viscosidad cinemática del fluido} = \frac{\mu}{\rho}$

- Fluido que circula por el interior de una tubería cuya sección recta no es circular:

$$Re = \frac{\rho * v * D_H}{\mu} = \frac{v * D_H}{\nu} \quad (\text{ecu 11})$$

Donde:

- $D_H = \text{Diámetro hidráulico de la tubería} = 4 * \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro mojado}} [m]$

Régimen turbulento

En este tipo de régimen el número de Reynolds será $Re > 4000$. El factor de fricción lo calcularemos de una forma u otra dependiendo del tipo de régimen turbulento.

- Régimen turbulento liso. 1ª ecuación de Karmann-Prandtl

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{2,51}{Re * \sqrt{f}}\right) \quad (\text{ecu 12})$$

Nótese, que al igual que en régimen laminar, el coeficiente de fricción depende exclusivamente del número de Reynolds.

- Régimen turbulento intermedio. Ecuación de Colebrook simplificada

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 * \log\left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7}\right)^{1,11}\right) \quad (\text{ecu 13})$$

- Régimen turbulento rugoso. Pueden utilizarse dos ecuaciones en este tipo de régimen, la 2ª ecuación de Karmann-Prandtl o la ecuación de Swamee y Jain. Sus expresiones se muestran a continuación respectivamente.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{\varepsilon/D}{3,7}\right) \quad (\text{ecu 14})$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\mathcal{E}/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (\text{ecu 15})$$

Donde:

$\mathcal{E} = \text{Rugosidad absoluta [m]}$

En caso de no conocer el tipo de régimen turbulento a analizar, se puede optar por utilizar la ecuación de Colebrook-White, más generalizada y útil tanto para régimen turbulento como transitorio, es decir, cuando $2300 < Re < 4000$.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left(\frac{\mathcal{E}/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (\text{ecu 16})$$

En cualquier caso, para el cálculo del factor de fricción en régimen turbulento a partir de estas fórmulas es necesario el uso de métodos iterativos, por lo que, especialmente para estos casos, puede ser de gran utilidad el uso del diagrama de Moody. Este diagrama es la representación gráfica en escala doblemente logarítmica del factor de fricción en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa de una tubería.

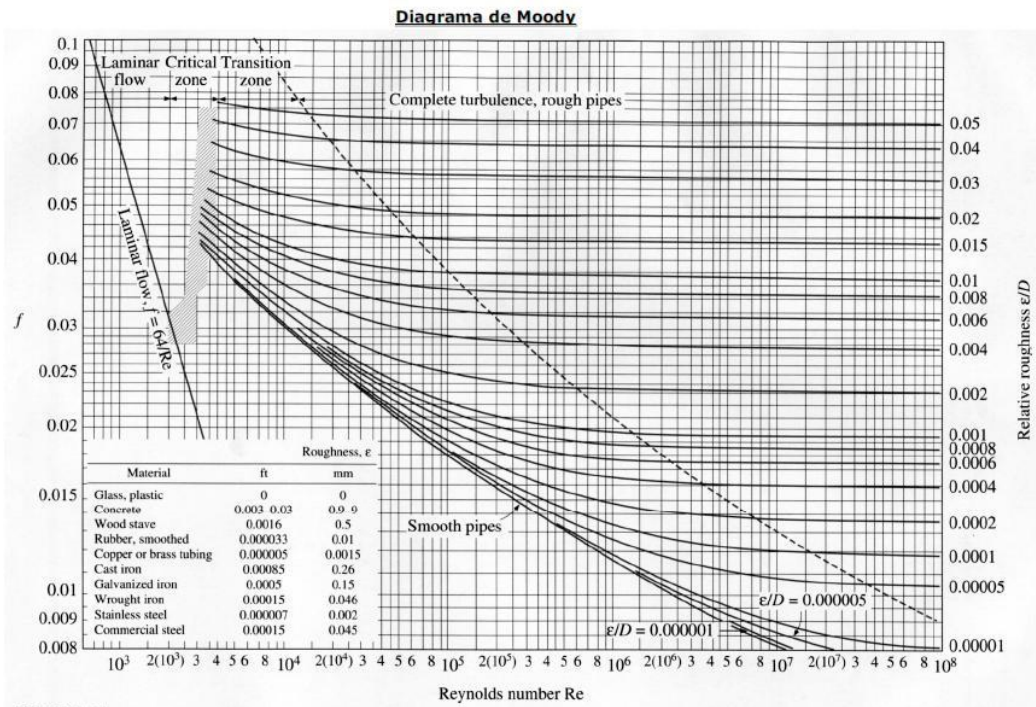


Ilustración 36: Diagrama de Moody. Fuente: [19]

TABLA 5-6 Valores de aspereza superficial para varios materiales*

| Material | Aspereza de superficie ϵ , mm |
|--|--|
| Tubos estirados (latón, plomo, vidrio y similares) | 0.00152 |
| Acero comercial o hierro | 0.0457 |
| Hierro fundido asfaltado | 0.122 |
| Hierro galvanizado | 0.152 |
| Hierro fundido | 0.259 |
| Duelas de madera | 0.183-0.914 |
| Concreto | 0.305-3.05 |
| Acero remachado | 0.914-9.14 |

*Moody, *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 66, 671-684 (1944); *Mech. Eng.* 69, 1005-1006 (1947). King y Brater, *Handbook of Hydraulics*, 6a. ed. pp. 6-12 y 6-13, McGraw-Hill, New York, 1976, presentan valores adicionales ϵ para varios tipos o condiciones, de concreto, hierro forjado, acero soldado, acero remachado y tuberías de metal corrugado. Para convertir milímetros a ft, multiplicar por 3.281×10^{-3} .

Ilustración 37: Diferentes valores de rugosidad absoluta según el material. Fuente [19]

Una vez conocido el coeficiente de fricción ya se podrían calcular las pérdidas primarias con la ecuación (ecu 8).

- **Pérdidas secundarias:** Estas son las pérdidas provocadas por elementos singulares de la tubería como pueden ser válvulas, codos, etc. Estas pérdidas normalmente son

menores que las primarias y se expresan en términos del coeficiente de pérdida 'K' o también llamado coeficiente de resistencia.

$$H_s = K * \frac{v^2}{2 * g} \quad (\text{ecu 17})$$

| Tipo de accesorio o válvula | Pérdida adicional por fricción, No. equivalente de cargas de velocidad, K |
|---|---|
| L de 45°, estándar ^{b,c,d,e,f} | 0.35 |
| L de 45°, radio largo ^c | 0.2 |
| L de 90°, estándar ^{b,c,d,e,f,g,h} | 0.75 |
| Radio largo ^{b,c,d,e} | 0.45 |
| Cuadrada o a inglete ^b | 1.3 |
| Coño de 180°, retorno cerrado ^{b,c,c} | 1.5 |
| T estándar en un tramo, bifurcación sellada ^e | 0.4 |
| Usada como L al entrar a una bifurcación ^{b,f} | 1.0 |
| Usada en L al entrar a una bifurcación ^{c,g,i} | 1.0 |
| Flujo que se bifurca ^{d,j,k} | 1 ^l |
| Acoplamiento ^{c,e} | 0.04 |
| Unión ^e | 0.04 |
| Válvula de compuerta ^{b,c,m} abierta | 0.17 |
| 3/4 abierta ⁿ | 0.9 |
| 1/2 abierta ⁿ | 4.5 |
| 1/4 abierta ⁿ | 24.0 |
| Válvula de diafragma, ^o abierta | 2.3 |
| 3/4 abierta ⁿ | 2.6 |
| 1/2 abierta ⁿ | 4.3 |
| 1/4 abierta ⁿ | 21.0 |
| Válvula de globo, ^{c,m} de asiento biselado, abierta | 6.0 |
| 1/2 abierta ⁿ | 9.5 |
| De asiento compuesto, abierta | 6.0 |
| 1/2 abierta ⁿ | 8.5 |
| De tapón, abierto | 9.0 |
| 3/4 abierta ⁿ | 13.0 |
| 1/2 abierta ⁿ | 36.0 |
| 1/4 abierta ⁿ | 112.0 |
| Válvula angular, ^{b,c} abierta | 2.0 |
| Y o válvula de escape, ^{b,m} abierta | 3.0 |
| De llave ciega ^p (Fig. 5-42) θ = 5° | 0.05 |
| 10° | 0.29 |
| 20° | 1.56 |
| 40° | 17.3 |
| 60° | 206.0 |
| Válvula de mariposa ^p (Fig. 5-43) θ = 5° | 0.24 |
| 10° | 0.52 |
| 20° | 1.54 |
| 40° | 10.8 |
| 60° | 118.0 |
| Válvula de retención ^{b,c,m} de columpio | 2.0 ^q |
| De disco | 10.0 ^q |
| De bola | 70.0 ^q |
| Válvula de pie ^c | 15.0 |
| Medidor de agua ^b , disco | 7.0 ^r |
| De pistón | 15.0 ^r |
| Rotatoria (disco en estrella) | 10.0 ^r |
| De rueda de turbina | 6.0 ^r |

Ilustración 38: Diferentes valores del coeficiente 'K' para distintos elementos. Fuente: [19]

Estos valores de K pueden variar según el fabricante y la pieza utilizada, por lo que lo más recomendable es tomar el valor que el fabricante haya obtenido experimentalmente.

Las pérdidas totales que se producen en los conductos del sistema se obtendrán sumando las pérdidas primarias y secundarias como se refleja en la siguiente expresión:

$$H_p = H_l + H_s \quad (\text{ecu 18})$$

3.5 Fenómenos a evitar

Cavitación

La cavitación es un fenómeno de gran importancia en el estudio de la mecánica de los fluidos y de particular influencia en el funcionamiento de toda máquina hidráulica.

Este fenómeno aparece cuando la presión ejercida sobre un líquido en movimiento desciende por debajo de su presión de vaporización, evaporándose y formando así un gran número de pequeñas burbujas que viajan con la corriente líquida y que, al ganar presión nuevamente aguas abajo, explotan con violencia, causando vibraciones, disminución del rendimiento e incluso daños graves en la instalación.

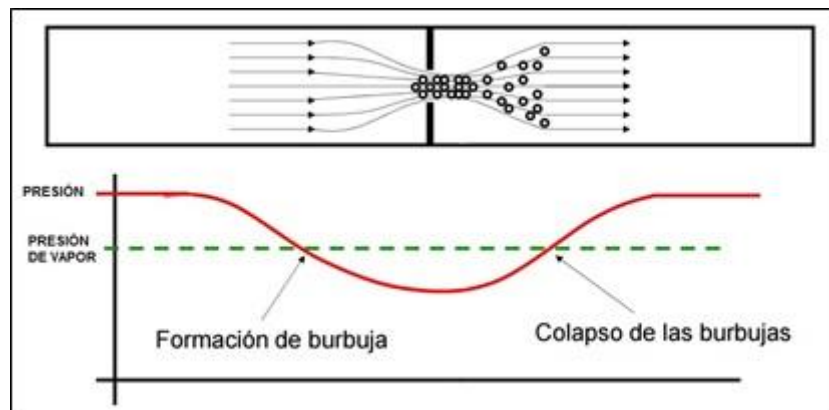


Ilustración 39: Ilustración de por qué se forman las burbujas de la cavitación. Fuente: [20]

Este fenómeno aparece en estrechamientos, donde al reducir la sección por donde pasa el fluido este aumenta su velocidad, lo que se conoce como efecto Venturi. Este aumento de velocidad trae consigo una disminución de la presión, pudiendo bajar hasta la presión de vapor del fluido, ocurriendo así la cavitación.

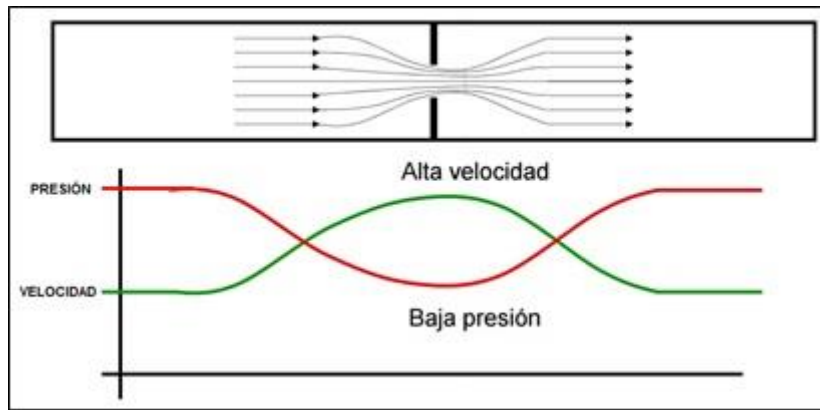


Ilustración 40: Ilustración cualitativa del efecto Venturi Fuente: [20]

Para prevenir este fenómeno deben tomarse las siguientes medidas:

- Evitar presiones bajas
- Evitar temperaturas cerca del punto de ebullición del fluido
- Utilizar perfiles delgados de álabes
- Seleccionar un ángulo pequeño de ataque de los álabes
- Prevenir cambios abruptos de la dirección del flujo
- Redondeado de los bordes de ataque



Ilustración 41: Daños provocados por cavitación. Fuente [20]

Golpe de ariete

Este fenómeno es la sobrecarga de presión que sufre un conducto en su interior cuando una columna de líquido se mueve dentro de ella con cierta inercia y, bruscamente, ese flujo se intenta detener mediante el cierre de una válvula o una compuerta. Esto provoca un movimiento oscilatorio del agua, compresión y descompresión, hasta que se alcance el equilibrio estático.

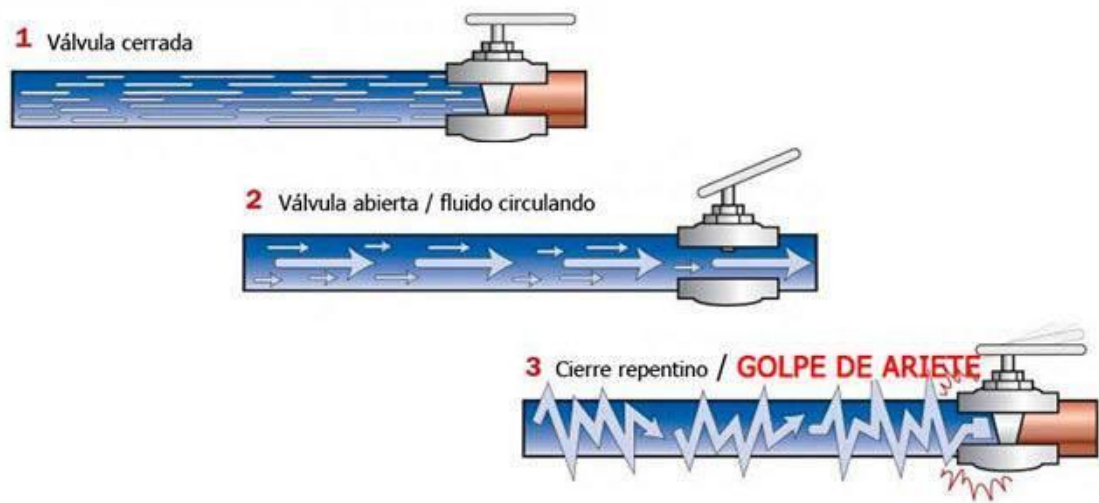


Ilustración 42: Proceso que origina el golpe de ariete. Fuente [21]

Este fenómeno además de provocarse por el cierre de una válvula o compuerta, puede estar originado por el arranque o parada de una bomba y por la acumulación y movimiento de bolsas de aire en el interior de las propias tuberías.

El procedimiento para calcular la sobrepresión generada es el siguiente:

1. Se calcula la celeridad de la onda de presión

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + \frac{K}{E} * (Rd - 2)}} \quad (\text{ecu } 19)$$

Donde:

- $K = \text{Módulo de compresión del agua} = 2,06 * 10^4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
- $E = \text{Módulo de elasticidad del material de la tubería} \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$
- $Rd = \text{Relación de dimensiones} = \frac{\text{Diámetro exterior}}{\text{Espesor de pared mínimo}}$

2. Se calcula la sobrepresión máxima que puede aguantar la tubería a partir de esta expresión:

$$P_g = \frac{a * v}{g}$$

Donde:

- $v = \text{Velocidad del fluido} \left[\frac{m}{s} \right]$
- $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$

3. Se calcula la presión mínima de ruptura y se comprueba que esta sea menor que la sobrepresión máxima [Pg] calculada previamente.

Los cálculos se realizan en el apartado [Dimensionamiento de la obra civil](#).

4. Máquinas hidráulicas

El objetivo de este apartado es desarrollar el concepto de máquina hidráulica y su funcionamiento. Concretamente, se explicará en detalle la turbina hidráulica, siendo de vital importancia para posteriormente poder diseñar la instalación con el mejor criterio posible.

4.1 Clasificación

Aunque en este apartado se comienza presentando a las máquinas hidráulicas directamente, estas son un tipo de máquinas de fluidos, que se puede definir como un sistema mecánico que intercambia energía mecánica con el fluido que está contenido o que circula a través de él. A continuación, se expondrán los diferentes tipos de máquinas de fluidos siguiendo distintos criterios, para después entrar a explicar en detalle la máquina hidráulica.

Según el sentido de la transmisión de energía:

- Máquinas generadoras: Comunican energía mecánica al fluido, ejemplos de estas máquinas son: bombas, compresores, ventiladores o hélices. Este tipo de máquina consume energía mecánica, la cual es suministrada por un motor.
- Máquinas motoras: Este tipo de máquina extrae energía mecánica del fluido, como ocurre con las turbinas hidráulicas, turbinas de vapor o aeroturbinas.
- Máquinas reversibles: Pueden funcionar alternativamente como máquinas generadoras o motoras. Máquinas de este tipo son las usadas en las centrales reversibles, donde se cuenta con un grupo turbina-bomba.
- Máquinas transmisoras: Combinando una máquina motora y otra generadora son capaces de transmitir la energía entre dos sistemas mecánicos o dos fluidos. Se pueden ver en acoplamientos fluidos, convertidores de par, turbocompresores o transmisiones hidráulicas. Un esquema posible de funcionamiento de este tipo de máquina es el siguiente:

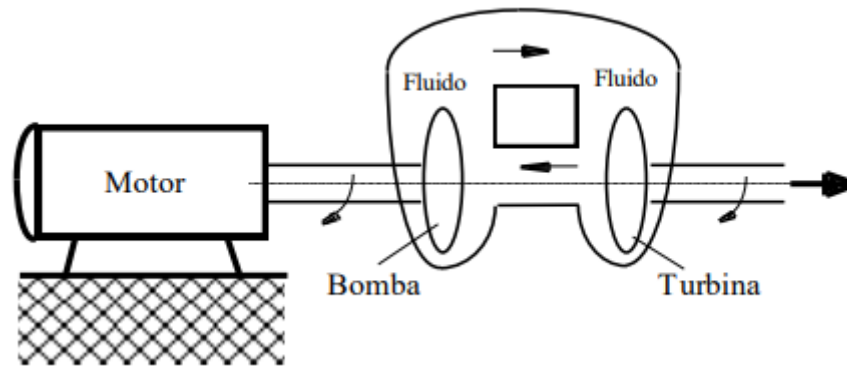


Ilustración 43: Esquema cualitativo de funcionamiento de una máquina transmisora. Fuente: [22]

Según la compresibilidad del fluido. Esta clasificación atiende a la modificación de la densidad del fluido al atravesar la máquina:

- **Máquina hidráulica:** El fluido es un líquido sin cambio de fase, o un gas en el que las diferencias de presión y los efectos térmicos al atravesar la máquina son despreciables.
- **Máquina térmica:** El líquido sufre un cambio de fase o el gas sufre cambios importantes de presión o temperatura, modificando de forma apreciable su densidad.

Según el principio de funcionamiento de la máquina:

- **Máquinas rotodinámicas o turbomáquinas:** Son las máquinas en las que se produce un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido la máquina a través de una pieza giratoria, llamada rodete o rotor. El funcionamiento de estas se explicará en detalle en el apartado *Turbomáquinas Hidráulicas*.
- **Máquinas de desplazamiento positivo o volumétricas.** El intercambio de energía se produce, mayoritariamente, en forma de presión mediante el paso del fluido a través de una cámara de trabajo, en la que entra y sale en un proceso alternativo. El órgano de trabajo es el elemento desplazador y no hay conexión simultánea a través del fluido entre la entrada y la salida. El intercambio de energía se da por la existencia de una fuerza entre el fluido y otros órganos móviles. Se puede hacer una subdivisión de este tipo de máquinas atendiendo a si es necesario la instalación de válvulas de admisión y expulsión:
 - Alternativas: Requieren este tipo de válvulas

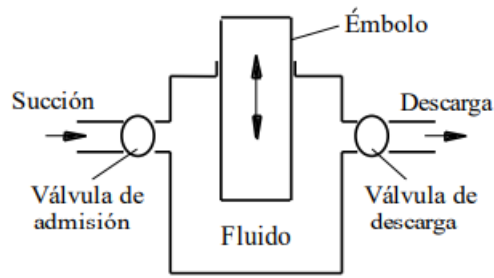


Ilustración 44: Máquina alternativa de émbolo. Fuente [22]

- Giratorias o rotativas: Su diseño evita la necesidad de la instalación de estas válvulas.

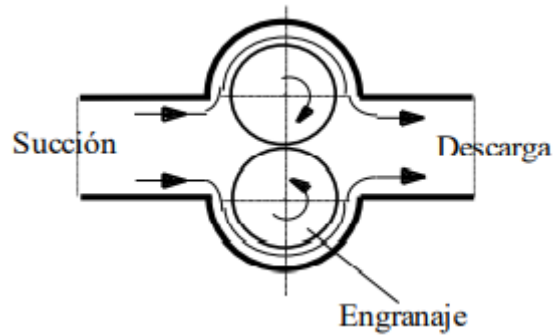


Ilustración 45: Máquina rotativa de engranajes. Fuente [22]

- Máquinas gravimétricas: Son aquellas cuyo intercambio de energía es mayoritariamente de tipo potencial gravitatorio. El ejemplo más representativo de este tipo de máquina es el tornillo de Arquímedes.



Ilustración 46: Tornillo de Arquímedes. Fuente [22]

4.2 Turbomáquinas hidráulicas

En primer lugar, no todas las turbomáquinas tienen los mismos elementos y no hay una serie de elementos fundamentales con los que deba contar, pero sí que existen partes con los que la gran mayoría de turbomáquinas cuentan. Este tipo de máquina puede tener una sola etapa, o varias dispuestas en serie. Cada etapa se puede dividir en un estátor (elemento fijo) y un rotor o rodete (elemento móvil). Este último es el elemento principal y es el único que es indispensable en toda turbomáquina hidráulica; aquí es donde se produce fundamentalmente el intercambio de energía entre la máquina y el fluido. Más adelante se realizará otra clasificación atendiendo a la dirección en la que el fluido atraviesa el rodete.

En el estator podemos distinguir varios componentes:

- **Distribuidor.** Es el elemento encargado de conducir el fluido hacia la sección de entrada del rodete en dirección y magnitud apropiadas. Dependiendo del tipo de máquina, este puede ser un simple conducto de aspiración o admisión, o un conjunto de álabes fijos pero regulables en orientación para así poder controlar el caudal.
- **Difusor.** Se encarga de recoger el fluido que sale del rodete y lo guía para que reduzca su energía cinética y recupere presión estática. Concretamente en turbinas, se le denomina tubo de aspiración.
- **Voluta.** Consiste en un canal de sección decreciente (turbinas) o creciente (bombas) que rodea al rodete, distribuyendo el fluido que sale del mismo en la periferia de las turbinas o recogiendo en caso de las bombas. Una denominación común en turbinas para este elemento es 'caja espiral' o 'caracol'.

Clasificación de las turbomáquinas según la dirección del flujo

- Máquinas radiales. La trayectoria de las partículas fluidas está contenida, principalmente, en planos perpendiculares al eje. Ejemplos de este tipo de máquinas son las bombas centrífugas(imagen) y las turbinas centrípetas.

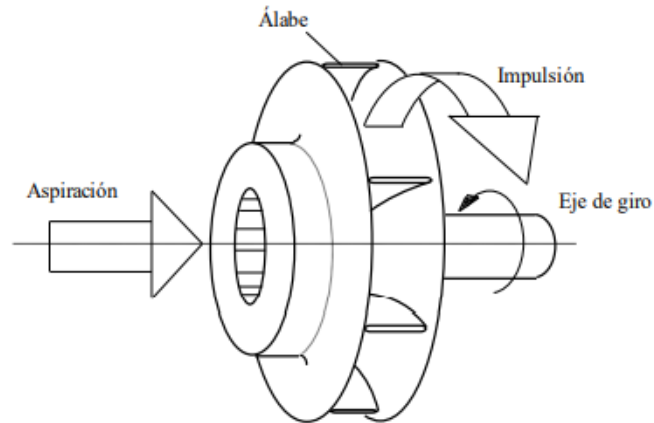


Ilustración 47: Máquina radial. Fuente [22]

- Máquinas axiales. Las líneas de corriente están contenidas en superficies de revolución paralelas al eje, es decir, cilíndricas.

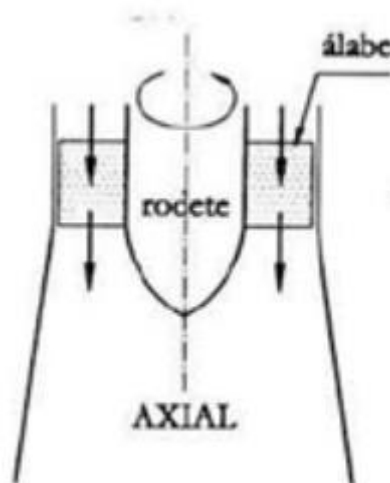


Ilustración 48: Máquina axial. Fuente [22]

- Máquinas mixtas o helicocentrífugas (bombas) o helicocentrípetas (turbinas). Las trayectorias están contenidas en superficies de revolución, al igual que las axiales, pero en este caso no son cilíndricas, acercándose o alejándose del eje a la vez que tienen una componente importante paralela a dicho eje.

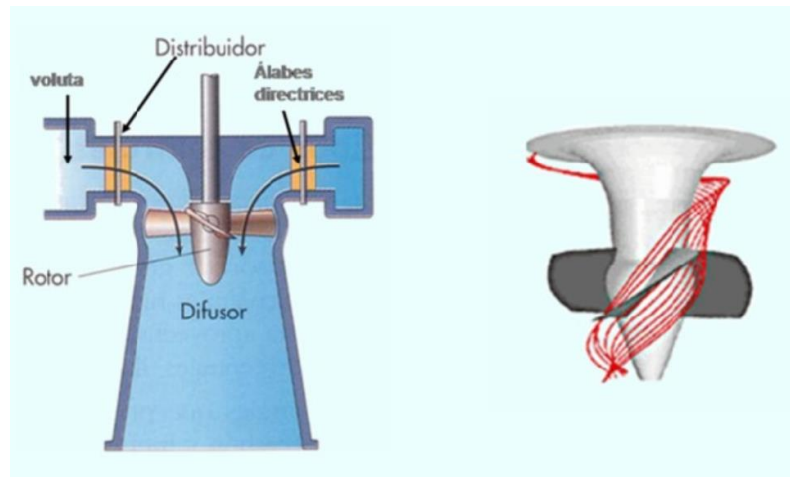


Ilustración 49: Máquina mixta. Fuente [23]

Tipos y denominaciones características de turbinas hidráulicas

Existe un criterio no expuesto anteriormente para la clasificación de las turbinas, pudiendo dividir las turbinas en turbinas de acción o impulso por un lado, y turbinas de reacción por otro.

- Turbinas de acción o impulso: En este tipo de turbinas no se produce variación de presión estática a través del rotor, no siendo necesario que el fluido llene todo el espacio entre álabes. Toda la caída de presión estática se sitúa en la tobera del inyector y el agua sólo incide sobre los sucesivos álabes en forma de uno o varios chorros discretos con gran energía cinética. La turbina más representativa de este tipo es la turbina Pelton, nombrada así en honor a Lester A. Pelton que fue quien la patentó.

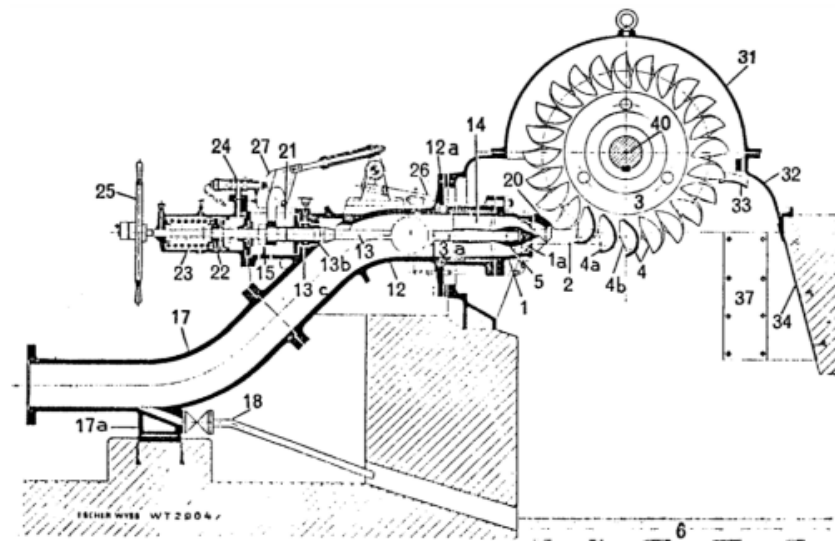
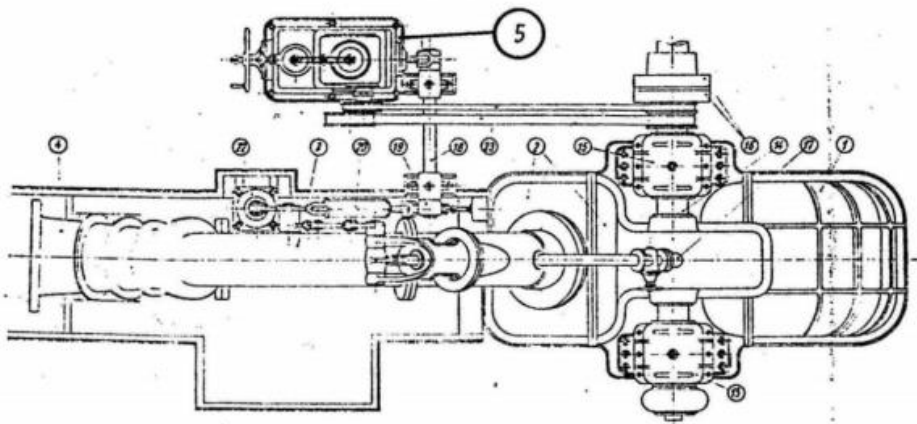
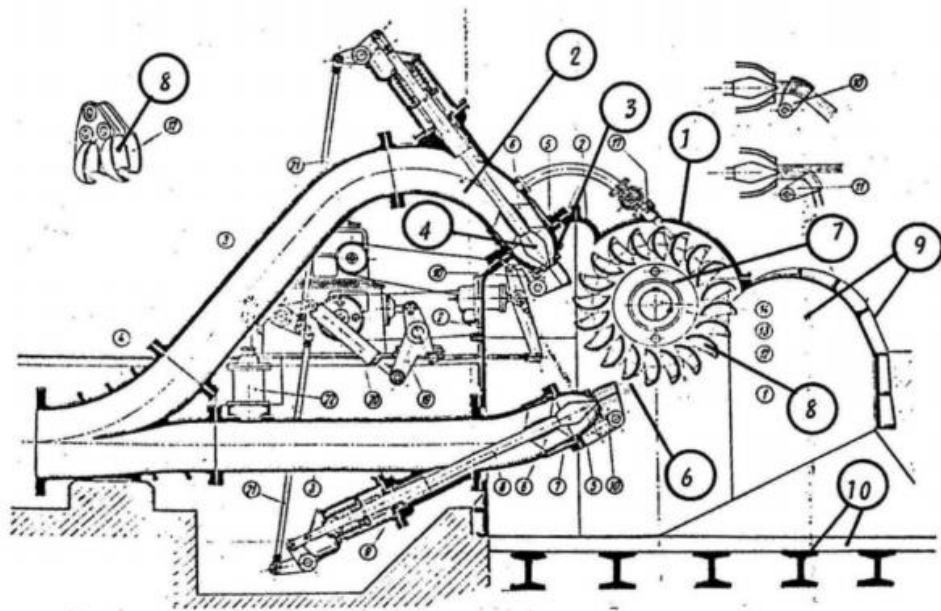
A continuación, se procede a enumerar diez de los elementos principales de este tipo de turbina. La enumeración hace referencia a la *ilustración 50*.

1. Carcasa. Cubierta, normalmente de acero, que evita que el agua salpique hacia los lados fuera de la turbina. Puede contar con ventanas transparentes para así poder visualizar la acción del chorro del inyector sobre la rueda
2. Inyector. Distribuidor de este tipo de turbina. Es donde se transforma la energía de presión del agua en energía cinética. Generalmente, está constituido por una tobera y una válvula de aguja.
3. Tobera. También denominado chiflón, es el elemento donde se contrae el chorro a la salida de la tubería
4. Válvula de aguja. Regula el gasto de salida mediante su apertura a través del desplazamiento de la aguja, controlada por un servomotor a base de presión de aceite.

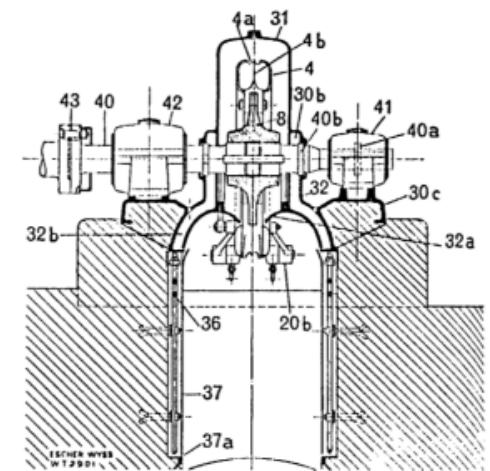
5. Servomotor. Corrige cualquier cambio en la frecuencia del sistema de acuerdo a las condiciones de demanda del gobernador
6. Chorro. Representa el flujo de agua que impacta en los álabes o cucharones impulsando así la turbina. Su diámetro en la descarga es importante en el diseño de estas turbinas.
7. Rodete. Consiste en una rueda motriz unida rígidamente al eje con un número de álabes o cucharones equidistantemente dispuestos en su periferia en dirección radial, generalmente el rodete suele contar con 15 o más álabes.
8. Álabes o cucharones. Pueden ser piezas independientes o constituir una pieza única. Su forma es similar a la de una doble cuchara, con una arista interior afilada y situada centralmente en dirección perpendicular hacia el eje, dividiendo el álabe en dos partes simétricas de gran concavidad. Cada álabe lleva en su extremo periférico una escotadura centrada en forma de W, con el objetivo de aprovechar al máximo el caudal y el impulso, consiguiendo que las cazoletas no reciban el chorro de agua hasta que su arista se encuentre en la posición perpendicular respecto al eje del chorro.
9. Blindaje. Se encarga de proteger la subestructura contra el efecto destructor del impacto del chorro desviado
10. Disipador de energía. Evita las erosiones en la subestructura y amortigua el impacto del agua antes del desfogue.

En este tipo de turbinas no hay tubo de aspiración, ya que la presión manométrica es nula y la descarga libre.

Nótese, que la [ilustración 50](#) y la [ilustración 51](#) tienen una enumeración de elementos diferente, correspondiéndose la lista de elementos que aparece en la [ilustración 51](#) exclusivamente a esta.



- 1 Tobera o chiflón
- 1a Pieza intermedia
- 1b Pieza de sujeción
- 1c Barrenados
- 1d Tapas de protección
- 2 Chorro de agua
- 3 Rodete
- 4 Alabes o cangilones
- 4a Escotadura de los álabes
- 4b Arista divisoria
- 5 Cabeza de la aguja
- 5a Punta de la aguja
- 5c Tornillo calibrado
- 5d Cuña
- 5e Cuerpo de la aguja
- 5f y 5g Agujeros cilíndricos para espigas
- 6 Nivel del desfogue
- D₁ Diámetro del rodete
- d₂ Diámetro del chorro (buscar fig complementaria o se quitan los números)
- 7 Solapas
- 8 Corona de rodete
- 8a Cubo del rodete
- 9 Bulones de fijación con tuercas
- 9a y cabezas de bulones
- 9b 10 Bulones tensores
- 11 Cuñas
- 12 Codo de entrada
- 12a Brida de sujeción
- 13 Vástago de la aguja
- 13a Camisa de bronce
- 13b Pistón de descarga
- 13c Guarnición de cuero
- 14 Cruceta de guía
- 14a Nervios de guía
- 14b Envolverte par los anteriores
- 15 Cónsola para el vástago de la aguja
- 16 Agujero de limpieza
- 17 Codo inferior
- 17a Soporte del codo inferior
- 18 Válvula y Tubería de desagüe
- 19 Válvula de la turbina
- 20 Desviador
- 20a Cuchilla del anterior
- 20b Palanca
- 21 Palanca de retorno
- 22 Pistón del servo-motor para la regulación de la aguja
- 23 Resorte de cierre para la aguja
- 24 Válvula de distribución para la aguja
- 25 Volante a mano para regulación de la aguja
- 26 Varilla del desviador
- 27 Rueda de levas
- 30 Caja
- 30a Orificio para el codo de entrada
- 30b Departamentos laterales
- 30c Soportes de los cojinetes fundidos en una sola pieza con la caja
- 31 Tapa de la caja
- 32 Parte inferior de la caja
- 32a Paredes de la guía
- 32b Canales de desagüe para salpicaduras en el eje de la turbina
- 33 Colector de salpicaduras
- 34 Blindaje
- 36 y 37 Serpentin de refrigeración y recubrimiento
- 37a Orificios para el desagüe del agua refrigerante
- 40 Eje de la turbina
- 40a Anillo de reborde
- 40b Anillo centrífugo
- 41 Cojinete exterior de la turbina
- 42 Cojinete interior de la turbina
- 43 Acoplamiento del eje
- 44 Regulador de velocidad
- 45 Volante



- 31 Tapa de la caja
- 32 Parte inferior de la caja
- 32a Paredes de la guía
- 32b Canales de desagüe para salpicaduras en el eje de la turbina
- 33 Colector de salpicaduras
- 34 Blindaje
- 36 y 37 Serpentin de refrigeración y recubrimiento
- 37a Orificios para el desagüe del agua refrigerante
- 40 Eje de la turbina
- 40a Anillo de reborde
- 40b Anillo centrífugo
- 41 Cojinete exterior de la turbina
- 42 Cojinete interior de la turbina
- 43 Acoplamiento del eje
- 44 Regulador de velocidad
- 45 Volante

Ilustración 50: Planos de una turbina Pelton con partes enumeradas (parte 1). Fuente:

[24]

Ilustración 51: Planos de una turbina Pelton con partes enumeradas (parte 2). Fuente:

[24]

Además de la turbina Pelton, que sin duda es la turbina de impulso más extendida, existen otros modelos de interés de este tipo de turbina como la turbina Michell Banki o la turbina Turgo.

- Turbina Michell-Banki. Esta turbina, también conocida como Ossberger, es de flujo cruzado, lo que quiere decir que el fluido impacta en los álabes de forma diagonal con el objetivo de obtener el mayor aprovechamiento de la energía posible. En este tipo de turbina la energía del agua es transferida al rotor en dos etapas, de las cuales la primera etapa entrega un promedio del 70 % de la energía total transferida al rotor y la segunda, alrededor del 30% restante.

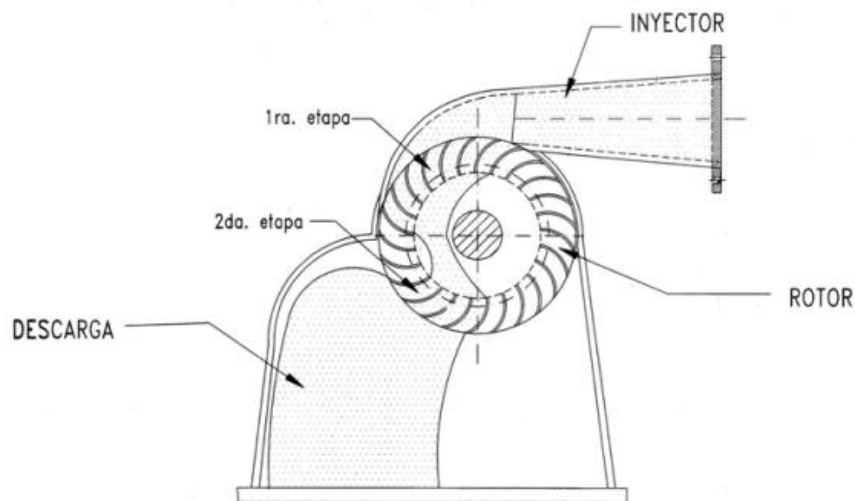


Ilustración 52: Esquema de turbina Michell-Banki. Fuente: [25]

Una característica atractiva de estas máquinas es la forma aplanada de su curva de rendimientos. Esto es posible lograrlo con lo que se denomina la admisión parcial, que consiste en dividir el rotor en tres partes iguales, pudiendo realizar la admisión de agua por 1/3, 2/3 o la totalidad del rodete. Este tipo de diseño, mostrado en la [ilustración 53](#) es el desarrollado por el mayor fabricante de este tipo de turbinas en la actualidad, Ossberger.

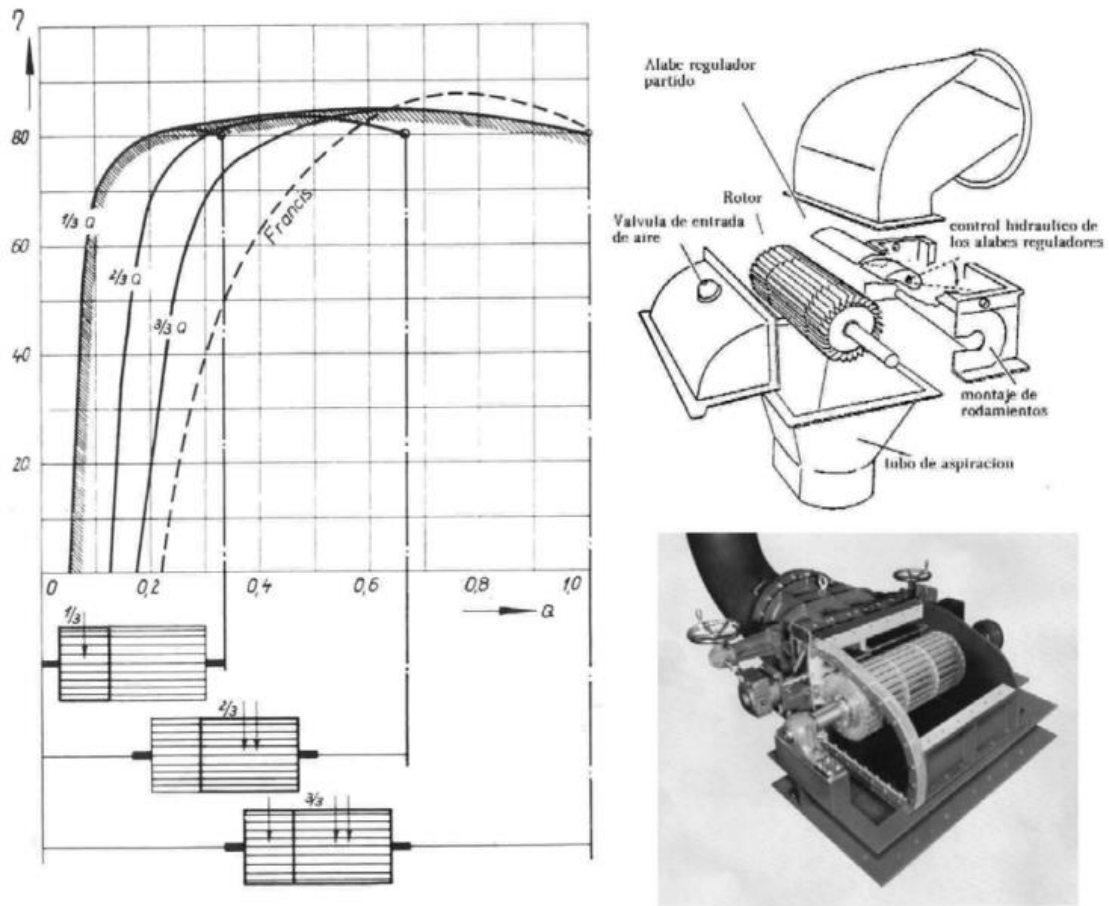


Ilustración 53: Diseño de turbina Ossberger y gráfica mostrando la admisión parcial y su rendimiento en función del caudal. Fuente [25]

- Turbina Turgo. El campo de aplicación de esta turbina se encuentra entre las turbina Francis, explicada más adelante, y la turbina Pelton. En esta turbina, a diferencia de la Pelton, el chorro de agua puede impactar en varios álabes simultáneamente. Las ventajas de esta turbina son que, el rodete es más barato de fabricar que el de una Pelton y su mantenimiento es más sencillo, además, al contar con una velocidad específica más elevada y poder manejar un mayor flujo para el mismo diámetro que una Pelton, el costo del generador y de la instalación generalmente es menor. Esto conlleva un rendimiento menor que las Pelton, aunque funcionan mejor ante un caudal variable.
- Turbinas de reacción. Se produce una caída de presión estática en el rodete, teniendo el líquido que llenar todo el canal entre álabes. Según la dirección del fluido podemos distinguir dos tipos.

- Turbinas radiales o Francis. Siendo en sus orígenes una turbina estrictamente de flujo radial, con bordes de entrada y salida paralelos al eje, hoy en día la mayor parte de los diseños son helicocéntricos (mixtos), teniendo en la salida del rotor componentes axiales y radiales de velocidad. A continuación, se muestra un esquema básico de esta turbina.

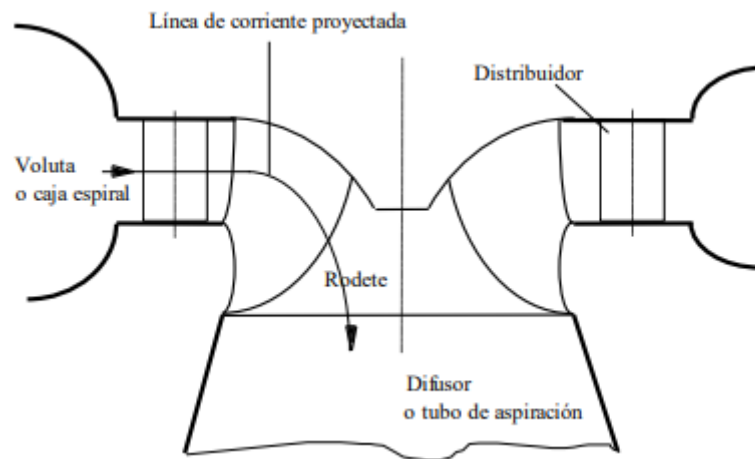


Ilustración 54: Esquema de turbina Francis. Fuente: [24]

- Turbinas axiales o Kaplan. En este tipo de turbina, el flujo es totalmente axial, pudiendo tener álabes fijos u orientables para regular la carga. Generalmente se emplean cuando el salto es muy pequeño. Dentro de las turbinas Kaplan existen, lo que se denomina, una turbina tubular, que es básicamente una turbina Kaplan sin voluta y colocada dentro de un conducto forzado. Este tipo de turbina presenta ventajas adicionales, como abaratar el coste de producción, disminuir el impacto ambiental y poder funcionar como máquinas reversibles.

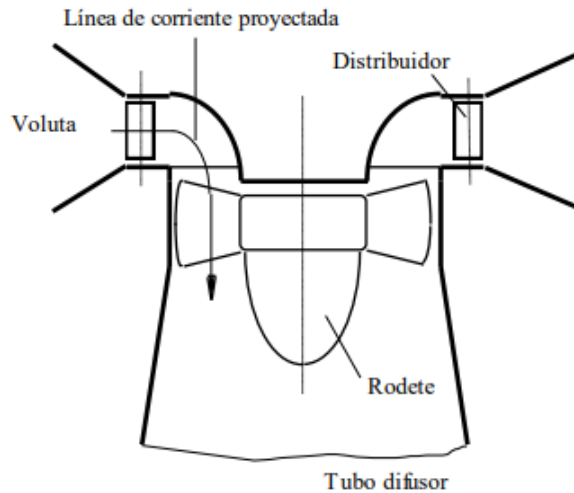


Ilustración 55: Esquema de turbina Kaplan. Fuente: [24]

A continuación, se va a proceder a enumerar cuatro de los principales elementos de las turbinas Francis y Kaplan de la misma forma que se hizo con la Pelton. La enumeración hace referencia a la [ilustración 56](#) y la [ilustración 57](#).

1. Carcasa o caracol. Su función principal es la de transformar la energía de presión en energía cinética y cubrir las partes internas de la turbina como el distribuidor y el rodete. Pueden tener pequeños álabes difusores o ser sólo tipo voluta.
2. Distribuidor. Junto con el difusor de la carcasa, los álabes móviles del distribuidor dirigen el agua al rodete con un mínimo de pérdidas, transformando la energía de presión en energía cinética. Según la demanda de potencia es posible aumentar o reducir el caudal de entrada al rodete gracias a la movilidad de los álabes del distribuidor.
3. Rodete. Como se ha dicho anteriormente, es el componente principal de la turbina, transformando la energía cinética en energía mecánica. Está acoplado al rotor del generador mediante la flecha, es decir, el eje que une el generador a la turbina.
4. Tubo de aspiración o succión. Es el elemento que se conecta a la salida de la turbina, iniciando en su parte final la conducción hacia la descarga o desfogue. Su nombre se debe a que crea una depresión a la salida del rodete teniendo dos funciones principales, recuperar la energía cinética del agua y transformar esta en energía de presión y posición, para conducir el gasto turbinado hacia el desfogue, el cual puede estar a pie de presa o en instalaciones subterráneas.

A continuación, se muestran los planos de una turbina Francis y una Kaplan respectivamente.

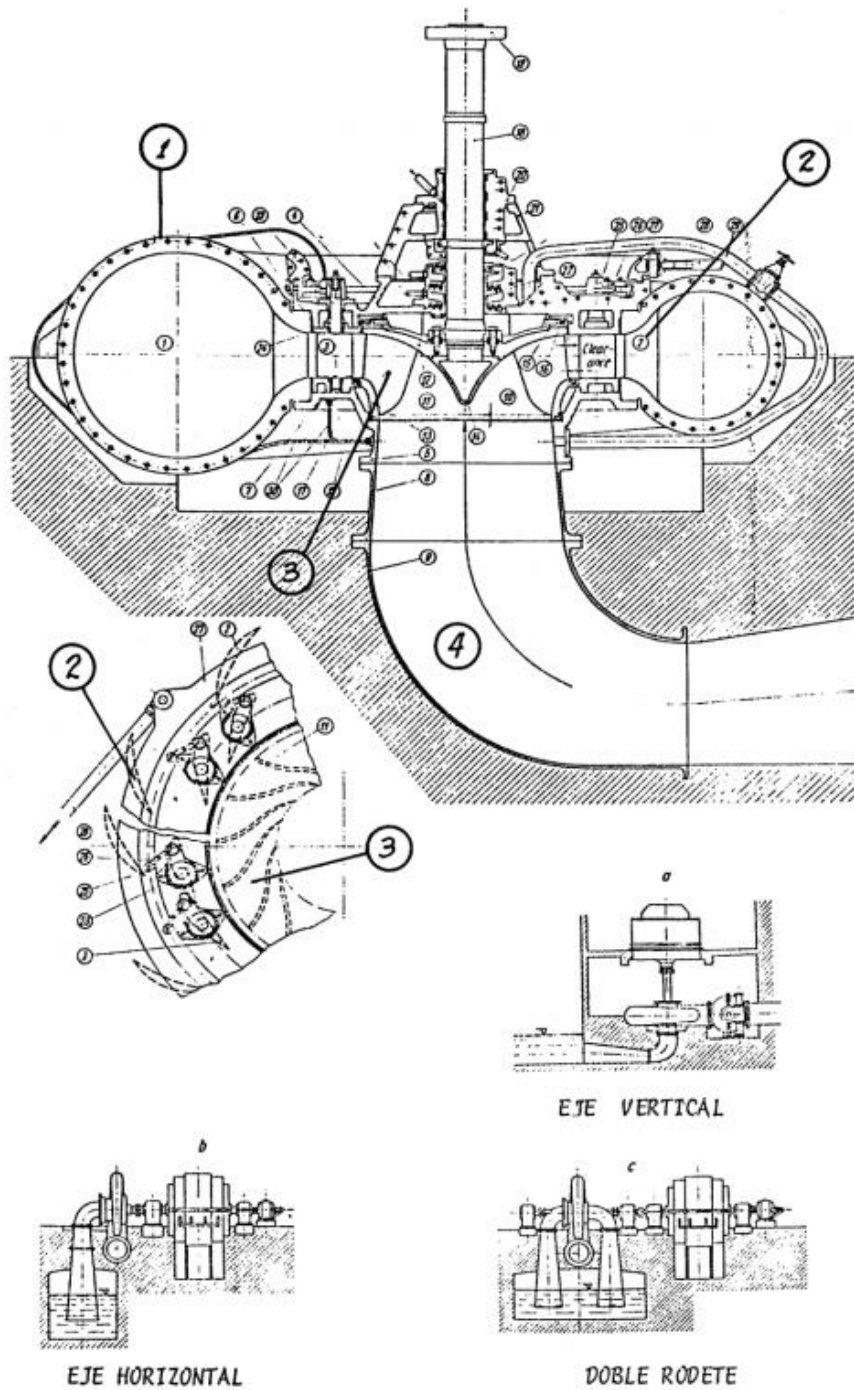


Ilustración 56: Planos de una turbina Francis. Fuente[24]

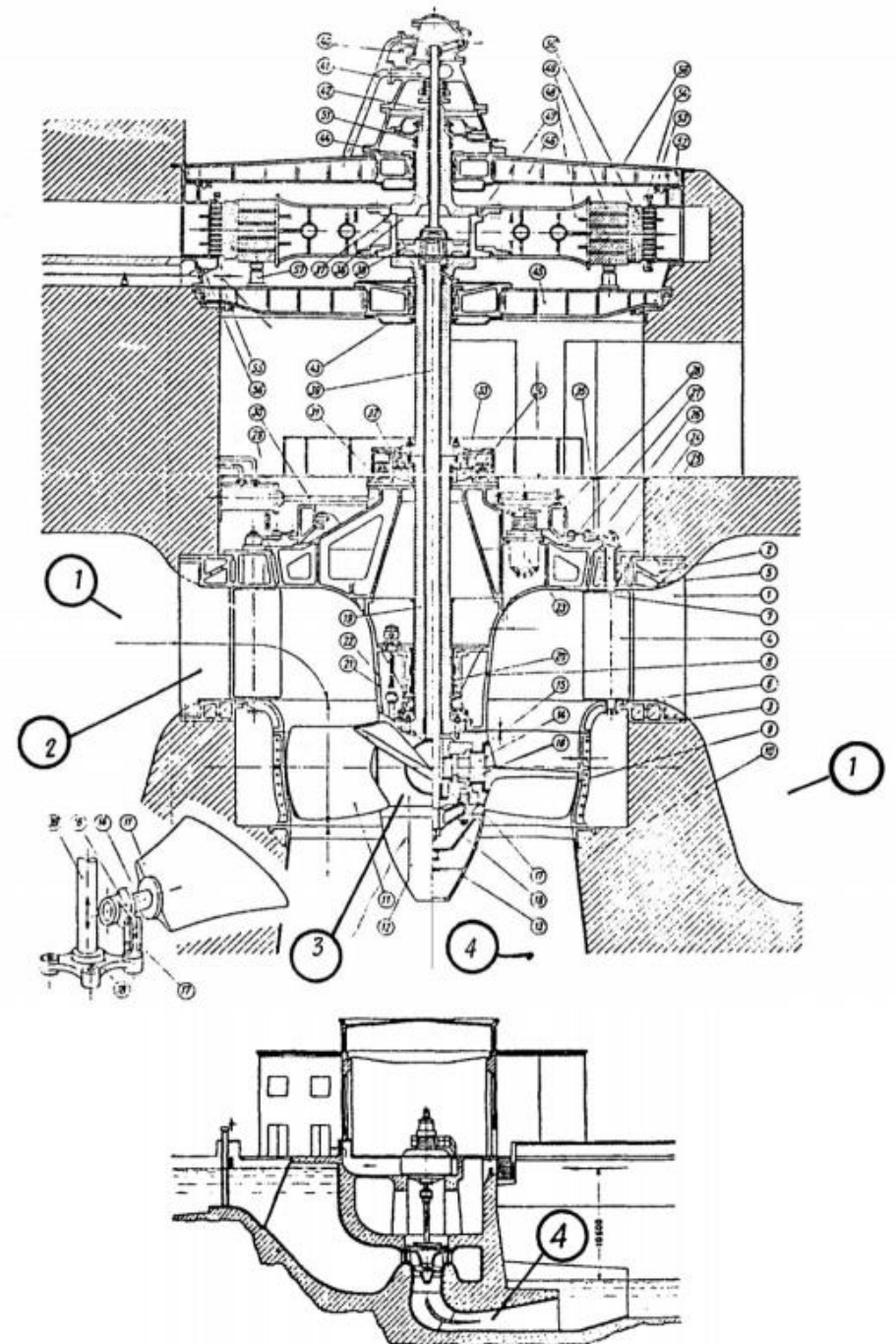


Ilustración 57: Planos de una turbina Kaplan. Fuente[24]

4.3 Ecuación de Euler y el triángulo de velocidades

En las turbinas, el intercambio de energía se obtiene por una acción mutua, acción-reacción, entre las paredes de los álabes y el fluido. La acción resultante del rodete sobre el fluido será una fuerza, cuyo valor podrá calcularse mediante el principio de la cantidad de movimiento. Calculada esta fuerza y su momento con relación al eje de la máquina, el cálculo de la energía que la máquina comunica al fluido es inmediato. De esta misma manera se obtiene la energía que el fluido comunica a la máquina en una turbina. La ecuación que expresa la energía por unidad de masa intercambiada en el rodete es la ecuación de Euler, esta ecuación es de tal importancia en el análisis de las turbomáquinas que recibe el nombre de ecuación fundamental.

En una turbomáquina, un fluido en movimiento atraviesa un rodete que también se mueve. Esto implica que, en cualquier punto de contacto entre el fluido y el rodete se puede hablar de tres velocidades: la velocidad absoluta del fluido [c], la velocidad relativa del fluido respecto al rodete [w], y la velocidad lineal del rodete [u]. Todas ellas se miden en $\left[\frac{m}{s}\right]$. Estas tres velocidades están relacionadas vectorialmente entre sí, con lo que se llama el triángulo de velocidades, resultando en la siguiente expresión.

$$\bar{c} = \bar{w} + \bar{u} \quad (\text{ecu 20})$$

Esta relación se puede ver gráficamente a continuación.

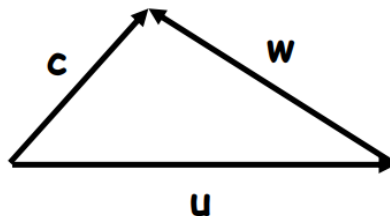


Ilustración 56: Triángulo de velocidades. Fuente: [26]

Aplicando esto al rodete de una turbomáquina, hay dos puntos a tener en cuenta, el punto de entrada del fluido al rodete, al cual se hará referencia con el subíndice 1, y el punto de salida del fluido del rodete, al cual se hará referencia con el subíndice 2.

En estos dos puntos se cumple el triángulo de velocidades, lo que, basándonos en la ecuación (ecu 20) resulta en:

$$\bar{c}_1 = \bar{w}_1 + \bar{u}_1 \quad (\text{ecu 21})$$

$$\bar{c}_2 = \bar{w}_2 + \bar{u}_2 \quad (\text{ecu 22})$$

A continuación, se muestra un rodete de una turbomáquina motora, siendo [1] la sección de entrada del fluido y [2] la sección de salida. ' ω ' representa la velocidad angular del rodete, expresada en $\left[\frac{rad}{s}\right]$. Sabiendo esta velocidad podría aplicarse la siguiente ecuación para conocer [u]: $u = \omega * r$, donde r es la posición radial del punto considerado, es decir la distancia del punto al eje del rodete, expresada en [m].

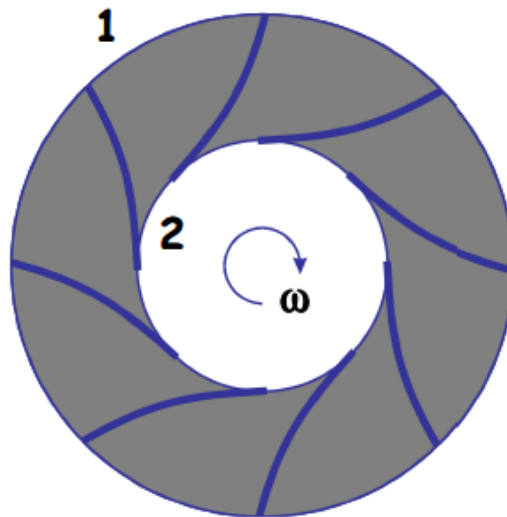


Ilustración 57: Rodete de turbomáquina motora girando a una velocidad ω . Fuente: [26]

Estas ecuaciones, (ecu 21) y (ecu 22), son válidas tanto para turbomáquinas motoras como generadoras, es decir, son válidas tanto para turbinas como para bombas, aunque en este caso nos centraremos en su aplicación para turbinas ya que es nuestro objeto de interés en el proyecto.

La dirección de [c₁] está definida por cómo se haya dispuesto el distribuidor, habiendo una cierta holgura entre este y el rodete.

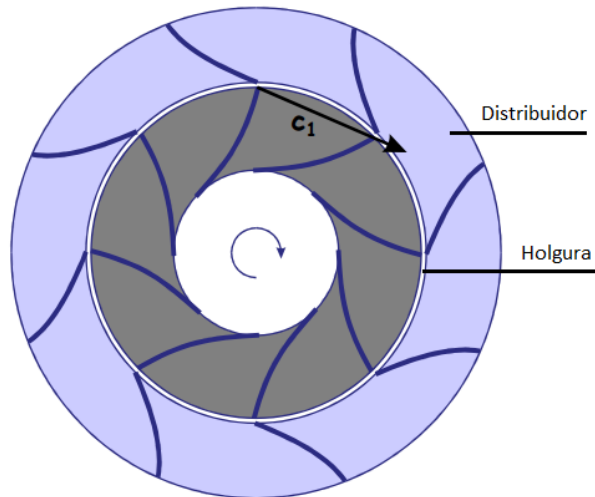


Ilustración 58: Rodete donde se representa el distribuidor y la holgura entre estos dos. Fuente [26]

Sobre el rodete, la velocidad tangencial a la entrada vendría dada por la siguiente expresión:

$$u_1 = \omega * r_1 \quad (\text{ecu 23})$$

Considerando esto, es posible representar el triángulo de velocidades de entrada al rodete. Para evitar pérdidas de energía por choques es conveniente procurar, en condiciones de diseño, que $[W]$ sea tangente al álabe del rodete.

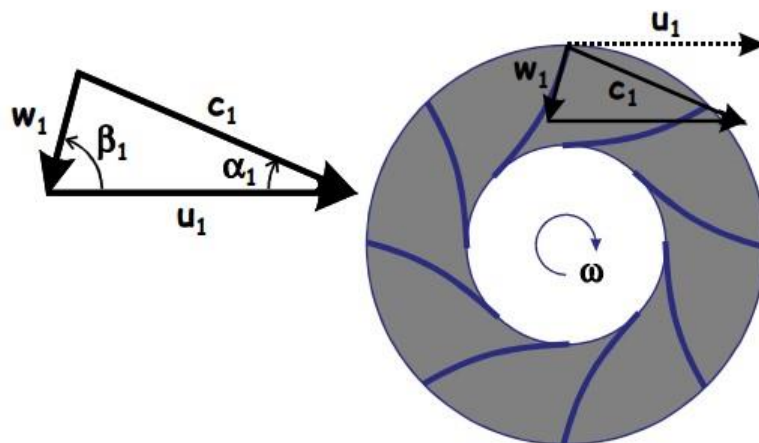


Ilustración 59: Triángulo de velocidades para la entrada. Fuente: [26]

De la misma forma que se ha hecho para la entrada [1], se procede a representar el triángulo de velocidades para el punto [2].

En primer lugar, al igual que para la entrada, la velocidad tangencial $[u_2]$ queda definida por:

$$u_2 = \omega * r_2 \quad (\text{ecu 24})$$

Estableciendo así una relación que se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad (\text{ecu 25})$$

Por otro lado, en este caso, la dirección de $[W_2]$ queda fijada por el ángulo de salida del álabe en el rodete, pudiendo así deducir el vector $[c_2]$ con el triángulo de velocidades.

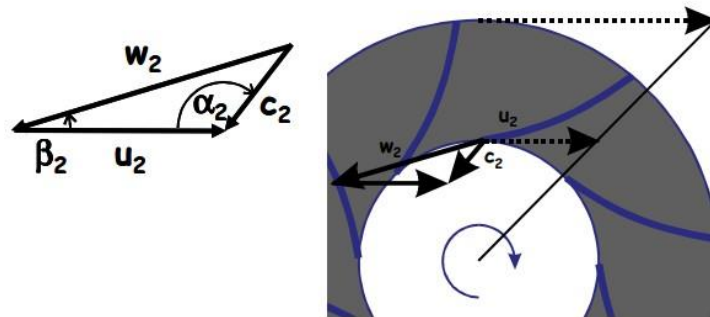


Ilustración 60: Triángulo de velocidades para la salida. Fuente: [26]

Como puede observarse, tanto para la entrada como para la salida se han definido dos ángulos $[\beta]$ y $[\alpha]$, con sus respectivos subíndices, siendo el ángulo $[\beta]$ el que forman los vectores $[u]$ y $[-W]$ y el ángulo $[\alpha]$ el que forman $[c]$ y $[u]$.

Tras haber entendido el triángulo de velocidades y definido las variables a tener en cuenta, se procederá a adaptar la ecuación de Euler a esta nomenclatura.

En el caso de las turbomáquinas la ecuación de Euler se puede definir como:

$$\bar{F} = p_1 * S_1 + p_2 * S_2 - \rho * Q * (\bar{c}_2 - \bar{c}_1) \quad (\text{ecu 26})$$

Donde:

- $F = \text{Fuerza ejercida por el fluido sobre el rodete [N]}$
- $S = \text{Sección del rodete [m}^2\text{]}$
- $p = \text{Presiones relativas en cada punto } \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$
- $Q = \text{Caudal } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$

- $\rho = \text{Volumen específico del fluido} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

En turbomáquinas, lo más habitual es hablar en términos de potencias, por lo que se procederá a relacionar la fuerza ejercida por el fluido con la potencia de propulsión, también conocida como potencia técnica [Pt].

$$Pt = \bar{F} * \bar{u} \quad (\text{ecu 27})$$

Combinando la ecuación (ecu 26) con la ecuación (ecu 27) y teniendo en cuenta como se han definido los ángulos anteriormente se puede concluir que:

$$Pt = \rho * Q * (c_1 * u_1 * \cos(\alpha_1) - c_2 * u_2 * \cos(\alpha_2)) \quad (\text{ecu 28})$$

También es conveniente definir el trabajo técnico y el par motor, ambos expresables a partir de las ecuaciones ya definidas.

$$Wt = \frac{Pt}{\rho * Q} = c_1 * u_1 * \cos(\alpha_1) - c_2 * u_2 * \cos(\alpha_2) \quad (\text{ecu 29})$$

El trabajo técnico, [Wt], representa el trabajo realizado por unidad de masa de fluido sobre el rodete, es decir, comunicado a la turbomáquina.

$$Mt = \frac{Pt}{\omega} = \rho * Q * (c_1 * r_1 * \cos(\alpha_1) - c_2 * r_2 * \cos(\alpha_2)) \quad (\text{ecu 30})$$

El par motor, [Mt], representa la variación del momento de la fuerza ejercida por el fluido entre la entrada y la salida del rodete. Este momento varía por la interacción entre el fluido y el sólido, manteniéndose constante en la holgura entre la salida del distribuidor y la entrada del rodete que se puede observar en la [ilustración 58](#).

Si queremos expresar la ecuación de Euler en unidades de altura de fluido, lo que puede ser de interés para el estudio de las turbomáquinas, sólo tendríamos que dividir por [g] la expresión del trabajo técnico como se ve a continuación.

$$Ht = \frac{Wt}{g} = \frac{c_1 * u_1 * \cos(\alpha_1) - c_2 * u_2 * \cos(\alpha_2)}{g} \quad (\text{ecu 31})$$

Es importante tener en cuenta que la deducción que se ha hecho de la ecuación de Euler considera que el rodete tiene un número infinito de álabes, ya que supone que no importa en que punto de la sección 1 entra el fluido ni en que punto de la sección 2 sale

el fluido del rodete, es decir, que el triángulo de velocidades de entrada es idéntico en cualquier punto de la sección de entrada y ocurre lo mismo con el triángulo de velocidades en la salida.

Además, es interesante realizar un análisis adicional sobre esta expresión. Para cualquier triángulo de velocidades se puede decir que:

$$w^2 = c^2 + u^2 - 2 * c * u * \cos \alpha \quad (\text{ecu 32})$$

Pudiendo así deducir estas dos ecuaciones.

$$c_1 * u_1 * \cos(\alpha_1) = \frac{c_1^2}{2} + \frac{u_1^2}{2} - \frac{W_1^2}{2} \quad (\text{ecu 33})$$

$$c_2 * u_2 * \cos(\alpha_2) = \frac{c_2^2}{2} + \frac{u_2^2}{2} - \frac{W_2^2}{2} \quad (\text{ecu 34})$$

Sustituyendo estas expresiones en la ecuación (ecu 29), se obtiene:

$$W_t = \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} \quad (\text{ecu 35})$$

Dado que interesa que [Wt] sea el máximo posible, se deduce que la turbina debe ser diseñada con mayor distancia radial de la sección de entrada que de la sección de salida: $r_1 \geq r_2$, esto implica a su vez que $u_1 \geq u_2$. Cabe decir, que en el caso de turbomáquinas axiales $r_1 = r_2$ y $u_1 = u_2$, ocurriendo esto normalmente en situaciones donde [Ht] es pequeño.

4.4 Velocidad específica

La velocidad específica es el número de revoluciones al que tendría que girar la turbina para, instalada en un salto de altura unitaria, entregar una potencia de un caballo. Este, generalmente, es uno de los principales criterios que se manejan a la hora de elegir el tipo de turbina a utilizar en una central. Se calcula con la siguiente expresión.

$$N_s = \frac{ne * \sqrt{P}}{Hn^{5/4}} \quad (\text{ecu 36})$$

Donde:

- $N_s = \text{Velocidad específica}$
- $P = \text{Potencia [KW]}$
- $H_n = \text{Salto neto [m]}$
- $n_e = \text{Velocidad de rotación óptima [rpm]}$

$$n_e = \frac{39,85 * \sqrt{H_n}}{D_e} \quad (\text{ecu 37})$$

Donde:

- $D_e = \text{Diámetro exterior del rodete [m]}$

Los valores de velocidad específica para los actuales tipos de turbinas más utilizados son los siguientes:

| Ns | Tipo de turbina | Altura del salto metros |
|---------------|-------------------------|-------------------------|
| Hasta 18 | Pelton con un inyector | 800 o más |
| De 18 a 25 | » un inyector | de 800 a 400 |
| De 26 a 35 | » un inyector | de 400 a 100 |
| De 26 a 35 | » dos inyectores | de 800 a 400 |
| De 36 a 50 | » dos inyectores | de 400 a 100 |
| De 51 a 72 | » cuatro inyectores | de 400 a 100 |
| De 55 a 70 | Francis lentísima | de 400 a 200 |
| De 70 a 120 | Francis lenta | de 200 a 100 |
| De 110 a 200 | Francis media | de 100 a 50 |
| De 200 a 300 | Francis veloz | de 50 a 25 |
| De 300 a 450 | Francis ultravelocísima | de 25 a 15 |
| De 400 a 500 | Hélice velocísima | hasta 15 |
| De 270 a 500 | Kaplan lenta | de 50 a 15 |
| De 500 a 800 | Kaplan veloz | de 15 a 5 |
| De 800 a 1100 | Kaplan velocísima | 5 |
| Más de 1100 | Bulbo | Menor de 5 |

Ilustración 61: Tabla mostrando la velocidad específica de diferentes tipos de turbina según el salto. Fuente [27]

Analizando la ecuación (ecu 36), se puede deducir que, a grandes alturas, para una velocidad y una potencia de salida dadas, se requiere una máquina de velocidad específica baja como una rueda de impulso. Sin embargo, una turbina de flujo axial con una alta velocidad específica, es la indicada para pequeñas alturas. En cambio, una turbina de impulso puede ser adecuada para una instalación de poca altura si el caudal

(o la potencia requerida) es pequeño, pero, a menudo, en estas condiciones el tamaño necesario de la rueda de impulso llega a ser exagerado. La conclusión es que este es un criterio para elegir el tipo de turbina bastante fiable, pero hay que analizar cuidadosamente cada situación.

Existe otra velocidad específica, calculada en función del caudal disponible para turbinar. Se calcula con la siguiente expresión:

$$Nq = \frac{ne * \sqrt{Q}}{Hn^{3/4}}$$

5. Datos y observaciones iniciales

5.1 Estimación de demanda energética

Para dimensionar la central hidroeléctrica es de vital importancia conocer las necesidades energéticas del poblado y establecer prioridades, tratando de cubrir, como mínimo, los elementos que sean fundamentales para el desarrollo y sustento de la comunidad.

Analizando la situación, se ha concluido que la finalidad principal de la microcentral hidroeléctrica será alimentar energéticamente a dos bombas de riego que, aproximadamente, consumirán unos 700W cada una. Existen otras necesidades, como pueden ser alimentar al colegio infantil o la clínica médica que se pretenden construir, siendo esto objeto de estudio de otros proyectos de Project Zimbabwe como pueden ser las placas fotovoltaicas que se quieren instalar.

Siendo la demanda estimada total de unos 1400W y considerando que habrá unas pérdidas por líneas de transporte eléctrico y transformadores de un 10%, la capacidad de esta instalación tendrá que ser de, como mínimo:

$$1400 * 1,1 = 1540 W$$

En apartados posteriores se dimensionará la instalación acorde a esta estimación.

Aunque la central este pensada en un principio para alimentar a las bombas de riego, en las épocas de lluvia habrá días en los que no será necesario el uso de las bombas ya que la propia lluvia se encargará de regar los cultivos. Por esto, se intentará diversificar la red eléctrica de la central, creando la posibilidad de dar energía a otras instalaciones como la clínica médica o el colegio.

A continuación, se muestra una imagen donde puede verse la zona donde quiere realizarse el proyecto.



Ilustración 62: Mapa de la zona donde se quiere llevar a cabo el proyecto. Fuente propia usando Google Earth pro

La instalación se tratará de construir lo más cerca posible de las zonas que se pretenda alimentar, siendo la zona de riego la azul rallada, el recuadro rojo la escuela infantil y el amarillo las viviendas y cocinas. La línea blanca que se puede ver en la parte inferior sería la tubería que llevaría el agua desde la presa a la casa de máquinas, a continuación, se explicará por qué se ha ubicado de tal forma.

5.2 Desnivel disponible

Otro aspecto clave a la hora de diseñar la instalación es el estudio de la zona para saber con que desnivel podemos contar, siendo esto fundamental para poder conocer el caudal necesario para generar la potencia deseada.

Al realizar la construcción en una zona con tan pocos recursos, no se tienen mapas detallados que nos indiquen las curvas de nivel, teniendo que recurrir al uso de software informático. En mi caso, he optado por utilizar Google Earth Pro y Global mapper, trazando un recorrido que sigue el curso del río aguas abajo de la presa, aprovechando así al máximo la inclinación del terreno.

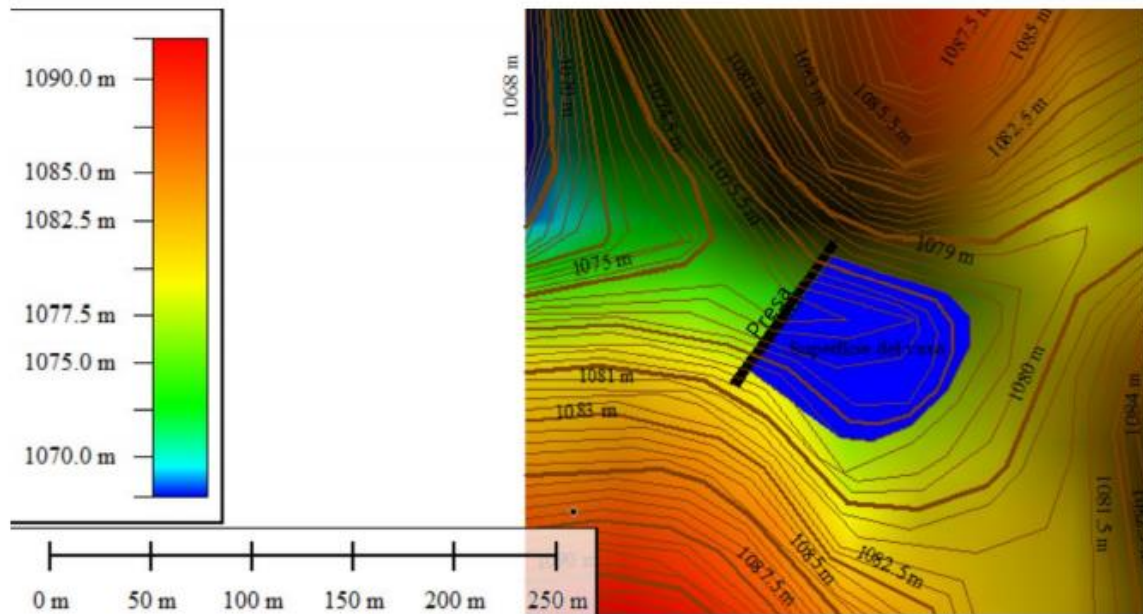


Ilustración 63: Mapa topográfico de la zona del proyecto. Fuente: Proyecto de reconstrucción de presa de Project Zimbabwe



Ilustración 64: Mapa donde se muestra la cota de la presa y el perfil de inclinación de la tubería forzada. Fuente propia

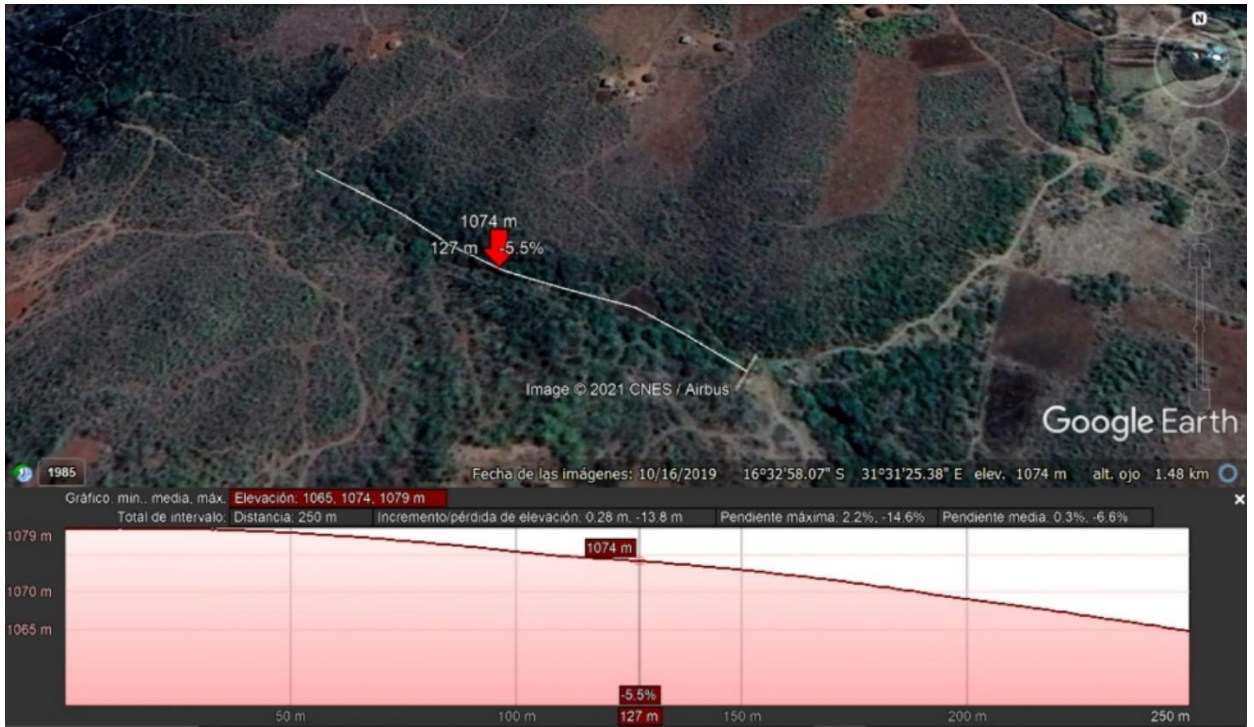


Ilustración 65: Mapa donde se muestra la cota del punto medio de la tubería forzada. Fuente propia



Ilustración 66: Mapa donde se muestra la cota del punto donde se construirá la casa de máquinas. Fuente propia

Como se puede observar, la inclinación del terreno no es muy pronunciada, necesitando avanzar unos 250 metros en horizontal para conseguir unos 14 metros de desnivel. Sabiendo esto, podemos deducir por el teorema de Pitágoras, (ecu 38), que necesitaremos una tubería de aproximadamente 250,4 metros para aprovechar los 14 metros de desnivel.

$$Longitud_{tubería} = \sqrt{250^2 + 14^2} = 250,4 \text{ metros} \quad (\text{ecu 38})$$

Se podría construir una tubería más larga consiguiendo así más desnivel, pero esto multiplicaría los costes, ya que no sólo necesitaríamos más metros de tubería, sino que nos alejaríamos cada vez más de la zona de riego, aumentando así los costes y las pérdidas de la línea eléctrica.

Además, habrá que tener en cuenta a la hora de la construcción del proyecto que estos datos no son del todo precisos, ya que si observamos el supuesto perfil transversal donde se va a construir la presa:

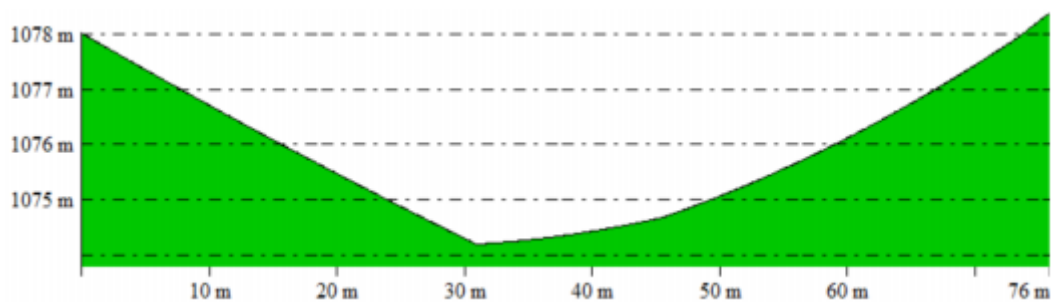


Ilustración 67: Perfil de la zona donde se construirá la presa. Fuente: Proyecto de reconstrucción de presa de Project Zimbabwe

Vemos que la cota, en este perfil obtenido mediante otro programa informático, es de unos 1075 metros, cuando en la [ilustración 64](#) nos indica que es de 1079 metros. Este margen de error de aproximadamente 4 metros se tendrá en cuenta para la elección del desnivel efectivo para la central.

5.3 Disponibilidad de agua

Será necesario conocer el nivel de agua del embalse en cada momento del año, ya que al haber épocas del año en las que la lluvia es casi inexistente, no será posible utilizar la central constantemente.

Analizando el proyecto de presa del alumno Juan García Montero, que se encarga de la reconstrucción de la presa, se ha extraído la siguiente información:

| Mes | Precipitaciones (m ³) | Capacidad máxima (m ³) | Llenado máximo (m ³) |
|------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Enero | 36 877,89 | 1716 | Sí |
| Febrero | 27 854,58 | 1716 | Sí |
| Marzo | 16 673,52 | 1716 | Sí |
| Abril | 2 550,07 | 1716 | Sí |
| Mayo | 392,32 | 1716 | No |
| Junio | 196,16 | 1716 | No |
| Julio | 196,16 | 1716 | No |
| Agosto | 0 | 1716 | No |
| Septiembre | 196,16 | 1716 | No |
| Octubre | 2 550,07 | 1716 | Sí |
| Noviembre | 12 161,86 | 1716 | Sí |
| Diciembre | 32 954,71 | 1716 | Sí |

Tabla 1: Tabla que muestra las precipitaciones y capacidad de la presa a construir. Fuente: Proyecto de reconstrucción de presa de Project Zimbabwe

Como se puede observar, desde Mayo hasta Septiembre, las precipitaciones mensuales son realmente escasas, siendo imposible la utilización de la central. Sin embargo, en el resto de meses las precipitaciones son mayores que la capacidad total del embalse, siendo esto un escenario idóneo para la utilización de la central, ya que se podrá aprovechar ese excedente de agua que el embalse no sería capaz de acumular.

Para los meses en los que la central no se pueda utilizar por el gasto de agua que conlleva, se construirá una instalación de placas solares cuyo proyecto también será llevado a cabo por Project Zimbabwe.

5.4 Conclusiones

Teniendo estos factores en cuenta, se diseñará una central hidráulica sin desarenador ni cámara de carga, ya que la propia presa cumple esas funciones y la construcción de estas edificaciones sólo aumentaría los costes y las pérdidas de carga de la central.

La instalación contará con una tubería forzada que transportará el agua desde la presa a la casa de máquinas. El acoplamiento de la tubería a la presa se realizará a unos 50 cm de altura desde la base de la presa, evitando así la acumulación de sedimentos en la entrada de la tubería. El motivo principal para esta elección en el diseño de la central, es la variabilidad del caudal disponible, ya que, si se realizará una obra de toma en la cima de la presa, habría muchas ocasiones en las que no se podría utilizar la instalación por no estar el embalse lleno. Además, en esta entrada, se instalará una rejilla filtradora y una válvula de compuerta manual para poder cortar el paso de agua a la tubería en caso de no querer utilizar la central.

La tubería se construirá lo más recta posible, evitando así giros innecesarios que producirían pérdidas de carga y aumentarían el coste de la instalación al tener que instalar anclajes costosos. Para proteger la tubería durante todo el año, y evitar posibles roturas, se instalará en zanja.

Se tratará de conseguir el mayor desnivel posible sin alejarse demasiado de la zona a abastecer, ya que esto podría suponer unos costes inasumibles para este proyecto. Teniendo en cuenta esto, se tratará de diversificar la línea de transporte de energía eléctrica, pudiendo así alimentar energéticamente a otras edificaciones cuando no sea necesario utilizar las bombas de riego.

A la entrada en la casa de máquinas, se instalará una válvula de mariposa manual para poder interrumpir y regular la entrada de agua en la turbina cuando se desee.

En cuanto a la turbina y el generador, al ser la potencia a instalar menor de 5KW, se optará por adquirir un grupo turbina-generador, siendo la opción más común y rentable para este tipo de centrales.

A continuación, se muestra un esquema cualitativo de la instalación, aunque la tubería forzada, en este caso, tendrá mucha más longitud de lo que se intuye en la imagen.

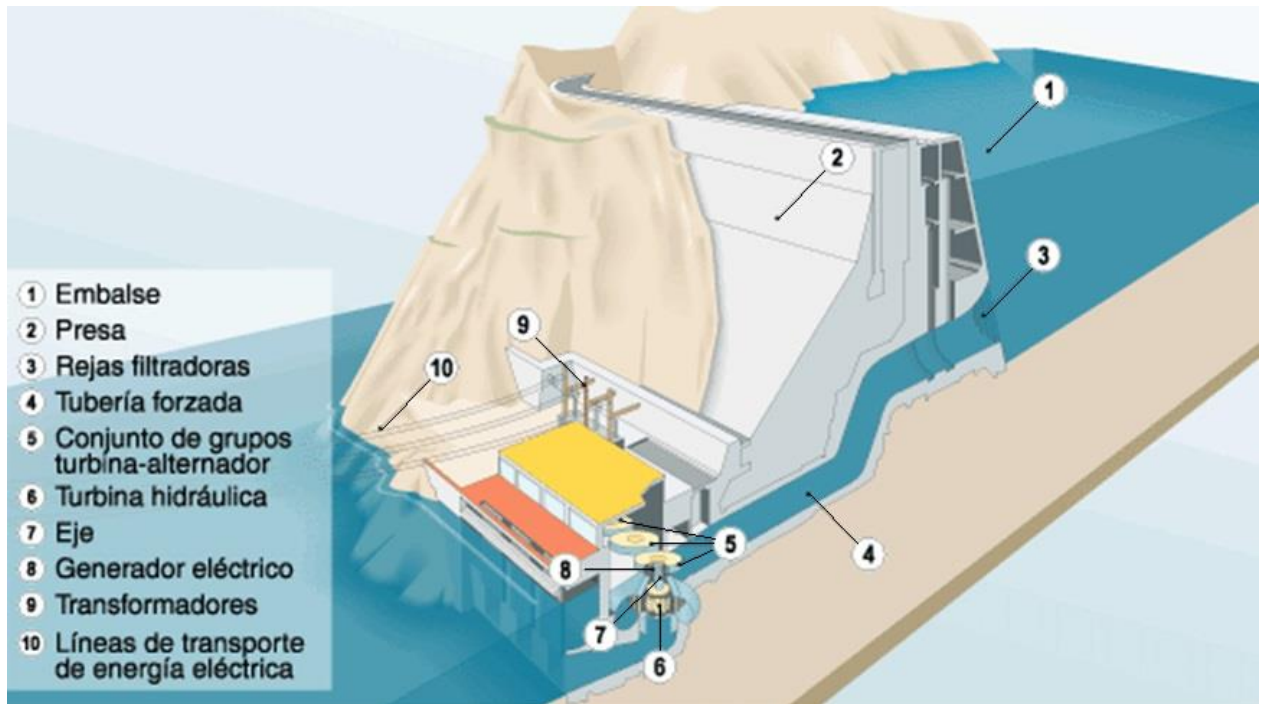


Ilustración 68: Esquema cualitativo de la instalación a construir. Fuente: [28]

6. Cálculos

6.1 Caudal de diseño

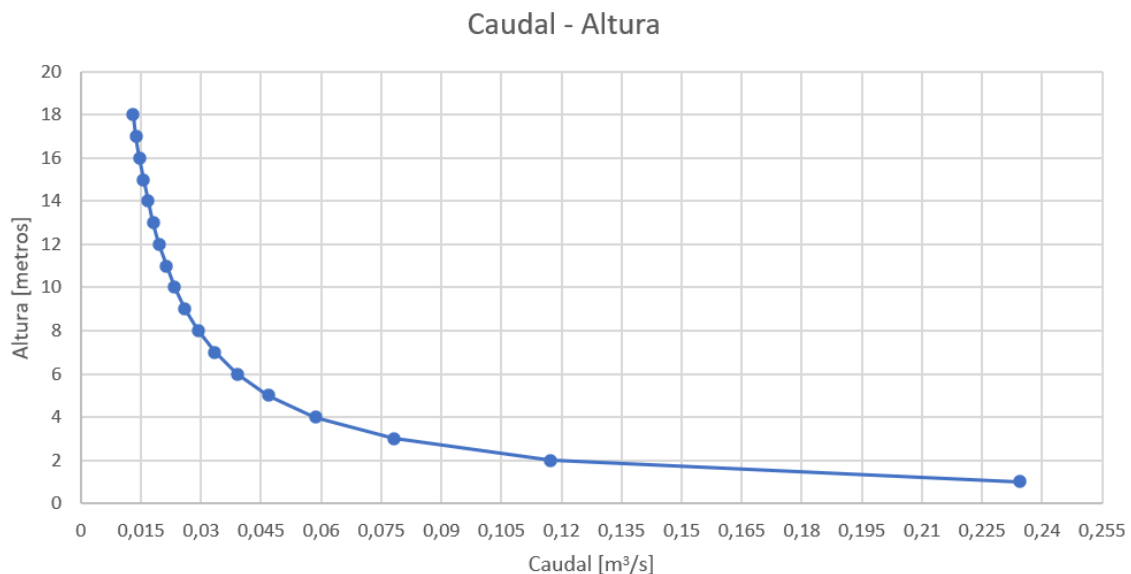
Como se explicó en el apartado *Potencia*, la ecuación (ecu 5) será la utilizada para calcular la capacidad de la central.

$$P = g * Q * Hn * e$$

Al saber que la demanda energética es de 1540 W, se adquirirá un grupo de 2KW, pudiendo así sustituir la variable [P] por un 2. El factor de eficiencia de la central, se estima en 0,87. Quedando:

$$2 = 9,81 * Q * Hn * 0,87 \quad (\text{ecu 39})$$

A partir de esto, se puede generar una gráfica que nos ayudará a visualizar gráficamente que caudal será necesario para conseguir la potencia requerida según la altura disponible.



Gráfica 3: Caudal necesario en función del salto disponible para generar 2KW de potencia.
Fuente propia

Como se puede ver, el incremento de altura en los primeros metros tiene un gran impacto en el caudal necesario para la utilización de la central, pasando a ser casi inapreciable a partir de los 14 metros, donde se pasa de necesitar un caudal de 0,0167 m3/s a 0,01562 m3/s con 15 metros.

Cómo se ha dicho anteriormente, se buscará poder contar con el máximo desnivel posible, para así poder generar la potencia necesaria con el mínimo caudal, pero teniendo en cuenta que el coste de la instalación es un factor clave de este proyecto. Por este motivo, se decide utilizar un salto de 14 metros, ya que los costes para conseguir más metros de desnivel no compensan la pequeña reducción de caudal que se obtiene a partir de ese punto.

Sustituyendo esta altura en la ecuación (ecu 39), se obtiene que:

$$2 = 9,81 * Q * 14 * 0,87$$

$$Q = 0,0167384 \pm 0,00251 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para este caudal de diseño se ha considerado un margen de error del 15%, ya que no se han tenido en cuenta las pérdidas de carga [H_p], por lo que realmente los 14 metros no es el salto neto con el que se contará (Consultar apartado [Salto hidráulico](#) para explicación).

Para posteriormente ser más precisos en los cálculos, se recalculará el caudal de diseño con la siguiente expresión:

$$2 = 9,81 * Q * (14 - H_p) * 0,87 \quad (\text{ecu 40})$$

Sabiendo el caudal aproximado necesario para generar los 2KW, se procede a calcular el volumen de agua necesario para conseguir que la central funcione de manera constante ocho horas diarias durante un mes completo, es decir, 30 días. Este cálculo se hace suponiendo un uso muy intensivo de la central, ya que principalmente su función será la de dar energía a las bombas de riego, las cuales no tendrán que funcionar 8 horas cada día.

$$Volumen_{\text{agua mensual}} = 0,0167384 * 60 * 60 * 8 * 30 = 14\,462 \text{ m}^3$$

Como se puede ver en la [tabla 1](#), el embalse tiene una capacidad de 1716 m³ de agua, haciendo esto que sea inviable utilizar la central hidroeléctrica durante todo el año. En caso de tener el embalse lleno y que no hubiera precipitaciones, sólo se le podría dar uso a la central, de forma muy intensiva, durante 3,5 días como se puede comprobar a continuación:

$$\frac{1716}{14\,462/30} = 3,5$$

6.2 Pérdidas de carga

Cómo se aclaró en el apartado *Conclusiones*, esta central sólo contará con una conducción, la tubería forzada. Se procede a calcular las pérdidas de carga de esta. Para ello, habrá que hacer un dimensionamiento básico de la tubería.

En primer lugar, se calcula el diámetro interior de la tubería con la ecuación de Bondschú.

$$Di = 1,27 * \frac{Q^{0,4268}}{(Hb + hs)^{0,1423}} \quad (\text{ecu 41})$$

Donde:

- $Hb = \text{Altura bruta [m]}$
- $Hs = \text{Altura sobrepresión por golpe de ariete} = 0,3 * Hb \text{ [m]}$

Sustituyendo en la ecuación (ecu 41):

$$Di = 1,27 * \frac{0,0167384^{0,4268}}{(14 + 4,2)^{0,1423}} = 1,27 * \frac{0,1745344}{1,51115} = 0,14668 \text{ m}$$

$$Di = 147 \text{ mm}$$

Sabiendo esto, se utilizará una tubería con un diámetro interior mínimo de 147 mm. Viendo la oferta de tuberías disponible, se opta por elegir un conducto con las siguientes características:

| Material | Diámetro [mm] | Espesor [mm] | Longitud [m] | Rugosidad [mm] |
|----------|---------------|--------------|--------------|----------------|
| PVC | 160 | 3,2 | 250,4 | 0,0015 |

Cálculo del diámetro interior: $Di = 160 - 2 * 3,2 = 153,6 \text{ mm}$

Calculamos la velocidad a la que pasará el agua a partir de la ecuación (ecu 4):

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * Di^2} = \frac{4 * 0,0167384}{\pi * 0,1536^2} = 0,9033 \text{ m/s}$$

Sabiendo esto, se procede a calcular las pérdidas primarias a partir de la ecuación (ecu 8):

$$H_l = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

El factor de fricción se hallará mediante el [diagrama de Moody](#), para lo que necesitamos calcular la rugosidad relativa y el número de Reynolds.

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{Di} = \frac{0,0015}{153,6} = 9,7656 * 10^{-6}$$

$$Re = \frac{\rho * v * Di}{\mu} = \frac{v * Di}{\nu} = \frac{0,8668 * 0,1536}{1,004 * 10^{-6}} = 1,3261004 * 10^5$$

Con la rugosidad relativa obtenida y el número de Reynolds calculados deducimos que el factor de fricción se encuentra entre 0,015 y 0,02. Para calcularlo con mayor precisión que trazando líneas en el diagrama, se ha utilizado este software informático, [link](#), con el que concluimos que el factor de fricción será: $f = 0,017$

Sustituyendo estos parámetros en la ecuación (ecu 8) se obtiene:

$$H_l = 0,017 * \frac{250,4}{0,1536} * \frac{0,8668^2}{2 * 9,81} = 1,0613m$$

Se procede a calcular las pérdidas secundarias.

Los elementos a tener en cuenta para el cálculo de estas pérdidas son los siguientes:

- Rejilla filtradora y válvula de compuerta a la entrada de la tubería forzada: $K=1,2$
- Acoplamiento de la tubería forzada a la presa: $K=0,04$
- Codos al inicio y final de la tubería forzada: $K= 0,05$
- Válvula de mariposa en la entrada del edificio de máquinas: $K=0,17$

Sustituyendo en la ecuación (ecu 17):

$$H_{s1} = \frac{1,2 * 0,8668^2}{2 * 9,81} = 0,46$$

$$H_{s2} = \frac{0,04 * 0,8668^2}{2 * 9,81} = 0,001532$$

$$H_{s3} = 2 * \frac{0,05 * 0,8668^2}{2 * 9,81} = 0,00383$$

$$H_{s4} = \frac{0,17 * 0,8668^2}{2 * 9,81} = 0,0065$$

$$H_s = 0,46 + 0,001532 + 0,00383 + 0,0065 = 0,472 \text{ m}$$

Pérdidas totales

Sustituyendo en la ecuación (ecu 18):

$$H_p = H_l + H_s = 1,0613 + 0,472 = 1,5333 \text{ m}$$

Con la ecuación (ecu 40) podemos afinar el cálculo del caudal de diseño de nuestra instalación

$$2 = 9,81 * Q * (14 - 1,5333) * 0,87$$

$$Q = 0.018797$$

Se comprueba que, efectivamente, el caudal calculado teniendo en cuenta las pérdidas de carga no es mayor que el esperado teniendo en cuenta el margen de error del 15%, por lo que el único cálculo que se volverá a hacer para ser más preciso en los cálculos posteriores será la velocidad del fluido mediante la siguiente expresión:

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * Di^2} = \frac{4 * 0,018797}{\pi * 0,1536^2} = 1,01 \text{ m/s}$$

6.3 Dimensionamiento y selección de la turbina hidráulica

Con los datos obtenidos se procede a elegir la turbina para la instalación, siendo esto clave para obtener la máxima eficiencia en la generación.

Número óptimo de revoluciones

Lo calculamos con la ecuación (ecu 37):

$$n_e = \frac{39,85 * \sqrt{Hn}}{De} = \frac{39,85 * \sqrt{12,467}}{0,125} = 1125,64 \text{ rpm}$$

El diámetro del rodete se ha supuesto como 125 mm, siendo este un valor común en turbinas que operan en condiciones similares a las estudiadas en este proyecto.

Velocidad específica

Como se vio en el apartado [Velocidad específica](#), este parámetro se puede calcular en función de la potencia a generar o del caudal de diseño. Se calculará de las dos formas a continuación.

En función de la potencia:

$$Ns = \frac{ne * \sqrt{P}}{Hn^{5/4}} = \frac{1125,64 * \sqrt{2}}{12,467^{5/4}} = 67,954 \approx 68$$

En función del caudal:

$$Nq = \frac{ne * \sqrt{Q}}{Hn^{3/4}} = \frac{1125,64 * \sqrt{0,018797}}{12,467^{3/4}} = 23,26 \approx 23$$

Sabiendo esto, acudimos a la siguiente tabla para seleccionar los candidatos posibles:

| Tipo de turbina | Ns | Nq |
|--------------------------|------------|-----------|
| Pelton de 1 tobera | Hasta 30 | Hasta 9 |
| Pelton de 2 toberas | 14 – 42 | 4 – 13 |
| Pelton de 3 toberas | 17 – 73 | 5 – 23 |
| Michell-Banki, Ossberger | 59 – 165 | 18 – 50 |
| Turgo | 50 – 250 | 18 – 38 |
| Francis normal | 125 – 225 | 38 – 68 |
| Francis rápida | 225 – 450 | 68 – 135 |
| Axial | 350 – 1000 | 105 – 300 |

Tabla 2: Tabla de tipos de turbina en función de su velocidad específica, según potencia instalada y caudal. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE

Se ha subrayado con color verde las turbinas que cumplen las condiciones establecidas. Para elegir el tipo de turbina a utilizar, se procede a enumerar las ventajas y desventajas de cada una.

Algunas de las principales **ventajas** son las siguientes:

- Turgo:
 - ✓ El rodete es más barato de fabricar que el de una turbina Pelton
 - ✓ No necesita una carcasa hermética
 - ✓ Permite caudales mayores en los inyectores, reduciéndose el número de inyectores necesarios respecto otras turbinas, simplificando además el sistema de control de velocidad.

- Michell-Banki/Ossberger:
 - ✓ Diseñada especialmente para la pequeña hidroeléctrica
 - ✓ Maneja caudales variables de forma muy eficiente, permitiéndole trabajar, normalmente, en un rango desde $\frac{1}{6}$ de la carga máxima hasta el 100%
 - ✓ Reducido coste de fabricación
 - ✓ Reparaciones y mantenimiento sencillos

- Turbina Pelton de 3 toberas:
 - ✓ Alta disponibilidad
 - ✓ Eficiente en saltos de gran altura y pequeño caudal
 - ✓ Reparaciones sencillas
 - ✓ Menos peligro de erosión en los álabes
 - ✓ Mantenimiento sencillo

Desventajas:

- Turgo:
 - En general, teniendo en cuenta la instalación y mantenimiento, son turbinas caras
 - Están pensadas para usarse en saltos medios, no siendo este nuestro caso

- Michell-Banki/Ossberger:
 - La eficiencia máxima es algo menor que la de una turbina Francis o Pelton equivalente

- Pelton de 3 toberas:
 - Necesita una altura de unos 20 metros para su funcionamiento
 - Alto coste de instalación

Se optará por la utilización de una turbina Michell Banki / Ossberger, ya que es una turbina especialmente diseñada para microcentrales hidroeléctricas y, además, tiene la

capacidad de manejar caudales variables de forma muy eficiente, lo que la hace ideal para este proyecto.

En la propia página web del mayor fabricante de este tipo de turbinas, Ossberger, se pueden observar varios proyectos de referencia, entre los que se encuentra uno realizado en Chile con características similares a este.



Ilustración 69: Captura de un proyecto de referencia en Chile obtenida en la página web de Ossberger. Fuente: [29]

Basándonos en lo explicado en el apartado [Ecuación de Euler y triángulo de velocidades](#), se realizará el diseño hidráulico de la turbina. En este caso, para hacer referencia a los parámetros en la superficie del rodete se utilizará el subíndice 2, mientras que para hacer referencia a los parámetros en el interior del rodete se utilizará en el subíndice 1. Esto se refleja gráficamente en la siguiente ilustración:

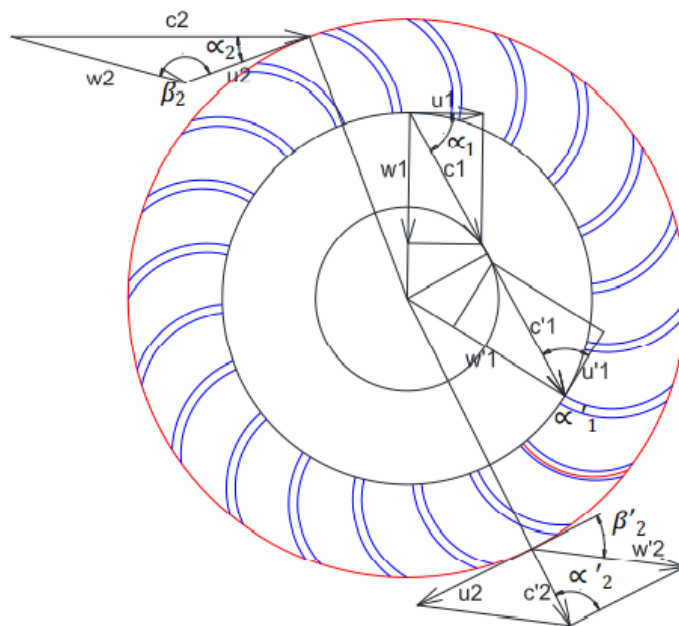


Ilustración 70: Triángulos de velocidades en turbina Banki-Michell. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE

El valor de estos parámetros para el tipo de turbina elegido se obtiene a partir de estas expresiones que han sido calculadas a partir de ensayos prácticos:

$$C_2 = 4,34 * \sqrt{Hn} = 4,34 * \sqrt{12,467} = 15,324 \text{ m/s}$$

$$U_2 = 2,09 * \sqrt{Hn} = 2,09 * \sqrt{12,467} = 7,38 \text{ m/s}$$

$$W_2 = 2,4 * \sqrt{Hn} = 2,4 * \sqrt{12,467} = 8,474 \text{ m/s}$$

$$W'_2 = 2,35 * \sqrt{Hn} = 2,35 * \sqrt{12,467} = 8,3 \text{ m/s}$$

$$C'_2 = 1,2 * \sqrt{Hn} = 1,2 * \sqrt{12,467} = 4,237 \text{ m/s}$$

$$\alpha_2 = 16^\circ$$

$$\alpha'_2 = 92,5^\circ$$

$$\beta'_2 = 30^\circ$$

$$\beta_1 = 90^\circ$$

Para obtener la eficiencia hidráulica de la turbina, se aplica la siguiente ecuación:

$$\eta_h = 2 * k_c^2 * \cos^2(\alpha_2) * K_u * (1 - K_u) * (1 + K_f)$$

$$\eta_h = 2 * 0,976^2 * \cos^2(16) * 0,5 * (1 - 0,5) * 1 + 0,98$$

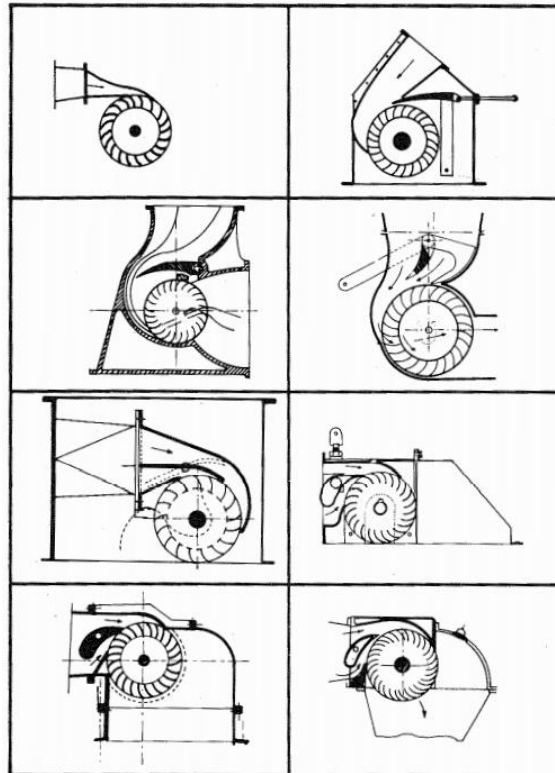
$$\eta_h = 0,871$$

Para este cálculo se han tomado valores de las variables [kc], [ku] y [kf] típicos en este tipo de turbinas.

Este es un valor aproximado del que obtendremos finalmente, el cual vendrá determinado por el fabricante.

Geometría del inyector con álabe directriz

Se conocen diferentes geometrías de inyector para este tipo de turbina, varias de ellas se muestran en la [ilustración 71](#). Se puede apreciar como algunas poseen un álabe de compuerta, otras un álabe directriz con diferentes geometrías y en algunos casos se diseña el inyector sin álabe de regulación. También se diseñan inyectores con uno o dos compartimentos con el objeto de mejorar la eficiencia de la turbina cuando opera con cargas parciales, como es el caso de la turbina fabricada por Ossberger. En la [ilustración 53](#) se puede observar la variación de la eficiencia de la turbina de acuerdo al número de compartimentos y el caudal turbinado.



PERFILES DE INYECTORES PARA
TURBINAS MICHELL BANKI

Ilustración 71: Perfiles de inyectores para turbinas Michell-Banki. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE

Cabe recordar, que la función del inyector es regular y acelerar el flujo de agua que ingresa a la turbina, además de orientarlo con un ángulo determinado hacia los álabes del rodete. El inyector diseñado en este caso, cuenta con un álabe directriz, como se puede observar en la [ilustración 72](#), que se encarga de regular y garantizar la conducción del flujo deseado de agua para diferentes cargas de operación.

Cuando se define una geometría de inyector con álabe directriz, se requiere definir el perfil del mismo, considerando un balance de pérdidas de presión en los flujos de agua en que se divide el caudal por efecto del álabe. De tal forma que al tener igualadas ambas pérdidas, se obtenga la misma velocidad de salida en ambos conductos.

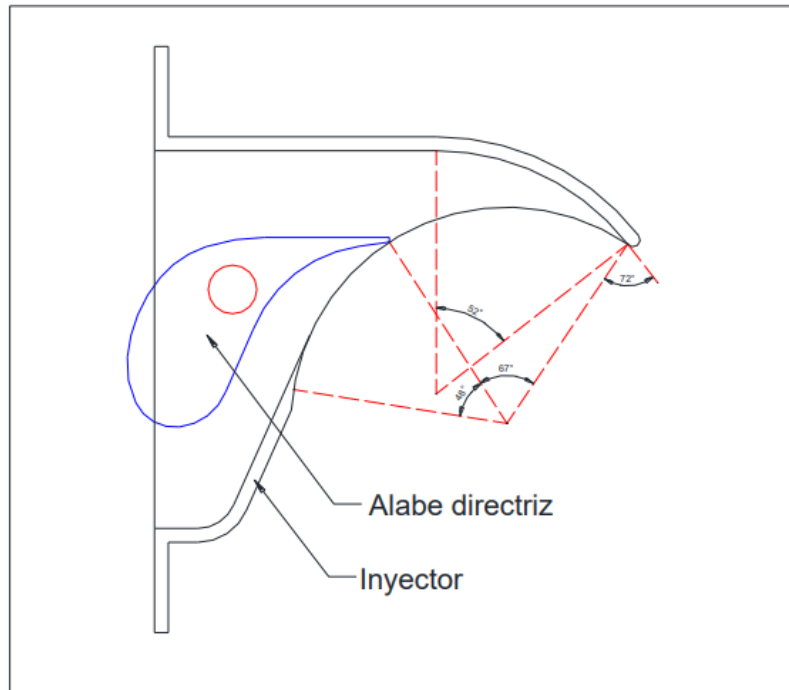


Ilustración 72: Plano del inyector y álabes directrices a diseñar. Fuente propia

La única dimensión que varía en función del salto y el caudal con que se diseña la turbina es el ancho del inyector, el cual se calcula con la expresión mostrada a continuación:

$$B = \frac{0,96 * Q}{De * \sqrt{Hn}} = \frac{0,96 * 0,018797}{De * \sqrt{12,467}} \quad \text{(ecu 42)}$$

[De], que hace referencia al diámetro exterior del rodete, es un parámetro a elegir. Se tomarán tres valores comunes en este tipo de turbinas para elegir un ancho de inyector conveniente. El criterio a seguir para su elección será la facilidad para su fabricación, es decir, se elegirá el mayor tamaño de [B] posible.

A partir de la ecuación (ecu 42), se obtiene la siguiente tabla:

| | Diámetro exterior del rodete 'De' [mm] | | |
|-----------------------------|--|-------|-------|
| | 125 | 200 | 300 |
| Ancho del inyector 'B' [cm] | 4,09 | 2,555 | 1,704 |

Por el criterio mencionado se escogerá: $De = 125\text{mm}$, lo que resultaría en:

$$B = 4,09 \text{ cm}$$

Las dimensiones del perfil del inyector y del álabe directriz para diferentes diámetros del rodete se muestran en la [Tabla 3](#) y se han representado gráficamente en la [ilustración 73](#).

| COTA (mm) | DIAMETRO DE RODETE - D_e (mm) | | | |
|------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|
| | 300 | 400 | 500 | 600 |
| A | 261 | 348 | 435 | 522 |
| B | 195 | 260 | 325 | 390 |
| C | 31 | 41 | 52 | 62 |
| D | 102 | 136 | 170 | 204 |
| a | 85 | 113 | 142 | 170 |
| b | 55 | 73 | 92 | 110 |
| R _I | 168 | 224 | 280 | 336 |
| R _{II} | 151 | 201 | 252 | 302 |
| R _{III} | 28 | 37 | 47 | 56 |
| R ₁ | 94 | 125 | 157 | 188 |
| R ₂ | 39 | 52 | 65 | 78 |
| R ₃ | 31 | 41 | 52 | 62 |
| R ₄ | 60 | 80 | 100 | 120 |
| R ₅ | 100 | 133 | 167 | 200 |
| R ₆ | 70 | 93 | 117 | 140 |
| R ₇ | 133 | 177 | 222 | 266 |
| x | 35 | 47 | 58 | 70 |
| y | 116 | 155 | 193 | 232 |
| ρ_1 | 51 | 68 | 85 | 102 |
| ρ_2 | 98 | 131 | 163 | 196 |
| ρ_3 | 20 | 27 | 33 | 40 |

Tabla 3: Cotas para el diseño del álabe directriz en función del diámetro del rodete. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE

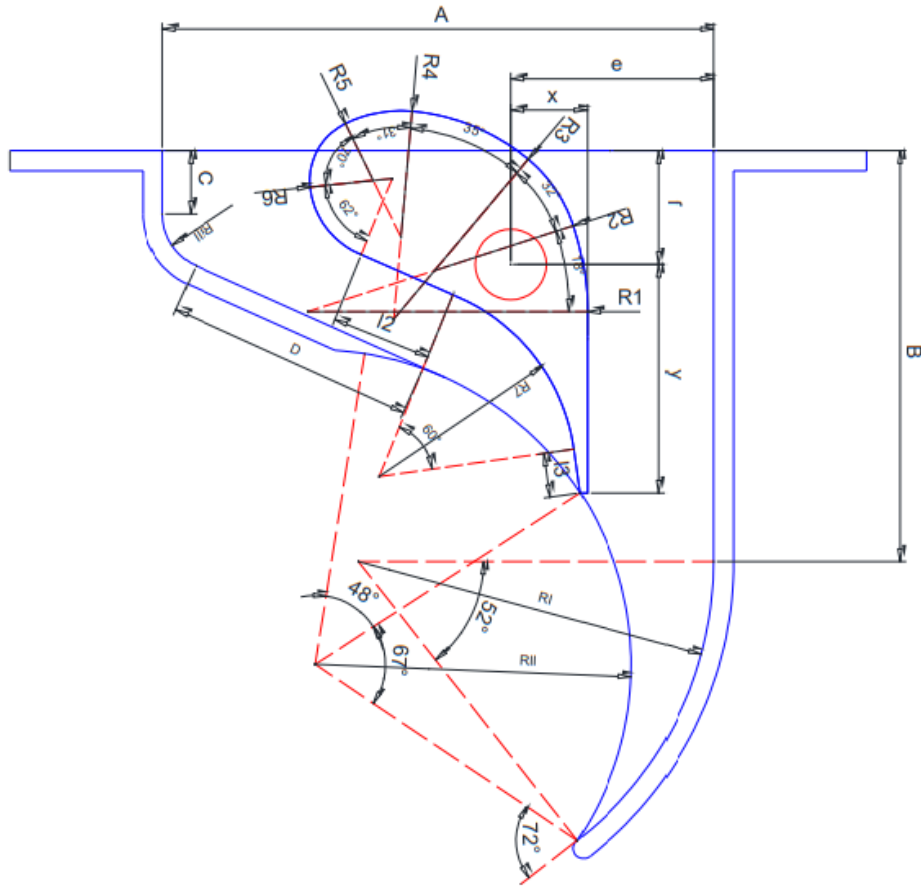


Ilustración 73: Perfil del inyector y álabe directriz de la turbina. Fuente propia

Al no estar en la [tabla 3](#) el valor para $De=0,125\text{mm}$, se calculan los valores de diseño mediante interpolación, resultando en:

| Cota[mm] | Diámetro del rodete 'De' [mm] |
|----------|-------------------------------|
| | 125 |
| A | 108,75 |
| B | 81,25 |
| C | 12,5 |
| D | 42,5 |
| e | 35 |
| f | 22,5 |
| RI | 70 |
| RII | 62,5 |

| | |
|------|-------|
| RIII | 11,25 |
| R1 | 55 |
| R2 | 28,75 |
| R3 | 41,25 |
| R4 | 25 |
| R5 | 12,5 |
| R6 | 16,25 |
| R7 | 38,75 |
| X | 15 |
| Y | 48,75 |
| I1 | 66 |
| I2 | 41,25 |
| I3 | 8,75 |

Tabla 4: Cotas obtenidas a partir de interpolación de la tabla 3

Con estos valores se ha realizado una ilustración del álabe directriz:

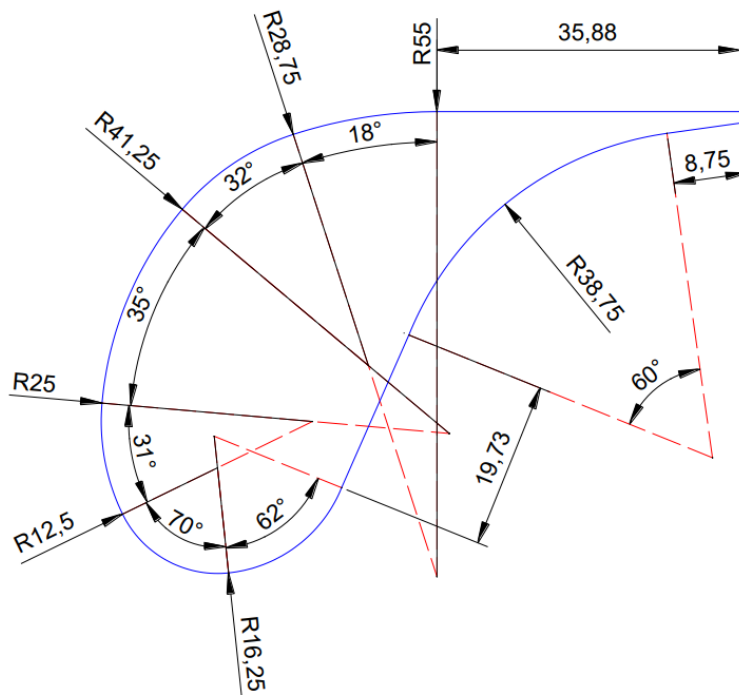


Ilustración 74: Perfil del álabe directriz para De=125 mm. Fuente propia

Geometría del rodete:

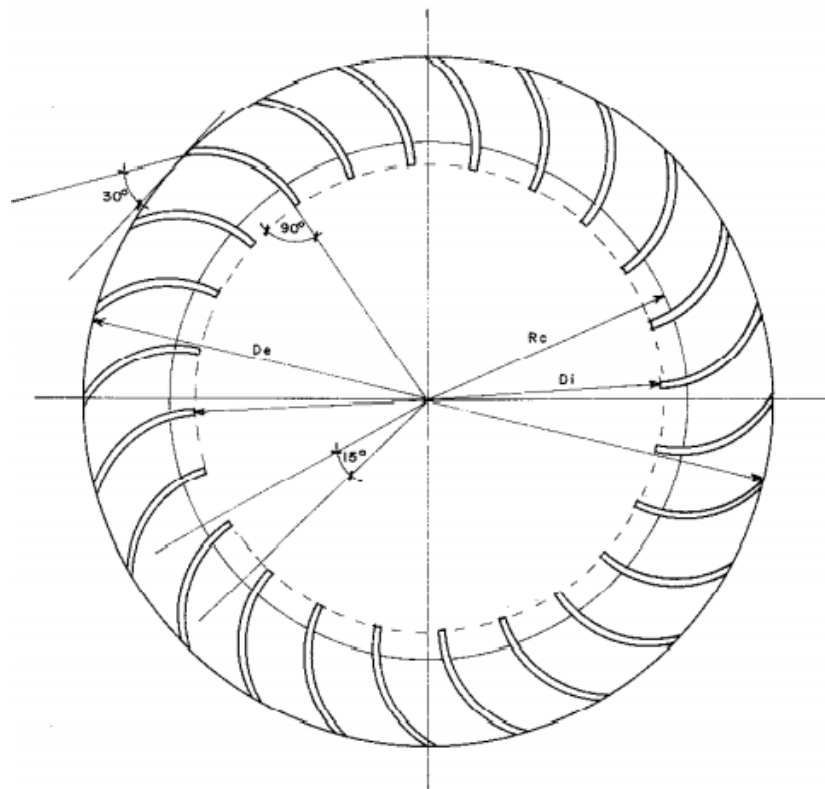
El ángulo de curvatura de los álabes del rodete se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\phi = 2 * \arctg * \left| \frac{\cos\beta'_2}{\left|\frac{D_i}{D_e}\right| + \text{sen}\beta'_2} \right|$$

Sustituyendo los valores obtenidos anteriormente, se concluye que:

$$\phi = 73^\circ$$

A continuación, se muestra una ilustración con la geometría del rodete:



PERFIL DEL RODETE

Ilustración 75: Perfil del rodete. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE

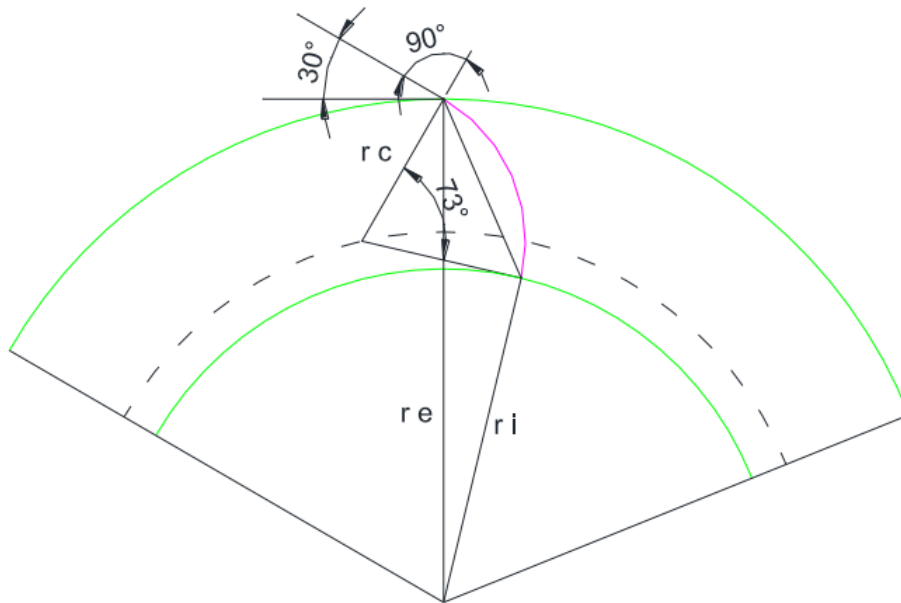


Ilustración 76: Esquema del rodete con parámetros calculados. Fuente propia

Los valores indicados en la [ilustración 75](#) y en la [ilustración 76](#) se calculan interpolando a partir de la siguiente tabla.

| C O T A (m m) | DIAMETRO DE RODETE - De (m m) | | | |
|--------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|
| | 300 | 400 | 500 | 600 |
| Di | 100 | 133 | 167 | 200 |
| Rc | 110 | 147 | 183 | 220 |
| r | 49 | 65 | 82 | 98 |

Tabla 5: Cotas para el rodete en función de 'De'. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE

Donde obtenemos que:

| Cota [mm] | Diámetro del rodete 'De' [mm] |
|--------------|-------------------------------|
| | 125 |
| Di | 42,25 |
| Re | 45,25 |
| rc | 21 |

Tabla 6: Cotas del rodete interpoladas para De=125 mm. Fuente propia

Donde: $ri = \frac{Di}{2} = 21,125 \text{ mm}$

Número de álabes del rodete:

Una vez definida la geometría del rodete, se procede a calcular el número de álabes óptimo, ya que un número reducido de álabes provocará pulsaciones en la generación de potencia y un número elevado producirá pérdidas adicionales en la generación.

Se elegirá a partir de la siguiente tabla:

| De [mm] | Z |
|---------|----|
| 125 | 20 |
| 200 | 22 |
| 300 | 24 |
| 400 | 26 |
| 500 | 28 |
| 600 | 30 |

Tabla 7: Número óptimo de álabes del rodete en función de su diámetro exterior. Fuente: Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas, OLADE

Se considerará que el número óptimo de álabes con el que debe contar la turbina a utilizar es 20.

Velocidad de embalamiento: Este parámetro es de interés ya que nos indica la velocidad alcanzada por la turbina después de un rechazo de carga, es decir, la velocidad que alcanza el grupo si el mecanismo de parada falla y la unidad no se detiene.

Para este tipo de turbina está definido como 1,8 veces la velocidad óptima de giro de la turbina, calculada anteriormente.

$$N_{emb} = 1,8 * n_e = 1,8 * 1125,64 = 2026rpm$$

Donde

- $N_{emb} = \text{Velocidad de embalamiento de la turbina, en [rpm]}$

Conclusiones

Se adquirirá un grupo turbina-generator de 2KW del tipo Michell-Banki con características similares a las diseñadas en este apartado. Se ha elegido este tipo de turbina de flujo cruzado por estar fundamentalmente diseñada para centrales de pequeñas dimensiones y ser especialmente eficiente a la hora de manejar caudales variables. El grupo adquirido generará electricidad a 220 V y 50 Hz, no siendo necesario en principio adquirir un transformador de tensión para la distribución. Si algún equipo a alimentar por la instalación trabajará a otra tensión, se adquirirá un transformador concreto para ese equipo.

6.4 Dimensionamiento de la obra civil

Tubería forzada

Parte del dimensionamiento de esta tubería se ha hecho en el apartado [Pérdidas de carga](#) ya que era necesario para poder calcular el caudal de diseño con mayor precisión.

El material elegido para la tubería ha sido PVC, esto se justifica por lo siguiente:

- Alta disponibilidad y bajo coste
- Baja rugosidad, por lo que disminuirá las pérdidas
- Resistencia química. Resistente ante casi cualquier tipo de corrosión, ataque químico o electroquímico que pueda darse en una instalación de estas características. Al no ser conductor de electricidad, no existen efectos galvánicos o electroquímicos. No requieren protecciones catódicas, recubrimientos especiales o pinturas
- Resistencia a ataque biológico. Al no servir como nutriente para ningún tipo de organismo, es totalmente inmune.

Se procede a calcular las presiones de trabajo y la relación de dimensiones.

En primer lugar, se calcula la presión de diseño de la tubería con la siguiente expresión:

$$Pd = \rho * Hb \quad (\text{ecu 43})$$

Sustituyendo en la (ecu 43), se obtiene:

$$Pd = 1000 * 14 = 1,4 \frac{kg}{cm^2}$$

Esta presión de diseño se comparará con la presión máxima de trabajo que será calculada a continuación.

La presión máxima de trabajo de la tubería se calculará a partir de la siguiente expresión:

$$S_h = \frac{(Rd - 1) * Pt}{2} \quad (\text{ecu 44})$$

Donde:

- $S_h = \text{Esfuerzo hidrostático máximo de trabajo} = 458,72kg/cm^2$

- $P_t = \text{Presión máxima de trabajo} \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$
- $Rd = \text{Relación de dimensiones} = \frac{\text{Diámetro exterior}}{\text{Espesor de pared mínimo}} = \frac{16cm}{0.32cm} = 50$

Sustituyendo en la ecuación (ecu 44), podemos obtener la presión máxima de trabajo:

$$P_t = \frac{2 * 458,72}{50 - 1}$$

$$P_t = 18.72 \frac{kg}{cm^2}$$

Sabiendo esto, se aplica un factor de seguridad $n=3$, para no correr en ningún caso el riesgo de que la tubería explote.

$$P_t' = \frac{18.72}{3} = 6,24 \frac{kg}{cm^2}$$

Se puede ver claramente que:

$$Pd < P_t'$$

Por lo que la tubería seleccionada podrá operar sin ningún problema.

Golpe de ariete

Se utilizarán los conocimientos explicados en el apartado [Fenómenos a evitar](#), aunque utilizando una metodología específica para este tipo de tubería, pudiendo así ser más precisos en los cálculos.

La presión mínima de ruptura, para tubos plásticos, la calculamos mediante la siguiente ecuación:

$$S_r = \frac{P_r * (Rd - 1)}{2} \quad (\text{ecu 45})$$

Donde:

- $S_r = 612 \frac{kg}{cm^2}$
- $P_r = \text{Presión mínima de ruptura} \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$

Sustituyendo en la ecuación (ecu 45), obtenemos la presión mínima de ruptura:

$$P_r = \frac{2 * S_r}{Rd - 1}$$

$$P_r = 24.97 \text{ kg/cm}^2$$

La celeridad de la onda de presión se calculará a partir de la ecuación (ecu 19):

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + \frac{K}{E} * (Rd - 2)}}$$

Donde:

- $E = \text{Módulo de elasticidad de la tubería} = 27\,580 \text{ kg/cm}^2$

La sobrepresión máxima al cerrar una válvula la calculamos con la siguiente expresión:

$$P_g = \frac{a * v}{g} \quad (\text{ecu 46})$$

Sustituyendo valores en las ecuaciones (ecu 19) y (ecu 46):

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + \frac{2,06 * 10^4}{27\,580} * (50 - 2)}}$$

$$a = 234 \text{ m/s}$$

$$P_g = \frac{234 * 1,01}{9,81}$$

$$P_g = 2,41 \text{ kg/cm}^2$$

Se comprueba que, efectivamente:

$$P_g < P_r$$

Por lo que la tubería no tendrá ningún problema de golpe de ariete y se concluye que se ha elegido correctamente.

Se da por hecho que no habrá problemas con la cavitación al no haber estrechamientos en todo el conducto y la baja velocidad del fluido.

Simulación con software informático

Por último, se ha realizado una simulación básica con el programa Pipe Flow Expert para comprobar si los datos calculados hasta el momento se verifican.

A continuación, se muestran unas capturas de pantalla realizadas para visualizar el proceso que se ha seguido:

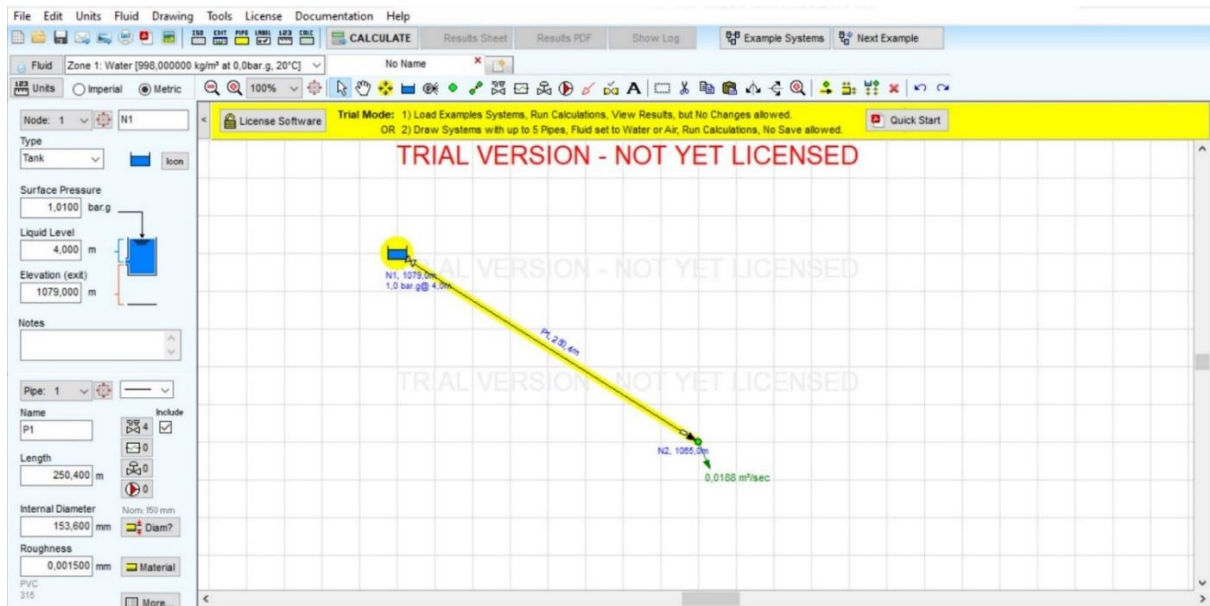


Ilustración 77: Simulación realizada con Pipe Flow Expert [1]. Fuente propia

El proceso a seguir ha sido el siguiente:

- Se inserta un tanque, que equivale al embalse formado por la presa del proyecto.
- Se establece la cota de ese tanque en 1079 metros y el nivel de agua del embalse en 4 metros
- La presión del agua del tanque es de una atmósfera, es decir, aproximadamente 1,01 bar
- Se introduce la longitud de la tubería: 250,4 metros
- Se introduce el caudal de diseño calculado: $0,0188 \frac{m^3}{s}$

Fittings on: P1, PVC, 150 mm, ID=153,600 mm (Pipe Id: 1)

| Symbol | Type | Metric | Imperial | Description | K value | Qty | Position |
|--------|---------|--------|----------|-----------------------|---------|-----|---------------|
| | Gate | 150 mm | 6" | Gate Valve | 0,1200 | 1 | Start of Pipe |
| | PB | 150 mm | 6" | Pipe Bend | 0,1800 | 1 | Start of Pipe |
| | EntProj | 150 mm | 6" | Pipe Entry Projecting | 0,7800 | 1 | Start of Pipe |
| | PB | 150 mm | 6" | Pipe Bend | 0,1800 | 1 | End of Pipe |
| | Bfly | 150 mm | 6" | Butterfly Valve | 0,6800 | 1 | End of Pipe |

Total K = 1,94

Save
Clear
Cancel

Fittings: Pipe Size 150 mm 6" Add Selected Item On To Pipe

| Symbol | Type | Metric | Imperial | Description | K |
|--------|---------|--------|----------|---------------------------------|--------|
| | SB | 150 mm | 6" | Standard Bend | 0,4500 |
| | LB | 150 mm | 6" | Long Bend | 0,2400 |
| | PB | 150 mm | 6" | Pipe Bend | 0,1800 |
| | E45 | 150 mm | 6" | Elbow 45 deg. | 0,2400 |
| | RB | 150 mm | 6" | Return Bend | 0,7500 |
| | MB45 | 150 mm | 6" | Mitre Bend 45 deg. | 0,2300 |
| | MB90 | 150 mm | 6" | Mitre Bend 90 deg. | 0,9000 |
| | Gate | 150 mm | 6" | Gate Valve | 0,1200 |
| | Globe | 150 mm | 6" | Globe Valve | 5,1000 |
| | Angle | 150 mm | 6" | Globe Valve Angled | 2,2500 |
| | Plug | 150 mm | 6" | Plug Valve Straightway | 0,2700 |
| | Bfly | 150 mm | 6" | Butterfly Valve | 0,6800 |
| | BallFB | 150 mm | 6" | Ball Valve Full Bore | 0,0500 |
| | BallRB | 150 mm | 6" | Ball Valve Reduced Bore | 0,8500 |
| | LiftCh | 150 mm | 6" | Lift Check Valve | 9,0000 |
| | AngleCh | 150 mm | 6" | Lift Check Valve Angled | 0,8300 |
| | SwCh | 150 mm | 6" | Swing Check Valve | 1,8500 |
| | TiltCh | 150 mm | 6" | Tilting Disk Check | 1,8000 |
| | ChWaf | 150 mm | 6" | Wafer Check Valve | 2,3300 |
| | Foot | 150 mm | 6" | Foot Valve with Strainer | 6,3000 |
| | Hinged | 150 mm | 6" | Hinged Foot Valve with Strainer | 1,1000 |
| | St | 150 mm | 6" | Strainer | 1,0000 |
| | TT | 150 mm | 6" | Through Tee | 0,2800 |
| | BT | 150 mm | 6" | Branch Tee | 0,9000 |
| | ExitCon | 150 mm | 6" | Pipe Exit to Container | 1,0000 |
| | Open | 150 mm | 6" | Open Pipe Exit | 1,0000 |
| | EntProj | 150 mm | 6" | Pipe Entry Projecting | 0,7800 |

Double click on a fitting to add it to the pipe.

Calculate K value for

- Entrance Rounded
- Gradual Enlargement
- Gradual Contraction
- Sudden Enlargement
- Sudden Contraction
- Long Pipe Bend

Create New Fitting
Remove Fitting

Ilustración 78: Simulación realizada con Pipe Flow Expert [II]. Fuente propia

- Añadimos los accesorios de nuestra instalación, es decir, elementos que vayan a provocar pérdidas de carga
- En este caso, se ha decidido añadir:
 1. Válvula de compuerta que conecta la presa con la tubería
 2. Un codo al inicio y otro al final de la tubería
 3. Un acoplamiento del tanque a la tubería
 4. Una válvula de mariposa al final de la tubería

Cabe decir que no se han utilizado los mismos valores del parámetro [K] que los especificados en el apartado *Pérdidas de carga*. Esto se debe a que el valor de este parámetro depende del elemento específico que se adquiera. Es decir, que, por ejemplo, una válvula de mariposa de un determinado fabricante no tendrá la misma [K] que el de otro fabricante.

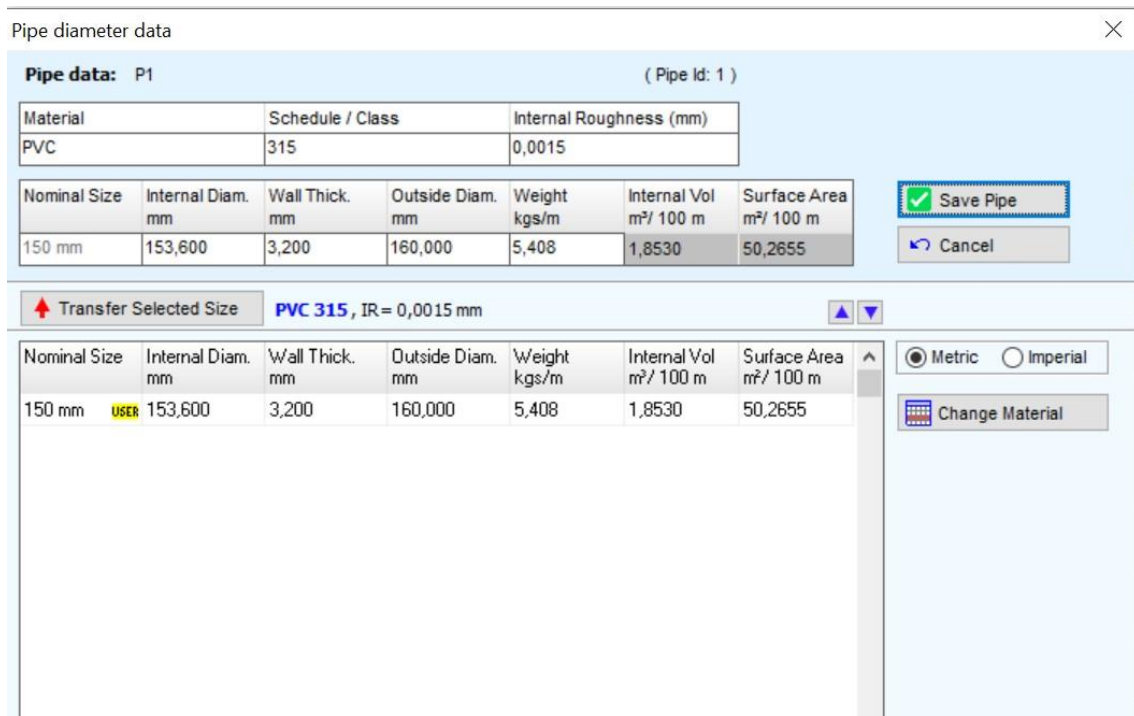


Ilustración 79: Simulación realizada con Pipe Flow Expert [III]. Fuente propia

- Se establecen los parámetros de la tubería y el material a utilizar con su correspondiente rugosidad

En la siguiente tabla se muestran los datos obtenidos en esta simulación comparados con los calculados:

| | Valores simulados Pipe Flow | Valores calculados |
|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Velocidad del fluido [m/s] | 1,015 | 1,01 |
| Pérdidas primarias [m] | 1,313 | 1,06 |
| Pérdidas secundarias [m] | 0,203 | 0,472 |
| Pérdidas totales [m] | 1,516 | 1,532 |

Ilustración 80: Comparación de datos obtenidos con Pipe Flow Expert y los calculados

Como se puede ver, pese a haber diferencias en los resultados individualmente, la suma total de pérdidas es realmente similar, lo que refuerza la veracidad de lo calculado hasta el momento.

Anclajes y apoyos

Para sujetar correctamente la tubería en su recorrido desde la presa hasta el edificio de máquinas, son necesarios una serie de anclajes y apoyos:

- **Anclajes:** Generalmente de hormigón, se utilizan cuando hay un cambio de pendiente para impedir el posible movimiento de la tubería. Requieren un diseño más detallado que los apoyos.
- **Apoyo:** Se utilizan para sujetar adecuadamente la tubería en sus tramos rectos. Por las condiciones de este proyecto se tratará que sean de fácil construcción y de bajo costo. Concretamente, la tubería se colocará en una zanja de unos 50 cm de profundidad y 40 cm de ancho, donde irá apoyada en una cama de arena de unos 5 cm y recubierta así misma con arena con un mínimo de 5 cm de espesor sobre la clave de la tubería, es decir, el punto más alto de esta. Además, la parte superior de la zanja se rellenará con una capa de 20 cm de tierra de obra.

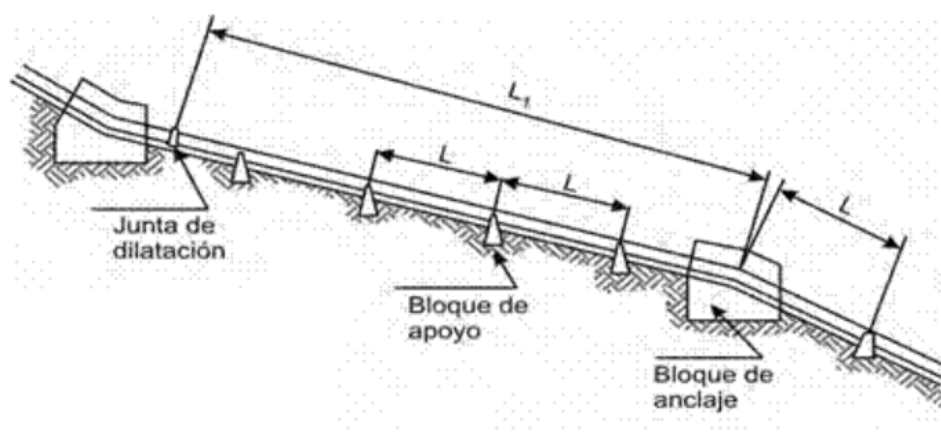


Ilustración 81: Esquema de la tubería forzada con anclajes y apoyos. Fuente [30]

Para el correcto diseño de los anclajes se requiere de un perfil topográfico preciso con el cual no contamos por los pocos recursos de la zona. Pese a esto, utilizando el perfil mostrado en la [ilustración 64](#), se tratará de hacer una estimación de los anclajes necesarios para la correcta instalación de la tubería forzada.

Además, como se mencionó en el apartado [Conclusiones](#), a la hora de construir la tubería, se tratará de que no haya desviaciones hacia la izquierda o hacia la derecha, teniendo así sólo que considerar el cambio de pendiente.

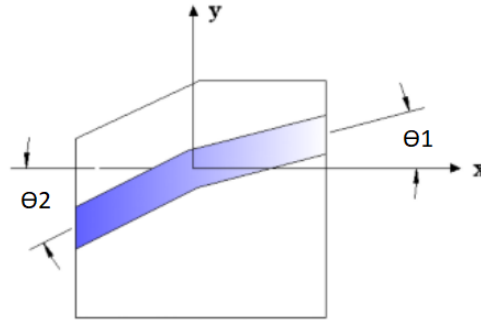
A continuación, se muestra una tabla con los ángulos estimados:

| | θ_1 | θ_2 |
|-----------|------------|------------|
| Anclaje 1 | 0 | 7 |
| Anclaje 2 | 7 | 0 |

Tabla 8: Ángulos estimados para el cálculo de los anclajes

Donde:

- θ_1 : Desviación aguas arriba
- θ_2 : Desviación aguas abajo



Para simplificar la notación para los cálculos, el ángulo de inclinación de la tubería se definirá como: $\alpha = 7^\circ$

Debido a la poca y constante inclinación del terreno se tratará de tener que utilizar sólo dos anclajes, como se indicó en la [Tabla 8](#), pese a la gran longitud de la tubería. El primer anclaje se colocará a 43,5 metros de la presa, ya que hasta ese momento la inclinación del terreno es muy leve como se puede ver en la [ilustración 82](#). El segundo anclaje se colocará justo antes de la casa de máquinas, es decir, 1 metro antes. Estas distancias se definirán de la siguiente forma para cálculos posteriores:

$$L1 = 43,5 \text{ m}$$

$$L2 = 206 \text{ m}$$

$$L3 = 1 \text{ m}$$

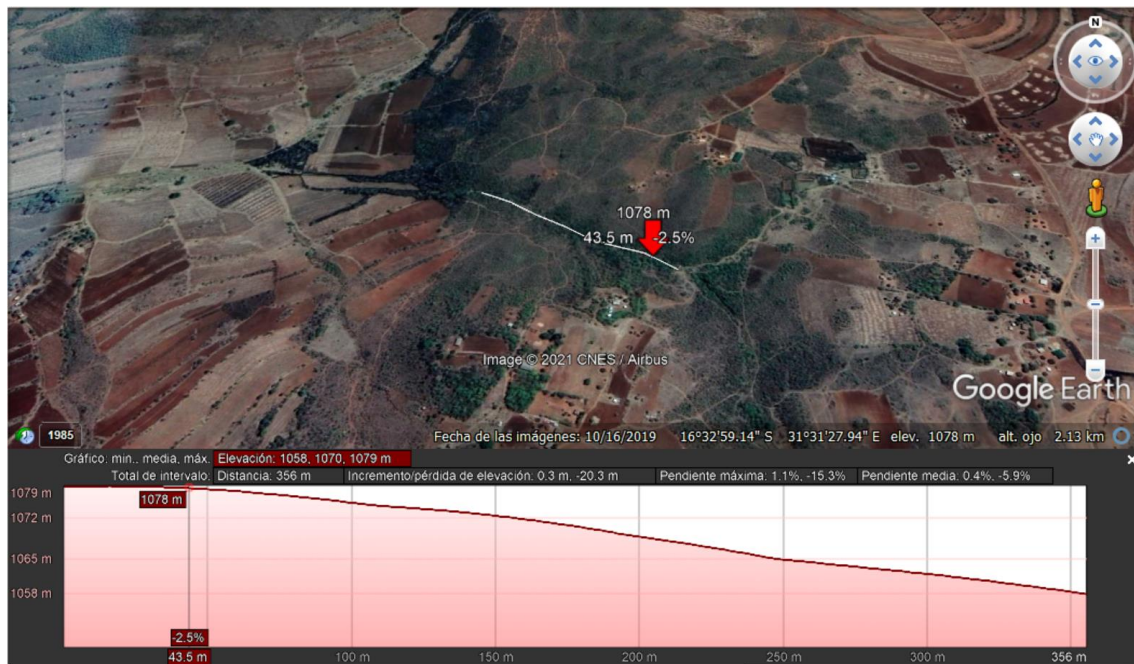


Ilustración 82: Lugar concreto donde se ubicará el primer anclaje. Fuente propia

Se procede a calcular la fuerza que tendrán que soportar los anclajes.

En primer lugar, se definirán las diferentes fuerzas a tener en cuenta para este cálculo:

- F_{v1} = Componente perpendicular a la tubería de la fuerza debida al peso del fluido más el de la tubería, correspondiente al tramo de aguas arriba. [N]
- F_{v2} = Componente perpendicular a la tubería de la fuerza debida al peso del fluido más el de la tubería, correspondiente al tramo de aguas abajo. [N]
- F_{h1} = Componente paralela a la tubería de la fuerza debida al peso del fluido más el de la tubería, correspondiente al tramo de aguas arriba. [N]
- F_{h2} = Componente paralela a la tubería de la fuerza debida al peso del fluido más el de la tubería, correspondiente al tramo de aguas abajo. [N]
- F_m = Fuerza debida a la variación del momento lineal en el cambio de dirección de la tubería. [N]
- F_h = Fuerza debida a la presión hidrostática ejercida por el fluido en el interior de la tubería. [N]
- Q_{fl} = Carga uniformemente distribuida del peso del fluido por unidad de longitud. [N/m]
- Q_{tub} = Carga uniformemente distribuida del peso de la tubería por unidad de longitud. [N/m]

Para aclarar el entendimiento de estas fuerzas y de su impacto en la tubería, se han representado a continuación:

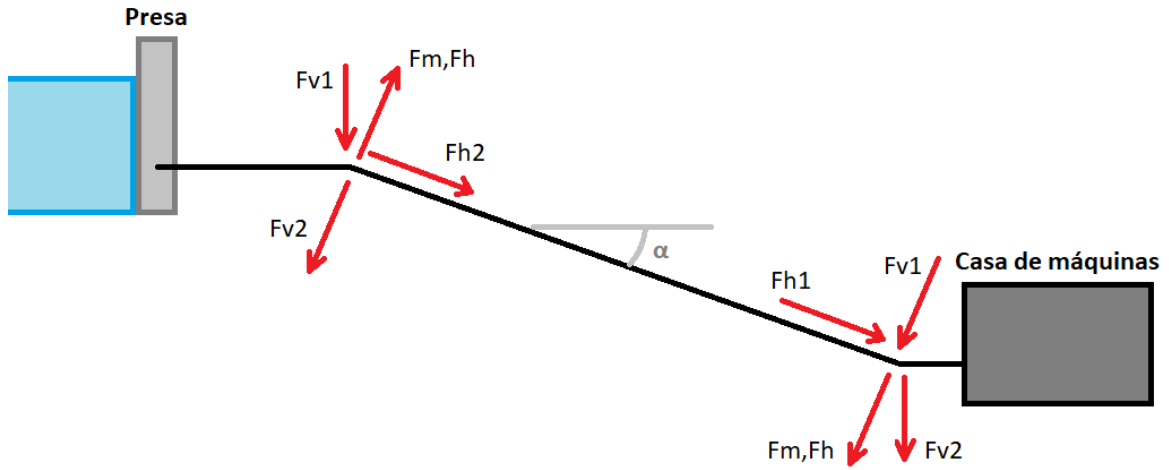


Ilustración 83: Diagrama de fuerzas a tener en cuenta para el diseño de los anclajes de la tubería forzada. Fuente propia

Las ecuaciones utilizadas para calcular las cargas uniformemente distribuidas por unidad de longitud del peso del fluido y de la tubería son las siguientes:

$$Q_{fl} = \frac{\pi}{4} * D_i^2 * \rho * g \quad (\text{ecu 47})$$

$$Q_{tub} = \pi * D_e * e * \rho_t * g \quad (\text{ecu 48})$$

Donde:

- $\rho_t = \text{Peso específico del material de la tubería} = 1375 \text{ kg/m}^3$

Sustituyendo, se obtiene:

$$Q_{fl} = \frac{\pi}{4} * 0,1536^2 * 1000 * 9,81$$

$$Q_{fl} = 181,78 \text{ N/m}$$

$$Q_{tub} = \pi * 0,16 * 0,0032 * 1375 * 9,81$$

$$Q_{tub} = 21,7 \text{ N/m}$$

Anclaje 1. Se procede a calcular las diferentes fuerzas a tener en cuenta:

$$Fv1 = \frac{L1}{2} * (Qfl + Qtub) = \frac{43,5}{2} * (181,78 + 21,7) \quad (\text{ecu 49})$$

$$Fv1 = 4425,7 \text{ N}$$

$$Fv2 = \frac{L2}{2} * (Qfl + Qtub) * \cos\alpha = \frac{206}{2} * (181,78 + 21,7) * \cos7 \quad (\text{ecu 50})$$

$$Fv2 = 20802,2 \text{ N}$$

$$Fh2 = \frac{L2}{2} * (Qfl + Qtub) * \sin\alpha = \frac{206}{2} * (181,78 + 21,7) * \sin7 \quad (\text{ecu 51})$$

$$Fh2 = 2554,2 \text{ N}$$

$$Fh = \rho * Pd * \frac{\pi * Di^2}{4} = 1000 * 1,4 * \frac{\pi * 0,1536^2}{4} \quad (\text{ecu 52})$$

$$Fh = 25,9 \text{ N}$$

$$Fm = \rho * Q * \sqrt{v^2 + v^2 - 2 * v^2 * \cos\alpha} \quad (\text{ecu 53})$$

$$Fm = 1000 * 0,018797 * \sqrt{1,01^2 + 1,01^2 - 2 * 1,01^2 * \cos7} = 2,318 \text{ N}$$

Anclaje 2:

$$Fv1 = \frac{L2}{2} * (Qfl + Qtub) * \cos\alpha = \frac{206}{2} * (181,78 + 21,7) * \cos7$$

$$Fv1 = 20802,2 \text{ N}$$

$$Fv2 = \frac{L3}{2} * (Qfl + Qtub) = \frac{1}{2} * (181,78 + 21,7)$$

$$Fv2 = 101,74 \text{ N}$$

$$Fh1 = \frac{L2}{2} * (Qfl + Qtub) * \sin\alpha = \frac{206}{2} * (181,78 + 21,7) * \sin 7$$

$$Fh1 = 2554,2 \text{ N}$$

$$Fh = \rho * Pd * \frac{\pi * Di^2}{4} = 1000 * 1,4 * \frac{\pi * 0,1536^2}{4}$$

$$Fh = 25,9 \text{ N}$$

$$Fm = \rho * Q * \sqrt{v^2 + v^2 - 2 * v^2 * \cos\alpha}$$

$$Fm = 1000 * 0,018797 * \sqrt{1,01^2 + 1,01^2 - 2 * 1,01^2 * \cos 7} = 2,318 \text{ N}$$

Al ser tan bajo el valor obtenido para la fuerza debida a la presión hidrostática ejercida por el fluido en el interior de la tubería (ecu 53), se omitirá en los cálculos para comprobar que se cumplen las condiciones de equilibrio.

También debe tenerse en cuenta que en el caso de Fv2 en el anclaje 1 y en el caso de Fv1 en el anclaje 2, no se está teniendo en cuenta la zanja donde descansará la tubería, por lo que las fuerzas resultantes se multiplicarán por 0,2 para el dimensionamiento, suponiendo que la zanja se encargará de soportar el 80% de esta fuerza, quedando:

Anclaje 1:

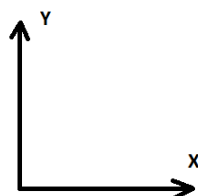
$$Fv2 = 20802,2 * 0,2 = 4160,44 \text{ N}$$

Anclaje 2:

$$Fv1 = 20802,2 * 0,2 = 4160,44 \text{ N}$$

Condiciones de equilibrio:

En primer lugar, se calculan el total de fuerzas en el eje x e y, siendo los ejes horizontal y vertical respectivamente. Para establecer los signos de las fuerzas se ha seguido el siguiente criterio:



Anclaje 1:

$$\sum F_{y1} = -F_{v1} + F_h * \cos\alpha - F_{v2} * \cos\alpha - F_{h2} * \sen\alpha$$

$$\sum F_{y1} = -4425,7 + 25,9 * \cos 7 - 4160,44 * \cos 7 - 2554,2 * \sen 7$$

$$\sum F_{y1} = -8840,7 \text{ N}$$

$$\sum F_{x1} = F_h * \sen\alpha + F_{h2} * \cos\alpha - F_{v2} * \sen\alpha$$

$$\sum F_{x1} = 25,9 * \sen 7 + 2554,2 * \cos 7 - 4160,44 * \sen 7$$

$$\sum F_{x1} = 2031,3 \text{ N}$$

Anclaje 2:

$$\sum F_{y2} = -F_{v2} - F_h * \cos\alpha - F_{v1} * \cos\alpha - F_{h1} * \sen\alpha$$

$$\sum F_{y2} = -101,74 - 25,9 * \cos 7 - 4160,44 * \cos 7 - 2554,2 * \sen 7$$

$$\sum F_{y2} = -4568,15 \text{ N}$$

$$\sum F_{x2} = F_{h1} * \cos\alpha - F_{v1} * \sen\alpha - F_h * \sen\alpha$$

$$\sum F_{x2} = 2554,2 * \cos 7 - 4160,44 * \sen 7 - 25,9 * \sen 7$$

$$\sum F_{x2} = 2024,97 \text{ N}$$

Cálculo de la estabilidad el anclaje. Se debe cumplir la siguiente condición:

$$\left| \sum F_x \right| < \mu * \left| \sum F_y \right| \quad (\text{ecu 54})$$

Donde:

- μ = Coeficiente de fricción entre el hormigón y el suelo = 0,5

Sustituyendo en la ecuación (ecu 54):

Anclaje 1:

$$|\sum Fx1| < 0,5 * |\sum Fy1| = 2031,3 < 4420,35$$

Anclaje 2:

$$|\sum Fx2| < 0,5 * |\sum Fy2| = 2024,97 < 2284$$

Como se puede observar esta condición se cumple para los dos anclajes

Capacidad de carga: Se debe comprobar que el esfuerzo de compresión ejercido por el anclaje sobre el terreno es menor que el admisible por este:

$$\sigma_{\text{anclaje}} = \frac{|M|}{A} * \left(1 \pm \frac{6 * ex}{B}\right) < \sigma_{\text{adm}} \quad (\text{ecu 55})$$

Donde:

- $A = \text{Área de la base del anclaje [m}^2\text{]}$
- $ex = \text{Excentricidad de la reacción vertical [m]}$
- $B = \text{Longitud de la base del anclaje [m]}$
- $M = \text{Momento generado por las fuerzas [Nm]}$
- $\sigma_{\text{anclaje}} = \text{Esfuerzo de compresión sobre el terreno. } \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right]$
- $\sigma_{\text{adm}} = \text{Esfuerzo de compresión admisible del terreno} = 0,8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right]$

La excentricidad de la reacción vertical se expresa de la siguiente forma:

$$ex = x - \frac{B}{2} \quad (\text{ecu 56})$$

Donde:

- $x = \text{Distancia horizontal del codo al inicio del anclaje. [m]}$

El momento se halla con la siguiente expresión:

$$M = \sum Fx * y + \sum Fy * x - P_{\text{anc}} * \frac{B}{2} \quad (\text{ecu 57})$$

Donde:

- $P_{anc} = \text{Peso del anclaje}$

$$P_{anc} = \text{Volumen}_{anc} * \rho_{anclaje} * g \quad (\text{ecu 58})$$

Donde:

- $\rho_{anclaje} = 2400 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Las dimensiones del anclaje se han representado gráficamente en la siguiente ilustración:

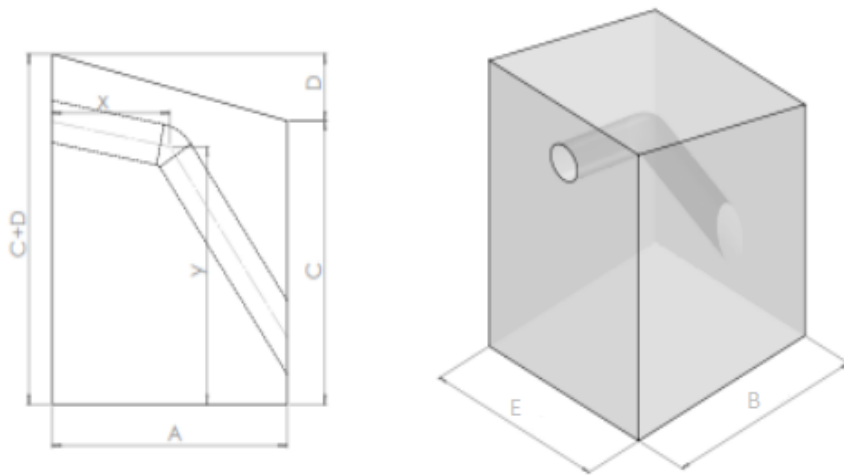


Ilustración 84: Modelo del anclaje a utilizar con sus cotas indicadas. Fuente propia

Para el cálculo de las dimensiones se han realizado varias iteraciones hasta que se han conseguido unos valores donde $\sigma_{anclaje} < 0,8 \left[\frac{kg}{cm^2} \right]$, es decir, que se cumple la condición de capacidad de carga. Los cálculos y las dimensiones se muestran a continuación:

Anclaje 1:

| | |
|---|-------|
| B | 0,4 m |
| E | 0,4 m |
| C | 0,3 m |
| D | 0,1 m |
| y | 0,2 m |
| x | 0,3 m |

Tabla 9: Dimensiones propuestas para el anclaje 1

$$A = B * E = 0,4 * 0,4 = 0,16 \text{ m}^2$$

$$Volumen_{anc} = A * C + \frac{1}{2} * B * D * E = 0,16 * 0,3 + \frac{1}{2} * 0,4 * 0,1 * 0,4 = 0,056 \text{ m}^3$$

$$P_{anc} = 0,056 * 2400 * 9,81 = 1317,12 \text{ N}$$

$$M = 2031,3 * 0,2 + 8840,7 * 0,3 - 1317,12 * \frac{0,4}{2} = 2795 \text{ Nm}$$

$$ex = 0,3 - \frac{0,4}{2} = 0,1$$

$$\sigma_{anclaje1} = \frac{2795}{0,16} * \left(1 \pm \frac{6 * 0,1}{0,4}\right) = 43671,9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{anclaje1} = 55254 * \frac{0,102}{10000} = 0,45 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

Anclaje 2:

| | |
|---|-------|
| B | 0,3 m |
| E | 0,3 m |
| C | 0,3 m |
| D | 0,1 m |
| y | 0,2 m |
| x | 0,3 m |

Tabla 10: Dimensiones propuestas para el anclaje 2

$$A = B * E = 0,3 * 0,3 = 0,09 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen}_{\text{anclaje}} &= A * C + \frac{1}{2} * B * D * E = 0,09 * 0,3 + \frac{1}{2} * 0,3 * 0,1 * 0,3 \\ &= 0,0315 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$P_{\text{anc}} = 0,0315 * 2400 * 9,81 = 741,6 \text{ N}$$

$$M = 2024,97 * 0,2 + 4568,15 * 0,3 - 741,6 * \frac{0,3}{2} = 1665 \text{ Nm}$$

$$ex = 0,3 - \frac{0,3}{2} = 0,15$$

$$\sigma_{\text{anclaje2}} = \frac{1665}{0,09} * \left(1 \pm \frac{6 * 0,15}{0,3} \right) = 74000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\sigma_{\text{anclaje1}} = 74000 * \frac{0,102}{10000} = 0,7548 \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]$$

Dimensionamiento de la casa de máquinas:

En primer lugar, se establecen unos requisitos mínimos para el dimensionamiento de esta edificación según la turbina escogida:

1. Serán necesarios unos cimientos para la turbina, que absorban sus vibraciones cuando esté en funcionamiento y que soporten su peso.
2. Las dimensiones mínimas de esta edificación serán de 2,5 x 2,5 m.
3. La sección de descarga tendrá unas dimensiones mínimas de 0,25 x 0,25 m.

Para la construcción de la casa de máquinas se utilizará un planteamiento básico, utilizando una losa de cimentación de unos 10cm de espesor de hormigón armado con un mallazo de obra 15 / 15 / 4.

El edificio estará constituido por cuatro muros de 1,8 metros de alto formados por bloques de hormigón, de tal forma que sujeten un techo inclinado constituido por planchas metálicas. Uno de estos muros, será atravesado por la tubería forzada que transporta el agua hasta la turbina. Esto se ha ilustrado en la [ilustración 85](#) y la [ilustración 86](#).

La tubería forzada, contará con una válvula de mariposa a la entrada del edificio, como se indicó en el apartado [Conclusiones](#), que permitirá interrumpir o regular el flujo de agua que entra al inyector de la turbina.

A continuación, se muestran dos planos básicos ilustrando las dimensiones de la casa de máquinas y el canal de descarga.

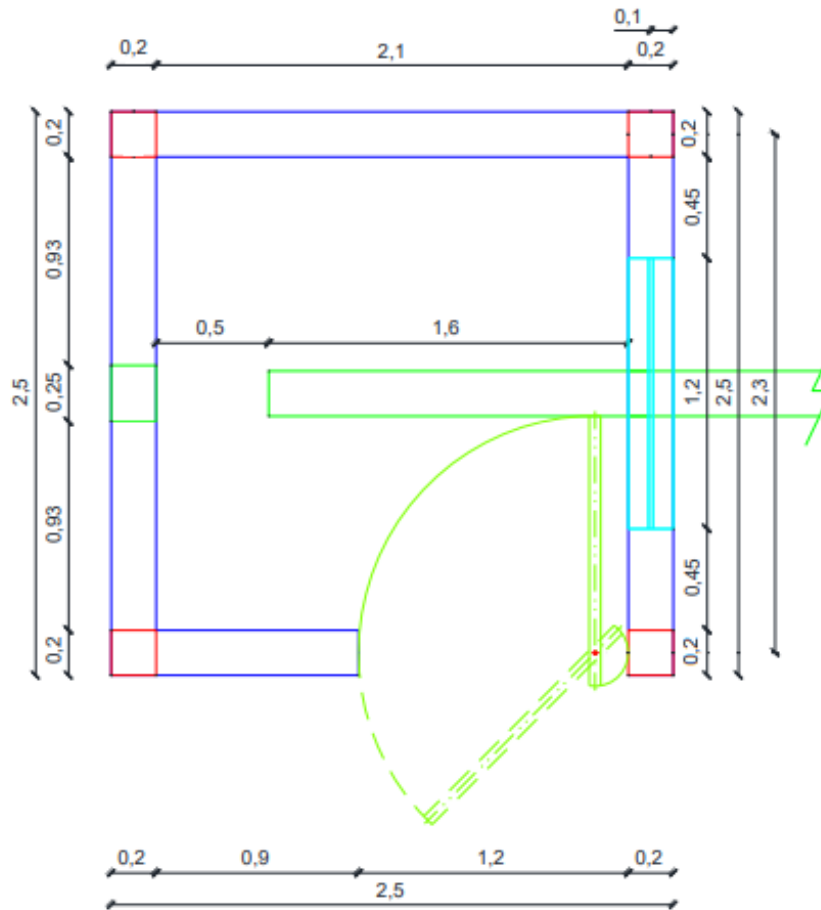


Ilustración 85: Plano de la casa de máquinas. [Planta]. Fuente propia

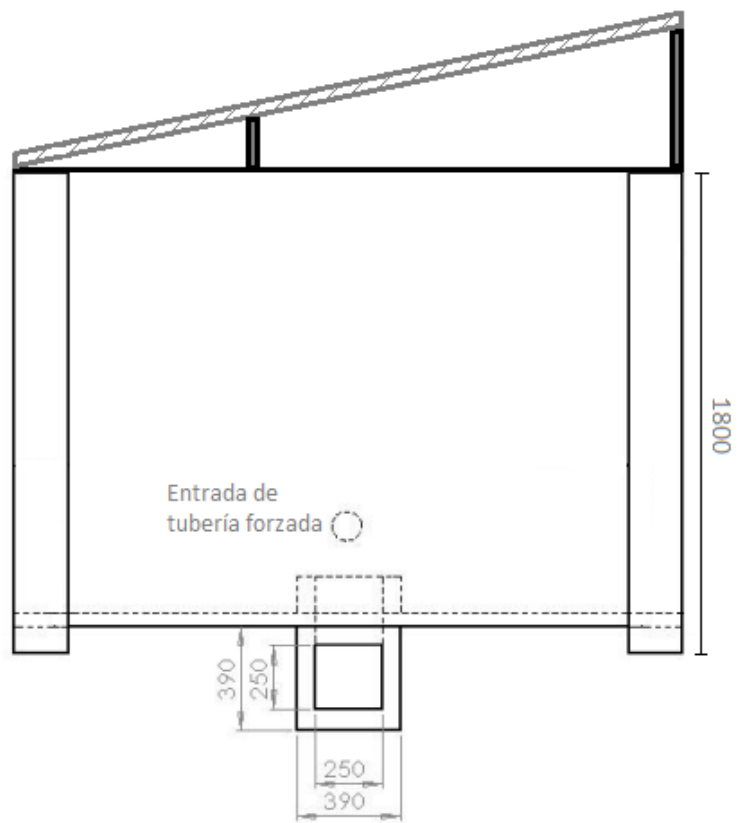


Ilustración 86: Plano de la casa de máquinas y canal de descarga. [Perfil]. Fuente propia

7. Conclusiones

En primer lugar, para la realización del proyecto se ha realizado un estudio sobre la situación energética de Zimbabue, concretamente de la zona de Masholnaland Central, y lo que supondría la implantación de un proyecto de estas características para la población local, analizando el potencial de generación que podría tener una instalación hidroeléctrica en la zona y viendo el impacto que tendría en el desarrollo de la comunidad. El propósito principal será alimentar energéticamente a dos bombas de riego, aunque se tratará de diversificar la línea eléctrica de la central para así poder abastecer también otras instalaciones como la clínica o el centro de formación profesional que se pretenden construir, en caso de que no sea necesario utilizar las bombas o haya un excedente en la generación.

Para conseguir cumplir los objetivos que se han propuesto, se ha hecho un análisis mediante software informático de la zona donde se quiere llevar a cabo el proyecto, detallado en [Datos y observaciones iniciales](#), ya que, al ser un poblado con muy pocos recursos, no se cuenta con estudios precisos necesarios para el diseño de la instalación. Tras esto, se ha concluido que, debido a las condiciones hidrológicas de la zona, que nos indican que el caudal disponible para la generación de energía será variable e incluso habrá meses del año en los que no se contará con el agua suficiente para su utilización, se construirá una central con una obra de toma directamente acoplada a la presa, a unos 50 cm de altura sobre la base para así poder utilizar la instalación aunque el embalse no esté lleno. Otro motivo por el que se ha elegido este tipo de obra de toma es el ahorro que supone prescindir de desarenador y cámara de carga, los cuales habría que construir si no se realizará este acoplamiento, evitando además posibles atascos y averías.

En cuanto a la tubería forzada, se ha decidido utilizar PVC como material debido a su alta disponibilidad, poca rugosidad y gran resistencia a casi cualquier tipo de corrosión. Para asegurar su funcionalidad a largo plazo y evitar tener que realizar un mantenimiento periódico, la tubería se colocará en una zanja en su trayecto desde la presa hasta la casa de máquinas.

Para la elección del equipamiento electromecánico a utilizar, se ha hecho un estudio del desnivel y caudal disponible, concluyendo que se instalará un grupo turbina-generador tipo Michell-Banki con unas características de diseño similares a las del apartado [Dimensionamiento y selección de la turbina hidráulica](#). Esta elección está basada principalmente en que este tipo de turbina de flujo cruzado está fundamentalmente diseñada para centrales hidroeléctricas de pequeñas dimensiones, además de ser especialmente eficiente a la hora de manejar caudales variables, siendo esto ideal para este proyecto. Para la distribución de la electricidad generada en principio no será necesario adquirir un transformador de tensión, ya que el grupo genera electricidad a 220 V y 50 Hz.

Por último, la construcción de la casa de máquinas está basada en la sencillez, ya que su única función será la de alojar el equipamiento electromecánico y protegerlo de las posibles condiciones meteorológicas adversas que puedan producirse. Su diseño detallado se encuentra en el apartado [Dimensionamiento de la obra civil](#), pudiendo resumirse en que constará de cuatro muros hechos a base de bloques de hormigón colocados sobre una losa de cimentación previamente instalada. Encima de estos muros se colocará una cubierta inclinada de chapas metálicas para evitar la acumulación de agua.

8. Plan de implementación

A continuación, se procede a enumerar los pasos a seguir para poner en funcionamiento la instalación.

- 1. Instalación del acoplamiento a la presa:** Este proceso se realizará a la vez que la reconstrucción de la presa. Se instalará la tubería que servirá como obra de toma para la instalación a 50 cm de altura sobre la base de la presa, colocando un pasamuros en cada extremo y utilizando un recubrimiento de hormigón para protegerla del propio peso de la presa que se construirá con materiales sueltos de la zona, no garantizando la consistencia necesaria para no dañar la tubería de PVC. Además, se utilizará un material de sellado con los pasamuros en los extremos para asegurar que no haya filtraciones en la entrada y salida de agua de la tubería. Se instalará una válvula de compuerta manual en la tubería para poder interrumpir el flujo de agua cuando sea necesario. Por último, se colocará la rejilla filtradora en la entrada de agua del embalse a la tubería.
- 2. Excavación de la zanja:** Se procederá a excavar una zanja de 50 cm de profundidad y 40 cm de ancho desde la presa hasta la casa de máquinas. En primer lugar, la zanja se excavará con, aproximadamente, un 1% de inclinación durante 43,5 metros de longitud. Tras esta distancia, la inclinación aumentará a 7º durante 206 metros. En este punto la tubería saldrá de la zanja para entrar de forma horizontal a la casa de máquinas. La zanja contará con una cama de arena de unos 5 cm. Una vez se haya montado la tubería como se indica en el siguiente punto, se rellenará con arena hasta 5 cm por encima de la clave de la tubería y posteriormente con una capa de unos 20 cm de tierra de obra.
- 3. Montaje de la tubería forzada:** Una vez cavada la zanja y se haya colocado la cama de arena, se procederá a montar la tubería forzada con sus respectivas uniones y anclajes colocados en los puntos indicados en [Dimensionamiento de obra civil](#). Habrá que tener especial cuidado en la unión con el acoplamiento a la presa y en la entrada final a la casa de máquinas, donde se sellará la tubería a los pasamuros con material de sellado. Al final de la tubería se instalará una válvula de mariposa, permitiendo regular e interrumpir el flujo de agua cuando se desee a la entrada de la turbina.
- 4. Construcción de la casa de máquinas:** En primer lugar, se procederá a hacer una excavación de 6,25 m² y 10 cm de profundidad donde se colocará la losa de cimentación con su respectivo mallazo de obra de 15 / 15 / 4. Al colocar el hormigón para la losa, habrá que tener en cuenta el agujero de 0,25 x 0,25 m indicado en la [ilustración 86](#), para el canal de descarga. Una vez colocada la losa, se procederá a construir los muros de la edificación con los bloques de hormigón, estos muros tendrán una altura de 1,8 metros. Una vez construidos los muros, se realizará un agujero circular de 160 mm en uno de ellos, donde se colocará el

pasamuros para la entrada de la tubería forzada a la turbina. Por último, se colocarán las viguetas de sujeción y el techo inclinado de chapa metálica.

5. **Colocación del equipo electromecánico y puesta en funcionamiento de la turbina.** En primer lugar, se procederá a dejar pasar por primera vez un caudal de agua similar al que se utilizará cuando la instalación esté en funcionamiento por la tubería forzada. Este caudal se dejará pasar y caerá por el canal de descarga, dejando pasar cualquier impureza que se haya podido acumular en la tubería durante el montaje de esta y comprobando que el agua fluye correctamente con el caudal esperado. Una vez comprobado esto, se procederá a montar el equipamiento electromecánico necesario para el funcionamiento de la instalación, teniendo especial cuidado en las uniones con la tubería forzada y el canal de descarga.

A continuación, se muestra un diagrama mostrando los plazos aproximados que llevará realizar cada una de estas tareas.



PROJECT
ZIMBABWE

FASES DEL PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

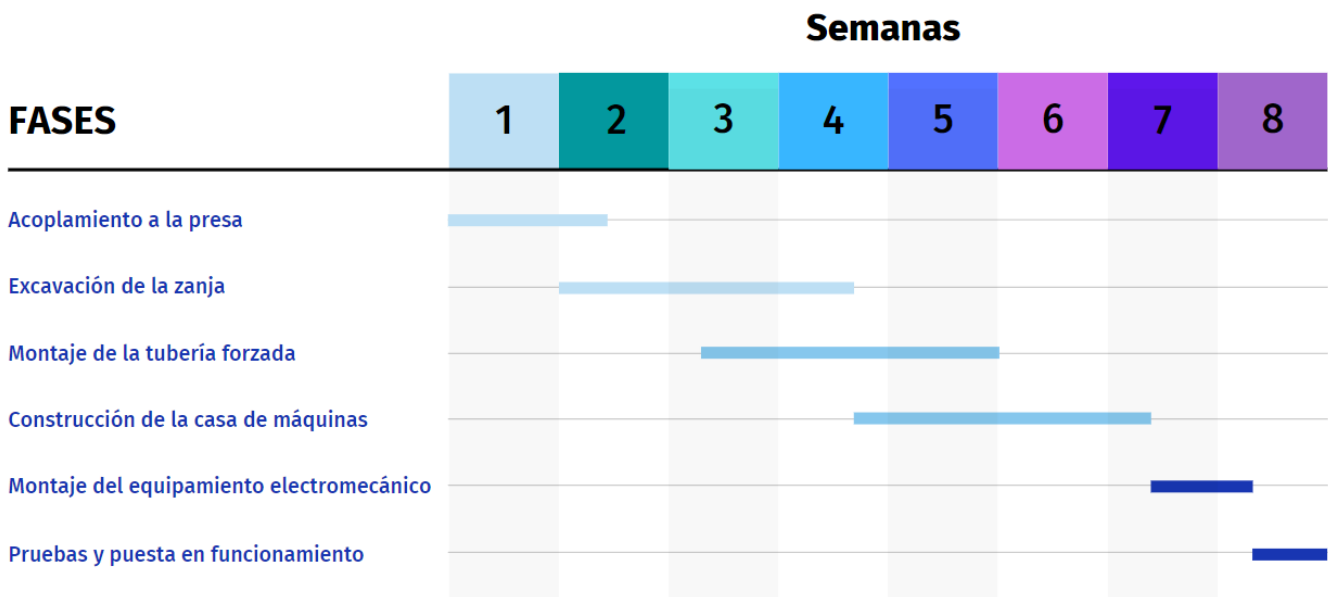


Ilustración 87: Diagrama mostrando los plazos que tomará cada fase del plan de implementación. Fuente propia

9. Plan de mantenimiento

Para que la instalación funcione correctamente durante el mayor periodo de tiempo posible, se procederá a realizar un plan de mantenimiento indicando los procedimientos a seguir para evitar problemas que puedan inhabilitar la central.

Por las características del proyecto, se ha diseñado una estructura simple, buscando la sencillez y la capacidad de funcionar de forma prolongada sin necesidad de supervisión técnica, como se indicó en el apartado [Metodología de trabajo](#). A continuación, se procede a enumerar estas tareas de mantenimiento.

- **Limpieza del acoplamiento a la presa y tubería forzada.** En una instalación de estas características, es de vital importancia que el agua que llega a la turbina a través de la tubería forzada esté libre de sedimentos y partículas que puedan dañar la turbina. Por este motivo, en las épocas en las que por las pocas o nulas precipitaciones, la instalación esté en desuso, se aprovechará para limpiar tanto la tubería utilizada para el acoplamiento a la presa, colocada a unos 50 cm de la base, como la tubería forzada dejando pasar agua por estas sin que pase por la turbina y liberándola por el canal de descarga. Además, la rejilla filtradora colocada a la entrada del acoplamiento será removida y limpiada para evitar posibles atascos en el futuro.
- **Limpieza del fondo del embalse.** De igual forma que con las tuberías y la rejilla, se aprovechará las épocas en las que la presa este vacía para retirar los sedimentos que se hayan acumulado en el fondo del embalse, evitando así posibles averías y atascos.
- **Comprobación del correcto funcionamiento de las válvulas.** Periódicamente se comprobará el buen estado y correcto funcionamiento de las válvulas utilizadas en la instalación, siendo esto fundamental para asegurar su durabilidad y evitar futuras averías.
- **Comprobación del estado del grupo turbina-generador.** Siguiendo las indicaciones del fabricante, se revisará regularmente el estado de la turbina y los distintos componentes del equipamiento electromecánico. También se revisará la limpieza y correcto funcionamiento del canal de descarga, evitando así atascos y averías.

10. Viabilidad económica

10.1 Financiación

Project Zimbabwe es una iniciativa sin ánimo de lucro, financiada principalmente a base de donaciones y eventos organizados por los integrantes de la organización. Este año, por culpa del Covid-19, ha sido especialmente difícil conseguir los fondos necesarios para llevar a cabo los diferentes proyectos planteados al no poder llevarse a cabo todos los eventos que se hubieran querido realizar. Las actividades que han podido llevarse a cabo son las siguientes:

- **Torneo de pádel.** Se llevó a cabo un torneo de pádel en el que la entrada costaba 20 euros por persona y había diferentes premios para los ganadores.



Ilustración 88: Cartel del torneo de pádel organizado por Project Zimbabwe. Fuente: Project Zimbabwe

- **Venta de camisetas y pulseras.** A principios del año 2020, surgió la idea de la fabricación y venta de camisetas y pulseras para recaudar fondos y a su vez aumentar la visibilidad de Project Zimbabwe, encargándose del diseño los propios integrantes de la organización. Este año, al ver la buena acogida que tuvo esta idea, se han continuado vendiendo camisetas y pulseras a 15 € y 2 € respectivamente.



Ilustración 89: Camisetas y pulseras de Project Zimbabwe. Fuente: Project Zimbabwe

- **Sorteo.** Se llevó a cabo una rifa en la que se compraban papeletas a 2 euros y se sorteaban diferentes productos proporcionados por las marcas que se pueden ver en la [ilustración 90](#).

SORTEO BENÉFICO



MARCAS COLABORADORAS



Ilustración 90: Cartel del sorteo realizado por Project Zimbabwe. Fuente: Project Zimbabwe

Al no haber sido posible viajar a Zimbabue para realizar los proyectos, el dinero recaudado se utilizará para poder realizarlos en 2022 en su totalidad.

10.2 Presupuesto

| | ud | Descripción | Medición | Precio unitario [€] | Total [€] |
|----------|----|--|----------|---------------------|--------------|
| A | | Acoplamiento a la presa | | | |
| A1 | ud | Pasamuros de chapa para tubería de Ø160mm. Incluido p.p material de sellado, suministro y colocación | 2 | 30 | 60 |
| A2 | ud | Reja de desbaste. Incluido suministro y colocación | 1 | 80 | 80 |
| A3 | ud | Válvula de compuerta Ø160mm. Incluido suministro y colocación | 1 | 85 | 85 |
| A4 | ml | Tubería de PVC Ø160mm. Incluido suministro y colocación. | 23,8 | 4,5 | 107,1 |
| | | Subtotal | | | 332,1 |
| B | | Tubería forzada | | | |
| B1 | m3 | Excavación de la zanja | 41,46 | 2 | 82,92 |
| B2 | m3 | Arena para la cama y el recubrimiento de la tubería en la zanja | 18,4 | 4 | 73,6 |
| B3 | m3 | Relleno de zanja con tierra de excavación | 18 | 1,5 | 27 |
| B4 | m3 | Hormigón para los anclajes, incluido p.p el acero y el encofrado. Incluido suministro y colocación | 0,09 | 100 | 9 |
| B5 | ml | Tubería de PVC Ø160mm, incluidos p.p los codos y uniones. Incluido suministro y colocación. | 250,4 | 6,6 | 1652,64 |

| | | | | | |
|----------|----|---|-------|------|----------------|
| B6 | ud | Válvula de mariposa Ø160mm. Incluido suministro y colocación | 1 | 85 | 85 |
| | | Subtotal | | | 1930,16 |
| C | | Casa de máquinas | | | |
| C1 | ud | Acoplamiento de la tubería forzada Ø160mm a la edificación. Incluido p.p material de sellado, suministro y colocación | 2 | 30 | 60 |
| C2 | m2 | Excavación para losa de cimentación de 10cm de espesor | 6,25 | 2 | 12,5 |
| C3 | m2 | Hormigón para losa de cimentación de 10cm de espesor. Incluido suministro y colocación | 0,625 | 100 | 62,5 |
| C4 | m2 | Mallazo de obra 15 / 15 / 4. Incluido suministro y colocación | 6,25 | 16 | 100 |
| C5 | m2 | Muro de bloques de hormigón. Incluido suministro y colocación | 16,6 | 18,1 | 300 |
| C6 | ud | Grupo turbina-generador Banki-Michell Ossberger, incluidos sistemas de regulación, control y protección suministrados por el fabricante. Incluido suministro y colocación | 1 | 3200 | 3200 |
| C7 | m2 | Cubierta de chapa metálica, incluidas viguetas de sujeción. Incluido suministro y colocación. | 7 | 40 | 280 |

| | | | | | |
|----------|----|--|-----|-------|---------------|
| C8 | ml | Construcción canal de descarga, incluido p.p el hormigón y encofrado. Incluido suministro y colocación | 2 | 150 | 300 |
| | | Subtotal | | | 4315 |
| D | | Seguridad y salud | | | |
| D1 | ud | Mascarillas | 100 | 0,11 | 11 |
| D2 | ud | Cascos de obra | 15 | 5 | 75 |
| D3 | ud | Botas de seguridad | 30 | 20 | 600 |
| D4 | ud | Guantes de trabajo | 30 | 2 | 60 |
| D5 | ud | Gafas de protección | 15 | 2 | 30 |
| | | Subtotal | | | 776 |
| E | | Otros | | | |
| E1 | % | Imprevistos y costes indirectos | 10 | 73,53 | 735,33 |
| | | Total | | | 8088,6 |

11. Bibliografía

- [1] **RODESIA DEL SUR.** (2019, 12 noviembre). Países desaparecidos y antiguas colonias - Missing countries and former colonies - s. XX.
<https://paisdesdesaparecidos.wordpress.com/rodesia-del-sur/>
- [2] **Dólar zimbabuense.** Wikipedia, la enciclopedia libre.
https://es.wikipedia.org/wiki/D%C3%B3lar_zimbabuense
- [3] **Zimbabue - Religiones 2010.** (2017, 12 septiembre). datosmacro.com.
<https://datosmacro.expansion.com/demografia/religiones/zimbabue>
- [4] **Meteoblue, Zimbabue.**
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/zimbabwe_zimbawe_878676
- [5] **ONU. Objetivos y metas de desarrollo sostenible.** Desarrollo Sostenible.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- [6] **Solargis. Datos solares bancables para tomar mejores decisiones.**
<https://solargis.com/es>
- [7] **Nuevo manual de energía eólica de África | REVE Actualidad del sector eólico en España y en el mundo.** (2019, 9 octubre).
<https://www.evwind.com/2019/10/09/nuevo-manual-de-energia-eolica-de-africa/>
- [8] **AFRICA, ¿EL MERCADO HIDROELÉCTRICO DEL MAÑANA? > HIDROPROYECTOS INGENIEROS CONSULTORES.** Hidro Proyectos.
<http://www.hidroproyectos.com/n.php?n=AFRICA,-%C2%BFEL-MERCADO-HIDROEL%C3%89CTRICO-DEL-MA%C3%91ANA?>
- [9] **Milena Trujillo, A. (2017). Diseño de una pico central hidroeléctrica en la localidad de Usme, Bogotá.**
<https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15273>
- [10] **Central hidroeléctrica.** Wikipedia, la enciclopedia libre.
https://es.wikipedia.org/wiki/Central_hidroel%C3%A9ctrica
- [11] **IDAE. (2006). Minicentrales hidroeléctricas.** IDAE.es.
https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Minicentrales_hidroelectricas_125f6cd9.pdf

- [12] *Hidráulica Juan Jose García-Egocheaga*. Hidráulica Juan José García-Egocheaga Incosol.
<https://www.juanjosegarciaegocheaga.com/hidrulicaorigenes.html>
- [13] *Las acequias y las aguas muertas. Murcia y el agua. Historia de una pasión*.
http://www.asambleamurcia.es/sites/external/murcia_agua/cap6.2.htm
- [14] Wikipedia. (2019, 10 octubre). *Presa de gravedad*. Wikipedia, la enciclopedia libre.
https://es.wikipedia.org/wiki/Presa_de_gravedad#/media/Archivo:Willowcr.jpg
- [15] Á. (2020, 25 septiembre). *Principales tipos de presas y su clasificación*. MÁS QUE INGENIERÍA.
<https://masqueingenieria.com/blog/tipos-de-presas-y-su-clasificacion/>
- [16] Redondo, M. A. M. (2020, 22 septiembre). *Fundamentos básicos de hidráulica (I)*. iAgua.
<https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/fundamentos-basicos-hidraulica-i>
- [17] P. (2020, 20 de diciembre). *Cálculo de pérdidas de carga*. Pirobloc.
<https://www.pirobloc.com/blog-es/calculo-perdidas-carga/>
- [18] Noguera, I. B. (2021, 5 febrero). *Flujo turbulento en ingeniería química*. Ingeniería Química Reviews.
<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/02/flujo-turbulento-en-ingenieria-quimica.html>
- [19] Diagrama de Moody | *La guía de Física*. (2011, 23 agosto).
 fisica.laguia.2000.com
<https://fisica.laguia2000.com/complementos-matematicos/diagrama-de-moody>
- [20] Redondo, M. A. M. (2017, 20 septiembre). *¿Qué es la cavitación? ¿Cómo evitarla?* iAgua.
<https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/que-es-cavitacion-como-evitarla>
- [21] Oliveras, J. (2015, 13 enero). *Cómo calcular el golpe de ariete*. HidrojING.
<https://www.hidrojing.com/como-calcular-el-golpe-de-ariete/>
- [22] Universidad Politécnica de Cartagena. (2016). *Máquinas Hidráulicas. Teoría y problemas*. upct.es.
<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5476/isbn9788416325191.pdf>
- [23] Vega, J. *TURBOMAQUINAS*. unet.edu.
http://www.unet.edu.ve/%7Efenomeno/F_DE_T-164.htm

- [24] Universidad Nacional Autónoma de México. (2014). *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*. ingenieria.unam.mx.
https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECYDIMENSIONAMIENTOdeTURBINAS.pdf
- [25] Universidad Nacional del Comahue, Neuquén. (1992). *Metodología de diseño y cálculo de una turbina de flujo transversal*.
<https://luisalderonf.files.wordpress.com/2012/01/turbina-m-banki.pdf>
- [26] Universidad del País Vasco. *Principio de funcionamiento de las turbomáquinas*. ocw.ehu.eus.
https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/40262/mod_resource/content/1/maquinas_fluidos/tema-3-principio-de-funcionamiento-de-turbomaquinas.pdf
- [27] Gutiérrez, P. Z. (2016, 22 diciembre). *Predimensionamiento de turbinas Kaplan y Pelton*. TÉCNICA INDUSTRIAL.
<https://www.tecnicaindustrial.es/predimensionamiento-de-turbinas-kaplan-y-pelt/>
- [28] Andreev, V. (s. f.). *Esquema general de una central #hidroeléctrica* | Hidroelectricas, Energia hidroelectrica. Pinterest.
<https://www.pinterest.es/pin/799740846299648413/>
- [29] *Turbina OSSBERGER® de flujo cruzado: Ossberger*.
<https://ossberger.de/es/tecnologia-hidraulica/turbina-ossbergerr-de-flujo-cruzado/>
- [30] *Sistemas de apoyos* - Monografias.com.
<https://www.monografias.com/trabajos84/sistemas-apoyos-minicentrales-derivacion/sistemas-apoyos-minicentrales-derivacion.shtml>