



Trabajo de Fin de Grado: Diseño y ejecución de una
instalación hidráulica
para recuperación de la energía en una comunidad
rural de Mount Darwin, Zimbabue.

Autor: José Hernández Álvarez

E-mail: Pepirohdez@gmail.com

Nº de matrícula: 201602460

Director: Manuel Moreno García

Teléfono de contacto del director: 660244397

E-mail del director: Manuelmoreno81@gmail.com

INDICE

RESUMEN	8
RESUME	8
1. CONTEXTO DEL PROYECTO	10
1.1. INTRODUCCION	10
1.2. MOTIVACION	12
1.3. ANTECEDENTES Y SITUACION ACTUAL DEL PAIS	13
1.3.1.Demografía	14
1.3.2.Cultura	15
1.3.3.Economía	16
1.3.4.Historia	18
1.3.5.Conclusión	19
1.4. METEOROLOGIA Y TERRENO	20
1.4.1.Clima	20
1.4.2.Precipitaciones	21
1.4.3.Geografía del terreno	22
1.5. POSIBLES SOLUCIONES DEL PROYECTO	23
1.5.1.Tornillo de Arquímedes	23
1.5.2.Instalación hidráulica de bombeo	25
1.5.3.Central hidroeléctrica reversible	25
1.5.4.Solución escogida	27
1.6. OBJETIVOS DEL PROYECTO	27
1.7. ALINEACION CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)	28
1.8. METODOLOGIA DE TRABAJO	29
1.9. RECURSOS A EMPLEAR	31
2. INTRODUCCION AL PROYECTO	32
2.1. MARCO HISTORICO	32
2.1.1.Mecánica de fluidos	32
2.1.2.Fluido	34
2.1.3.Antecedentes	36
2.2. CICLO DEL AGUA	41
2.3. MICROCENTRAL HIDROELECTRICA DE BOMBEO	42
2.3.1.Propiedades de la energía hidráulica	43
2.3.2.Partes de una central hidroeléctrica de bombeo	44

2.3.3.Funcionamiento.....	45
2.3.4.Otros tipos de instalaciones que obtienen energía hidráulica	47
2.4. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE UNA BOMBA.....	48
2.4.1.Salto hidráulico y altura hidráulica	48
2.4.2.Leyes de funcionamiento	51
2.4.3.Potencias y rendimientos hidráulicos.....	53
2.4.4.Caudales.....	56
2.4.5.Fenómenos a evitar	57
2.4.6.Leyes de semejanza dinámica	59
2.4.7.Número específico de revoluciones	62
2.5. MAQUINAS HIDRAULICAS: BOMBA HIDRAULICA	63
2.5.1.Estudio de partes de una bomba.....	64
2.5.2.Tipos de bombas	67
2.5.3.Pérdidas en la bomba	68
2.5.4.Triángulos de velocidades en las bombas	69
2.5.5.Curvas características de una bomba	70
3. DESARROLLO DEL PROYECTO	72
3.1. DATOS Y OBSERVACIONES INICIALES	72
3.2. CALCULOS PREVIOS.....	74
3.3. PROPUESTA DE PROYECTO	80
3.4. CALCULO ENERGETICO DE LA COMUNIDAD	86
3.5. PRESUPUESTO.....	92
3.6. PLAN DE EJECUCION	95
4. CONCLUSION DEL PROYECTO	97
4.1. BIBLIOGRAFIA	98
4.2. INDICE DE FIGURAS	98
4.3. INDICE DE TABLAS	101
5. ANEXO	102
5.1. EXECUTION PLAN	102

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título “Diseño y ejecución de una instalación hidráulica para la recuperación de la energía en una comunidad rural de Mount Darwin, Zimbabue”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2020/2021 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.: José Hernández Álvarez

Fecha: 20/08/2021



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Manuel Moreno García

Fecha: 22/08/2021



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. **Rodrigo Ruano Pérez**

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) Reproducirla 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 23 de agosto de 2020.

ACEPTA

Fdo.: José Hernández Álvarez



RESUMEN

El proyecto trata la solución a dos de los problemas que tiene la comunidad: regar las plantaciones de la escuela de FP de agricultura y la recuperación de la energía hidráulica excedente de la turbina. Este proyecto es de carácter social y no tiene ningún ánimo de lucro.

Se va a estudiar el terreno de las coordenadas de la presa y el cauce del agua turbinada, el fluido con el que se va a trabajar y la mecánica de fluidos que hay detrás de este proyecto. Después de esto, se va a elegir una de las soluciones propuestas y se va a intentar que sea lo más robusto y barato, posible para que no se estropee con el paso del tiempo.

La instalación elegida va a constar de una bomba hidráulica, una serie de tuberías y unas válvulas para dirigir el flujo del agua. La bomba a su vez va a estar envuelta en una estructura metálica para su amarre en el cauce del agua. La energía necesaria para la bomba se va a coger de la generación de la turbina, cuando a esta le sobre un excedente o cuando nosotros queramos usarla.

En conclusión, es un proyecto sostenible, ya que es social, ecológico y económicamente viable, y que va a generar un gran desarrollo en la comunidad con la generación de alimento que van a poder consumir y exportar.

RESUME

The project addresses the solution to two of the community's problems: irrigating the plantations of the VET school of agriculture and recovering the excess hydropower from the turbine. This project is of a social nature and has no profit motive.

We are going to study the terrain of the coordinates of the dam and the channel of the turbinated water, the fluid with which we are going to work and the fluid mechanics behind this project. After this, you will choose one of the proposed solutions and you

will try to make it as robust and inexpensive as possible so that it does not spoil over time.

The chosen installation will consist of a hydraulic pump, a series of pipes and valves to direct the flow of water. The pump in turn will be wrapped in a metal structure for mooring in the water bed. The energy needed for the pump is going to be taken from the generation of the turbine, when it is over a surplus or when we want to use it.

In conclusion, it is a sustainable project, since it is socially, ecologically and economically viable, and it will generate a great development in the community with the generation of food that they will be able to consume and export.

CONTEXTO DEL PROYECTO

INTRODUCCION

El proyecto a desarrollar trata del diseño y creación de una instalación hidráulica que sirva tanto para la recuperación de energía de una presa bombeando el agua al embalse, como el riego de las plantaciones de la escuela de formación profesional de agricultura que hay en esta comunidad. Este proyecto está en relación con los de otros dos compañeros de la escuela, que en conjunto resultará en una central hidráulica completa. El proyecto global está formado de una presa con un embalse, una instalación hidráulica con una turbina y una instalación hidráulica de bombeo. Estos tres proyectos se llevan a cabo bajo la supervisión de una ONG llamada “Project Zimbabwe”, la cual destina su recaudación en la creación de proyectos sociales para el desarrollo de comunidades en Zimbabwe.

En Zimbabwe, por lo que se ha encontrado en webs que hablan del país, hay muchos proyectos de presas realizados, por lo que se puede catalogar como algo común el realizar un proyecto de estas características en este país. Las presas que se han encontrado que más se pueden parecer a este proyecto por su capacidad son:

- Presa de Harara, en Chitungwiza, realizado en 1973 y con una capacidad de 9 metros cúbicos.
- Presa de Pampoenpoort, en la región de Matabeleland norte, se terminó de construir en 1970 con una capacidad de 8 metros cúbicos.
- Presa de Odzani, en Penhalonga, construida en 1965 y con 6 metros cúbicos de capacidad.
- Presa de Mutange, en Gokwe, realizado en 2016 y con una capacidad de 5 metros cúbicos.



Figura 1. Presa de Mutange

El diseño de la instalación se llevará a cabo el segundo cuatrimestre del curso 20/21, en donde se tendrá que elegir una bomba hidráulica que consiga hacer que el agua circule desde la salida de la presa hasta el embalse de la misma, haciendo así que se almacene energía potencial para que cuando sea necesaria, se pueda extraer. Además, con el proyecto se logrará conseguir una mayor eficiencia en el aprovechamiento de la energía almacenada en el agua del embalse.

Aparte de la bomba, se tendrá que diseñar la instalación que guiará el agua a través de la bomba, las tuberías. Para el diseño de la instalación, se tendrá que realizar una serie de cálculos para definir el caudal que mueve la bomba, la altura a la que hay que subir el agua, la energía necesaria y una serie de parámetros que definiremos más adelante; y evitar así, posibles complicaciones como la cavitación. Luego, se definirá la longitud de la tubería, el diámetro, la forma y el material del que tiene que estar formado.

Se tendrá que realizar un estudio de la zona y del terreno para sacar conclusiones sobre sus características, obteniendo datos para calcular el caudal y la energía necesaria que hay que transmitirle al agua para subirla al embalse, así como los meses de lluvias, y sequías, y cuánta agua podemos disponer en el embalse.

El proyecto se va a instalar posteriormente en una comunidad de Zimbabue llamada Mount Darwin, que se ubica en el norte del país. El objetivo del proyecto es que se consiga que el suministro de energía a la comunidad sea continuo, y hasta en los meses donde no haya lluvia, se consiga aprovechar el agua que queda para sacarle el máximo rendimiento energético posible.

El proyecto, al ser construido para los habitantes de la comunidad, se tendrá que intentar que se involucren al máximo para que lo sientan como suyo y lo cuiden. De hecho, hay que tratar de hacerlo lo más sencillo posible, para que si ocurre algo cuando nuestro equipo no esté, ellos sepan manejar los distintos dispositivos que se les va a implantar. Además, se intentará que el proyecto sea lo más barato posible sin escatimar en seguridad y durabilidad del mismo.

Todo esto estará bajo el amparo de unos Objetivos de Desarrollo Sostenible, los cuales dotarán al proyecto de una plusvalía, al preocuparse de ciertos temas que ayudarán a la sociedad a desarrollarse y a mejorar, los cuales se definirán más adelante y se explicará su relación con el proyecto.

Por último, se tendrá que explicar con claridad el modo a llevar a cabo toda la realización e instalación del proyecto para que la mano de obra, los habitantes de la comunidad, no tengan ninguna duda a la hora de ponerse a trabajar. Esto hará que el proyecto se realice de forma más eficaz y se pueda terminar en menos tiempo.

MOTIVACION

La motivación para llevar a cabo este proyecto es tanto personal como profesional. La decisión para llevarlo a cabo fue instantánea cuando me enteré que podía hacer un Trabajo de Fin de Grado que sirviera para ayudar a personas que realmente lo necesitaban.

El proyecto va a ayudar a mucha gente de la aldea de Mount Darwin para que tengan acceso a electricidad y agua de forma más efectiva que la que tienen actualmente. Me llena de alegría tener la oportunidad de ayudarles y, además, es un ejemplo que damos a nuestro círculo de amigos y familiares de que hay que intentar ser solidarios y ayudar siempre en todo lo que podamos a la gente menos favorecida. Creo que no hablo por mí solo al decir que la educación que nos han dado y las oportunidades que hemos recibido, son una clara motivación para ayudar a todo aquel que no las ha tenido y, además, tenemos la obligación de poner nuestros conocimientos al servicio de la sociedad, para devolverle todo lo que nos ha dado.

Por otro lado, creo que también es importante recalcar que la posibilidad de llevar a cabo un proyecto de este tipo con los directores que tenemos y el grupo que somos en “Project Zimbabwe”, es una oportunidad de aprendizaje única, que me va a ayudar tanto en el conocimiento de cómo desarrollar proyectos y mejorar en el trabajo en equipo, ya que este proyecto se combina con otros, que conjuntamente forman una central hidráulica. El saber desarrollar proyectos, me ayudará en un futuro para tener, por lo menos, una base sobre cómo llevar a cabo el diseño y la instalación del proyecto. Además, en el primer cuatrimestre del 4 curso de GITI, hemos tenido Turbomáquinas, lo que me ha concedido unos buenos conocimientos sobre cómo funcionan tanto las máquinas como las centrales hidráulicas, así que podré explicar con claridad todos los aspectos técnicos de la instalación.

Por último, el poder viajar al extranjero y hacer voluntariado es una oportunidad única que creo que no se puede dejar escapar y que es el momento idóneo para realizar, ya que cuando tenga más responsabilidades, tales como familia, trabajo, etc, no podré sacar tiempo para hacerlo. Por todo esto, creo que va a ser una experiencia muy enriquecedora, ya que, al conocer otras mentalidades y formas de vivir, podemos moldear un poco la nuestra y vamos a aprender mucho de esta comunidad. Por todo esto, no veo la necesidad de pensar si me gustaría hacer otro TFG, ya que este cumple con todas mis expectativas por adelantado.

ANTECEDENTES Y SITUACION ACTUAL DEL PAIS

En este apartado hablaremos sobre Zimbabwe desde diferentes ámbitos, tanto el social, cultural, económico, histórico y político. Zimbabwe es un país situado en el interior del sur de África como podemos ver en la Figura 2, que cuenta con un clima tropical seco con unas temperaturas templadas gracias a la altitud del país. Su nombre viene de la lengua Shona, su lengua nativa, y significa “grandes casas de piedra” en referencia a la capital del Imperio del Gran Zimbabwe.



Figura 2. Situación geográfica del país

Demografía

Desde el punto de vista social, Zimbabwe es un país en el que el 98,8% de la población es originaria de África con una demografía de 14 645 468 habitantes. Esto no ha sido siempre así, ya que, en el 1890 el país pasó a ser colonia del Imperio Británico haciendo que mucha gente emigrara a este país. La población se divide en dos razas predominantes: los Shonas, que conforman un 80-85% de la sociedad, y los Ndebele un 8-10%. Tiene una densidad de población de 37 habitantes por km² y una superficie total de 390.760 km².

En el Índice de Desarrollo Humano que desarrolla las Naciones Unidas, la población de Zimbabwe se encuentra en una posición que indica que los zimbabuenses tienen una mala calidad de vida, esto es debido a la situación económica que atraviesa el país, la cual veremos más adelante. Los distintos parámetros de la situación socio-demográfica del país los podemos observar en la Figura 3, en la cual vemos que tiene una baja esperanza de vida en comparación con occidente, pero tiene una tasa de natalidad muy superior a la

de mortalidad. Esto significa que la población crece notablemente y que la sociedad es mayoritariamente joven.

Socio-Demografía		
Densidad [+]	2019	37
Ranking Paz Global [+]	2020	131º
% Inmigrantes [+]	2019	2,81%
% Emigrantes [+]	2019	6,38%
Tasa Natalidad [+]	2018	30,68‰
Remesas enviadas (M.\$) [+]	2017	46,3
Tasa mortalidad [+]	2018	7,88‰
Índice de Fecund. [+]	2018	3,62
Población [+]	2019	14.645.468
Inmigrantes [+]	2019	411.257
Emigrantes [+]	2019	933.654
IDH [+]	2019	0,571
Ranking de la Brecha de Género [+]	2018	47º
Esperanza de vida [+]	2018	61,20
Suicidios [+]	2015	1.641
Suicidios por 100.000 [+]	2015	11,71
Número de Homicidios [+]	2012	981
Homicidios por 100.000 [+]	2012	7,48

Figura 3. Parámetros Socio-Demográfico

Cultura

En el ámbito cultural, Zimbabwe tiene muchas culturas diferentes con distintas costumbres, que han logrado respetarse tanto por parte de los indígenas, como por los emigrantes que trajeron su religión y su forma de vida. La cultura más aceptada en el país es la Shona, que es originaria de Zimbabwe, y es la lengua nativa del país, la cual es aceptada por el 98%. La otra cultura más dominante es la occidental, ya que fue

implantada por la población del Imperio Británico que emigró a este país. El inglés es el idioma oficial del país, pero se siente como si fuera la segunda, siendo solo aceptada como nativa por el 2% de la población. El inglés es muy hablado en las ciudades, pero fuera de ellas predominan el Shona y el Ndebele.

Zimbabue es un país cristiano con un 45% de la población que práctica la religión por el hecho de haber sido colonia británica; pero hay una religión nativa, el culto Mwari, que es la segunda religión más practicada, y se centra en el culto a los ancestros y la intercesión espiritual, siendo Mwari su ser supremo con el que se comunican.

La educación es un privilegio en este país, por lo que los padres están tremendamente orgullosos de los jóvenes que quieren estudiar e ir a la universidad. Aun así, si no lo consiguieran, no se les estigmatizaría. La mayoría de la población se dedica a trabajos artesanos o físicos, siendo el campo el lugar de trabajo más concurrido. El campo mayoritariamente es de la gente blanca, que, aunque sea solamente el 1% de la población, aglutina en su propiedad el 70% de las tierras.

La vestimenta tradicional de Zimbabue es una tela envolvente, una prenda de abrigo para la cabeza y una serie de pendientes y collares. El traje tradicional de las mujeres está adornado con un montón de trabajos de cuentas, y suelen ser muy coloridos. El atuendo representa la edad de la mujer y su rango dentro de la sociedad. Las mujeres casadas usan tradicionalmente una manta, llamada “nguba” sobre sus hombros y un conjunto de aros de cuentas llamados “isigolwani” ubicados en el cuello y las piernas. Además, lleva una serie de anillos de latón o cobre llamados “idzilla” en las manos, piernas y cuello. Las mujeres casadas también se cubren la cabeza en señal de respeto hacia sus maridos. La prenda tradicional de los hombres es una coraza llamada “iporiyana”.

Economía

Desde el punto de vista económico, Zimbabue está en la posición 162 de 196 en el ranking del PIB, según datos económicos de Expansión, con un PIB per cápita de 1140 dólares americanos. Esto significa que la población de este país vive con un bajísimo nivel de vida, debido mayoritariamente a una crisis económica provocada por la pésima gestión

del gobierno de Mugabe, antiguo Presidente del país, que ha dejado una hiperinflación, falta de divisas y una escasez de provisiones. También, la participación en la guerra en la República Democrática del Congo, desde 1998 hasta 2002, significó una pérdida de cientos de millones de dólares. Debido a la hiperinflación, Zimbabwe tuvo que adoptar el dólar americano como moneda oficial del país.

La economía del país se centra en el turismo, las exportaciones agrícolas y minerales. El turismo es muy fuerte debido a la gran fauna y flora del país que atrae cada año a más de 2,6 millones de personas, siendo las Cataratas Victoria es el paraje más famoso del país. A la par que el turismo estaría la agricultura, que genera cada año más de 3,3 millones de toneladas de caña de azúcar, 730 mil toneladas de maíz y 132 mil toneladas de tabaco (6º productor mundial). Aunque parezca que el país tiene recursos de sobra, la dura verdad es que la mayoría de la población no come más que un potaje de harina de maíz con agua llamado bota; la mayoría de la producción sirve para la exportación y el aumento de la riqueza de unos pocos. En este país hay una gran riqueza de minerales como el carbón, menas del cromo, asbestos, oro, níquel, cobre, menas del hierro, vanadio, litio, hierro y platino.

Como podemos observar en la Figura 4, los datos económicos del país dejan mucho que desear, teniendo una deuda del 37,34% del PIB, un gasto publico bastante bajo y un puesto siempre por debajo de la media en todos los rankings.

Economía de Zimbabwe		
Cuentas Nacionales - Gobierno		
PIB anual [+]	2019	16.703M.€
PIB Per Capita [+]	2019	1.140€
Deuda total (M.€) [+]	2018	6.586
Deuda (%PIB) [+]	2018	37,34%
Deuda Per Cápita [+]	2018	456€
Déficit (M.€) [+]	2018	-794
Déficit (%PIB) [+]	2018	-4,50%
G. Público (M.€) [+]	2018	3.113,4
Gasto Educación (M.€) [+]	2018	812,4
Gasto Educación (%Gto Pub) [+]	2018	19,04%
Gasto Salud (M.€) [+]	2017	663,7

G. Salud (%G. Público Total) [+]	2017	15,23%
Gasto Defensa (M.€) [+]	2019	116,7
Gasto Defensa (%Gto Pub) [+]	2019	3,21%
Gasto público (%PIB) [+]	2018	17,65%
Gasto público Per Capita [+]	2018	216€
Gasto Educación Per Capita [+]	2018	56€
G. Público Salud Per Capita [+]	2017	50€
Gasto Defensa Per Capita [+]	2019	8€
Índice de Corrupción [+]	2018	22
Ranking de Competitividad [+]	2019	127°
Índice de Fragilidad [+]	2018	102,3
Ranking de Trans. [+]	28/09/2018	96°
Ranking de la Innovación [+]	2018	113°

Figura 4. Datos económicos de Zimbabwe

Historia

En el ámbito histórico y cultural, se podrían citar unos cuantos hechos históricos importantes. En 1867 se encuentra oro por primera vez en este país, por lo que llama mucho la atención de los europeos, en especial de los britanos. En 1885, el Imperio Británico coloniza el país y le asigna el nombre de Rodesia, en honor al promotor de la constitución, Cecil Rhodes, y se divide el territorio en Rodesia del Sur y del Norte, siendo la Sur la que más se llega a desarrollar. En los años de colonialismo, el país se desarrolla creando grandes infraestructuras y creando una economía próspera. Unos cuantos años después, en 1964, el Reino Unido concedió la independencia a Rodesia del Norte, no así a Rodesia del Sur, ya que, hasta que no hubiera un gobierno de la mayoría votado libremente por sufragio. Un año después, sería Ian Smith el que declararía unilateralmente la independencia de Rodesia del Sur, creando una nueva constitución y dándole el nuevo nombre de República de Rodesia.

En 1969, empezaría una guerra civil en el país que duraría 10 años hasta 1979, y que fue seguida de la elección de Abul Muzorewa como Presidente del país, ahora denominado República de Zimbabwe y reconocido por la ONU como tal. El cargo de Presidente del país le fue concedido a Robert Mugabe, que ya ejercía de líder desde 1980, en 1987, tras

ganar las elecciones, y estaría en el poder durante 37 años, hasta que recientemente, fue sustituido por un golpe de estado, debido al desacuerdo del país con sus políticas en 2017. Robert, empezó siendo un líder socialista que quería devolver las tierras a los de su raza expropiándoselas al 1% de población blanca que había en el país. Al hacer esto realidad, hubo muchos altercados y el reparto de las tierras fue muy polémico, otorgándose muchos territorios a gente que estaba gobernando con Mugabe en ese momento. Esto llevo a que organizaciones internacionales, le impusieran varias multas y dejara al país con una gran deuda. Estas sanciones, la participación en la guerra del Congo, la poca transparencia en las votaciones y la crisis económica, llevo al gobierno de Robert Mugabe a la quiebra, propiciándose un golpe de estado en 2017 que hasta día de hoy persiste en el poder.

Conclusión

Relacionando todo esto con el proyecto, nos tenemos que dar cuenta de que es una sociedad totalmente diferente a las europeas, aunque hayan tenido influencia colonial, y que hay que tratar de realizar el proyecto respetando la cultura y la forma de vida de la población. Actualmente, en el sitio donde se va a instalar el proyecto hay una presa que da agua a la comunidad, aunque el problema que tiene es que pierde demasiada agua y es poco eficiente, por lo que es necesario volver a construirla. Trabajando sobre la eficiencia de esta nueva presa es de lo que se va a encargar el proyecto, siendo este de ámbito social a la vez que ecológico, por lo que resultará ser un proyecto soportable, como podemos observar en la Figura 5, ya que no se va a explotar económicamente.

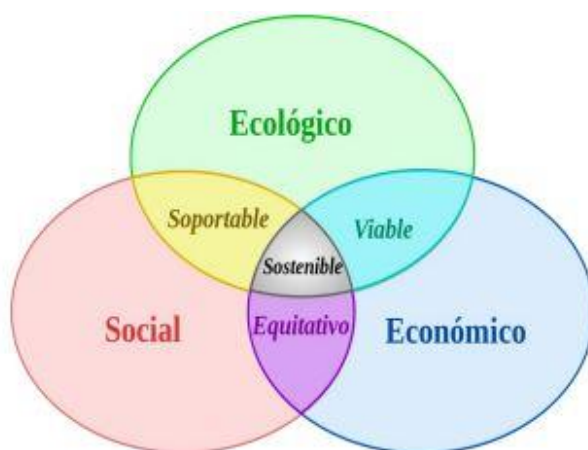


Figura 5. Pilares de la economía sostenible

METEOROLOGIA Y TERRENO

Para conocer los problemas que hay en este país con la falta de agua, vamos a revisar las condiciones meteorológicas del país. El país está situado debajo del ecuador, lo que concede un clima subtropical donde hay una estación de verano que dura 8 meses, desde octubre hasta abril, con una temperatura media de 29,7 grados centígrados. Está situada en una meseta que varía entre 1200 a 1600 metros, que consigue aliviar el clima.

Clima

Existen tres temporadas principales:

- 1) La primera va de noviembre a marzo y se caracteriza por ser una temporada de lluvias, pero con el factor de que es calurosa, y por consiguiente muy húmeda. De marzo a mayo sigue siendo calurosa, pero las lluvias amainan, llegando a ser escasas.
- 2) De mayo a agosto hay una temporada que es fresca, con muy escasas precipitaciones y pocas nubes, lo que hace que sea soleada.
- 3) De agosto a noviembre hay una época muy calurosa y seca, que se ameniza con la llegada en noviembre de las lluvias.

El conjunto de temporadas y diferentes tipos de climas lo podemos ver reflejados en la Figura 6, que nos muestra tanto las precipitaciones, el calor y la humedad a lo largo de todos los meses del año.

En este tipo de proyecto necesitamos un clima en que haya una cantidad necesaria de lluvias que nos permita almacenar el agua en una presa y regular la salida del agua en

función de la energía que se necesite. Si se diera el caso en el que se tiene que abrir la presa, entraría en funcionamiento la bomba hidráulica para recuperación de la energía.

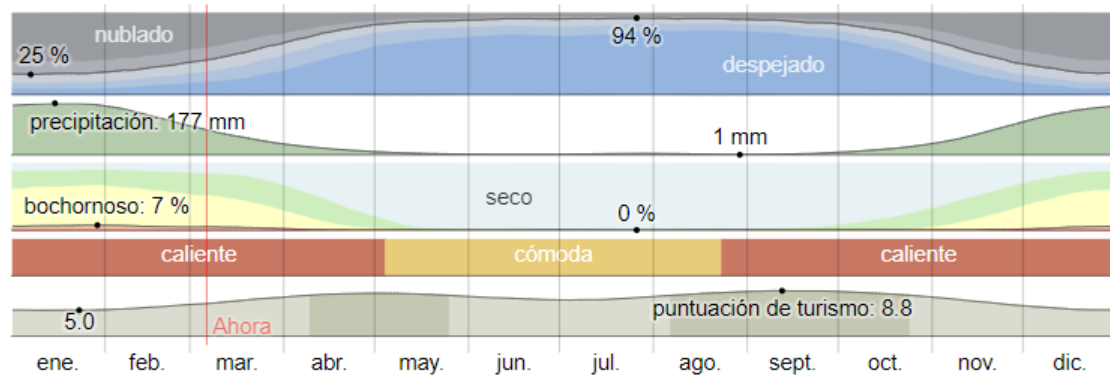


Figura 6. Clima de Zimbabwe

Precipitaciones

Un dato muy importante a destacar son las precipitaciones que se producen en cada mes del año, como se puede observar en la Figura 7, que nos da una idea de la necesidad de almacenar el agua que cae de lluvia para poder así superar las épocas secas. También se puede observar que en todos los meses hay 15 o más días en los que no llueve, y de mayo a agosto, hay unos meses en los que la mayor cantidad que precipita es de 10 mm.

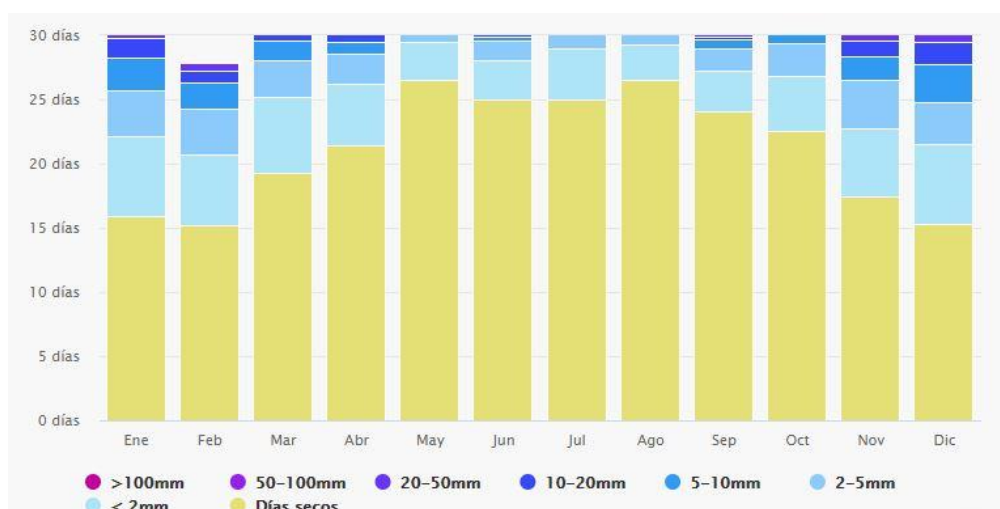


Figura 7. Precipitaciones en los diferentes meses

Por todas estas características climatológicas, el proyecto tiene un gran sentido, ya que como vamos a ver en los objetivos del proyecto, este dotará de un suministro de agua y electricidad a la comunidad, haciendo que no haya pérdida de agua ni de energía en la mayoría del tiempo.

Geografía del terreno

Por otra parte, cuando queremos hablar del terreno, nos hace falta un estudio de la zona en la que vamos a realizar el proyecto, como son las curvas de nivel que se pueden observar en la Figura 7, que hemos obtenido gracias a un programa de Internet. Este programa obtiene las curvas de nivel de la zona del mapa de Google Maps que le indique. Gracias a esta información, se puede obtener el salto que tiene la presa, el cual se ha calculado que será de 3 metros aproximadamente; y se pueden coger muchas medidas, no del todo precisas, que nos ayudarán en el diseño del proyecto. La línea roja que se puede observar en la Figura 8 es donde está situada la presa.

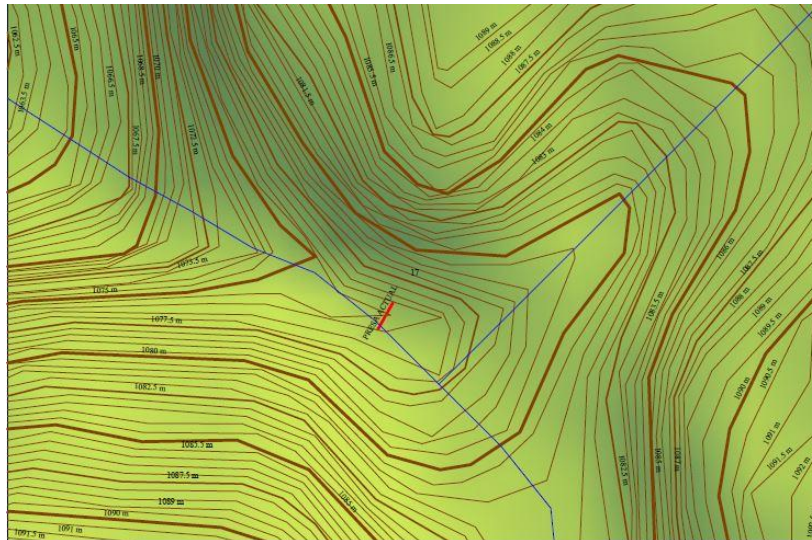


Figura 8. Curvas de nivel del terreno

POSIBLES SOLUCIONES DEL PROYECTO

Al haber hecho una búsqueda sobre las posibles soluciones que le podemos dar al proyecto se ha concluido que pueden ser tres:

Tornillo de Arquímedes

El tornillo de Arquímedes es una solución al problema de elevar el agua, ya que, por medio de un mecanismo inclinado, parecido al de un tornillo, pero de grandes dimensiones como se puede observar en la Figura 9, se puede elevar volúmenes de agua de una cota inferior a una superior. El tornillo se encuentra dentro de un cilindro hueco estático, y gracias al giro del tornillo, se logra elevar el fluido que se encuentra dentro. Es el más rudimentario pues, es un aparato muy vasto y de los primeros inventos que hubo para subir agua de una cota a otra. Este invento está datado del Siglo III antes de Cristo y su creador fue Arquímedes de Siracusa, quien era un físico, inventor y considerado como un genio de su época.

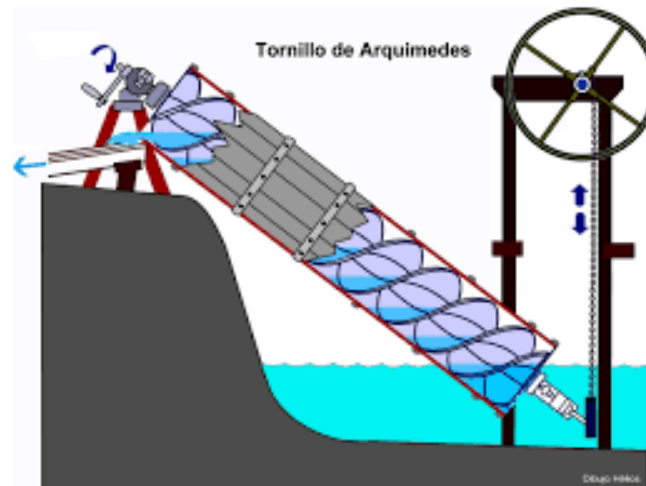


Figura 9. Tornillo de Arquímedes

El tornillo de Arquímedes es una solución muy utilizada en depuradoras para la elevación de agua, ya que con esta máquina se pueden elevar grandes cantidades de agua con materia sólida como podemos observar en la Figura 10.



Figura 10. Tornillo de Arquímedes en depuradora

Instalación hidráulica de bombeo

Esta instalación constará de una bomba, que funcionará como una turbomáquina, cuya función es otorgarle una energía al agua, para que pueda llegar a cotas superiores. El intercambio de energía se realiza a través de esta turbomáquina, que, a través de un gasto de energía mecánica, logra suministrar al fluido una cierta energía potencial, la cual se aprovecha para que vuelva a subir de las zonas de remanso al embalse.



Figura 11. Bomba hidráulica

Central hidroeléctrica reversible

Es una de las instalaciones más novedosas que existen, pues se trata de construir una central hidráulica con la característica de que la máquina instalada es una turbomáquina reversible. Esta máquina puede funcionar tanto como una turbina, para extraer la energía potencial del fluido, como una bomba, cuya función es otorgar al fluido una energía para que se eleve a cotas superiores. En la Figura 12, podemos observar que solo hace falta una máquina y que el agua en las cotas inferiores esté por encima de la máquina para que la máquina se encuentre siempre cebada para evitar futuros problemas.

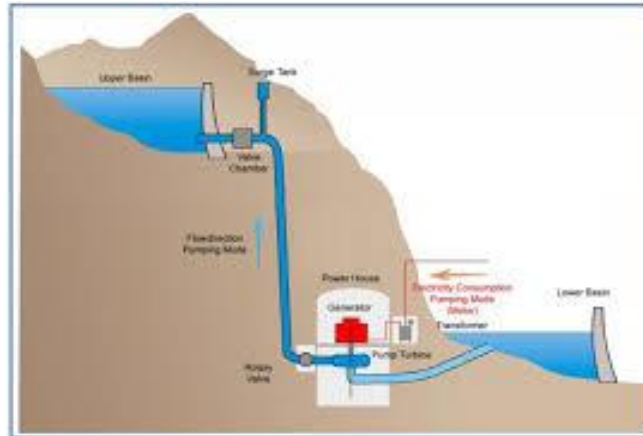


Figura 12. Central hidroeléctrica reversible

Este tipo de proyectos se realizan en las más grandes centrales hidroeléctricas que hay en el mundo, debido a que, ya que se va a invertir una gran cantidad de dinero en este proyecto, debido a la instalación de una máquina reversible, se requiere una fuerte generación de energía por parte de esta central. Un ejemplo lo podemos tener en la Figura 13.



Figura 13. Central hidráulica de bombeo de Okutataragi, Japon

Solución escogida

La solución que vamos a coger en este proyecto es la segunda, la instalación hidráulica de bombeo, ya que, al haber estudiado la viabilidad de la primera opción, al ser una distancia de unos 64 metros, se nos complica mucho. La tercera opción, aunque es la más atractiva desde mi punto de vista, es más complicada y más cara. La segunda opción cumple perfectamente con el aporte de energía al fluido para elevarla, y no importa que larga sea la distancia, pues una buena red de tuberías puede llevar el agua a donde queremos.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

Los objetivos que tendremos en este proyecto son:

- 1) Resolver la falta de agua en la comunidad de Mount Darwin, lo que les proporcionará agua tanto para el consumo como para la utilización de esta en la agricultura, como medio para obtener alimentos por ellos mismos.
- 2) Aprovechamiento de la energía potencial que obtenemos en la presa en los momentos en los que no se necesite, de esta manera, podremos guardar el agua al subirla con la bomba.
- 3) Obtener energía eléctrica necesaria para la vida cotidiana de la comunidad para el uso de electrodomésticos, calentar comida, uso de alumbrado, etc.
- 4) Proporcionarle trabajo mientras estemos allí y hacerles sentir que el proyecto es suyo, para que así lo intenten cuidar y sepan arreglarlo cuando nosotros no estemos ya allí.

Con todo esto, se intentará conseguir una mejoría en la calidad de vida de los habitantes de la comunidad, llevando todos los conocimientos que hemos obtenido en la escuela de ingeniería, para realizar mejorías en su infraestructura.

En el terreno hay una presa ya construida, pero el problema es que pierde bastante agua y no tiene un rendimiento como el que desearíamos. Con este proyecto y con los dos que van a realizar mis compañeros de curso, vamos a conseguir que la infraestructura creada tenga una alta eficiencia y no se desperdicien recursos como anteriormente ocurría. Los otros dos proyectos se van a encargar de realizar la presa hidráulica y la instalación con la que se conseguirá obtener energía a través de una turbina.

La principal complicación que podemos tener a la hora de desarrollar el proyecto es que la gente de la comunidad no se involucre en él y a la hora de tener cualquier problema en un futuro, no sepan cómo arreglar la instalación. Por eso el cuarto punto de los objetivos del proyecto es tan importante, ya que nosotros no estaremos allí para poder solucionarle cualquier avería y tenemos que enseñarle cómo funciona para que ellos se apañen.

Para concluir, el proyecto se realiza en este país, ya que anteriormente ha ido gente de la universidad y tenemos facilidad a la hora de instalarnos allí; y porque es un país que la Fundación cree que tiene una gran necesidad de ayuda y con este tipo de proyectos podemos aportar nuestro grano de arena para que mejore la calidad de vida de los ciudadanos de la comunidad.

ALINEACION CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

El proyecto se alinearán con los siguientes Objetivos de Desarrollo Sostenible redactados por la ONU:

- 1) Energía asequible y no contaminante: la bomba de retorno es parte de la instalación de la presa, la cual obtiene energía totalmente limpia y gratuita, gracias a la altura dinámica del agua que está en el embalse.

- 2) Fin de la pobreza: el agua que ya este turbinada y se le haya sacado la energía se utilizará para llevarla y usarla en campos de cultivo, lo que generará riqueza gracias a la producción de alimentos.
- 3) Hambre cero: gracias al agua que se podrá suministrar a la comunidad, se regarán zonas de cultivo que les proporcionará alimentos. Esto les concederá un cierto punto de autosuficiencia a la gente de la comunidad, que viven en la pobreza, y que muchas veces no tienen qué comer.
- 4) Ciudades y comunidades sostenibles: este proyecto es cien por cien limpio, lo que quiere decir que toda la energía que saca es renovable. Además, no genera un impacto en la zona, ya que es una reforma de una presa hidráulica que ya hay y lo que se intentará únicamente es que sea más eficiente.



Figura 14. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

METODOLOGIA DE TRABAJO

El problema que tenemos que resolver con este proyecto es la eficiencia energética de la central hidráulica en esos momentos en los que no va a utilizarse la energía obtenida para ningún propósito. La forma en la que va a ser abordada la solución es:

- 1) Estudio sobre el terreno, el clima y otros factores decisivos para tener todos los datos para saber definir el diseño de la instalación.
- 2) Obtener todos los cálculos necesarios para definir la instalación.
- 3) Diseño de la instalación: bomba, tuberías, válvulas, etc.
- 4) Análisis de la instalación mediante pruebas con programas informáticos.
- 5) Rediseñar si es necesario.
- 6) Finalizar el proyecto explicando cómo llevar a cabo su instalación.

El desarrollo del proyecto será el explicado en el cronograma de la Figura 15.

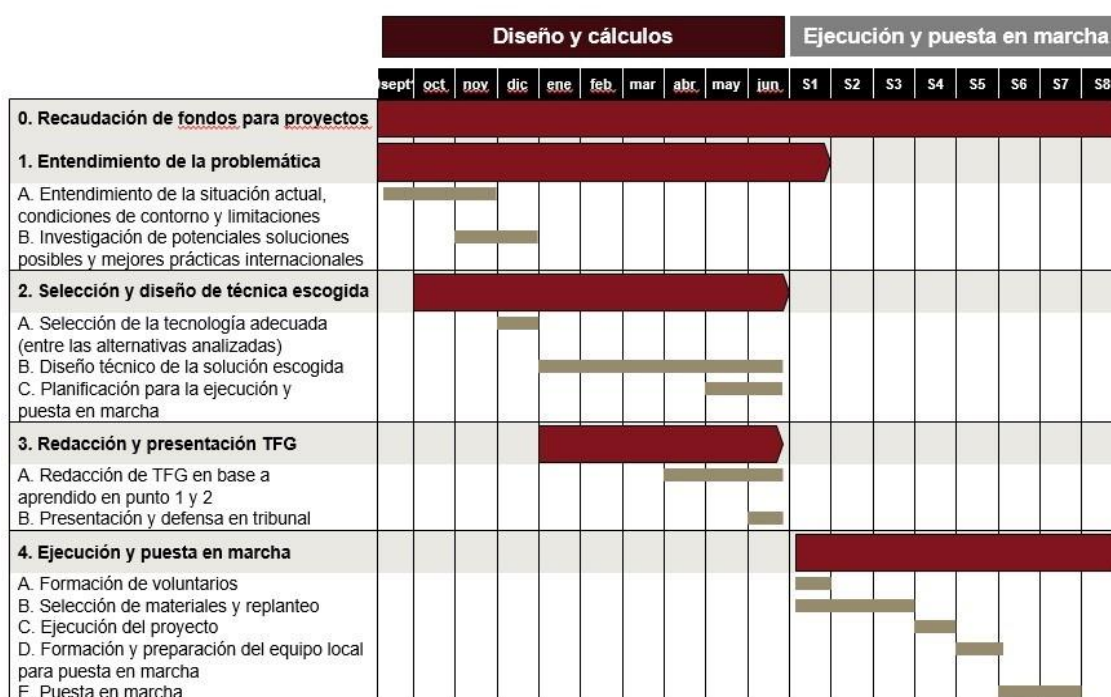


Figura 15. Cronograma del Trabajo de Fin de Grado.

Como se puede apreciar en el cronograma, el diseño llega hasta la fase de ejecución, en la cual se inspeccionará el terreno y se buscará la mejor forma de adaptar el proyecto a las características de la zona. Después de esto, todo será el llevarlo a cabo y formar al equipo de gente de la comunidad que nos va a ayudar a realizar el proyecto.

RECURSOS A EMPLEAR

Para la realización de este proyecto se utilizarán distintos programas informáticos de ingeniería, para el cálculo de variables de la instalación y para realizar distintos experimentos como Ansys, Matlab, Epanet, Solid 3D y Excel. Si se necesita alguno más se ira explicando su funcionamiento más adelante.

Ansys es un software de simulación que sirve para probar uno o varios productos bajo un entorno real simulado y está diseñado para funcionar bajo la teoría de elementos infinitos para estructuras y volúmenes finitos para fluidos.

Matlab es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio. Este programa sirve para realizar cálculos matemáticos complejos y para obtener las curvas de la Bomba y poder trabajar de manera más fácil y rápida al calcular curvas análogas con el termino K_B .

El Excel lo utilizaremos para exportar datos de la simulación y poder llevar a cabo tablas en donde se representarán todas las características de la misma.

El programa Epanet permite realizar análisis hidráulicos de redes de tuberías a partir de las características físicas de las tuberías y dinámicas de los nudos (consumos) para obtener la presión y los caudales en nodos y tuberías respectivamente; también se encarga de calcular la calidad del agua mientras se mueve por la red.

Entre los elementos que puede simular el programa se encuentran fundamentalmente tubos, nodos, depósitos, embalses, bombas y válvulas.

Solidworks es un software que se utiliza para diseñar piezas en 3D. En este caso se utilizará para definir las tuberías y algunas partes de la instalación si hay que diseñarlas.

EL TFG se llevará a cabo apoyándose en otros proyectos del ámbito y ayudado por profesores de la escuela en la medida que les sea posible. Toda la información que recoja de Internet se contrastará para ver si es verídica y si los cálculos de las distintas instalaciones son los correctos.

INTRODUCCION AL PROYECTO

MARCO HISTORICO

Antes de empezar a desarrollar el proyecto me gustaría hablar de la historia que hay detrás de las centrales hidráulicas y de las turbomáquinas, tanto de sus antecesores como de sus orígenes y funciones principales a lo largo de la historia.

Mecánica de fluidos

Las centrales hidráulicas y las turbomáquinas tienen su fundamento en la mecánica de fluidos, la cual es la parte de la física que estudia el comportamiento de los fluidos tanto en reposo como en movimiento. Esta rama de la física aparece gracias a Ludwig Prandtl, quien introdujo la teoría de la capa límite en 1904, consiguiendo así lograr una unificación entre la hidrodinámica teórica y la hidráulica práctica. El problema que había antes era que, la base teórica no podía explicar algunos fenómenos que ocurrían a nivel práctico y que, los técnicos buscaban y encontraban formas de solucionar problemas prácticos sin poder dar una explicación teórica precisa.

La teoría de la capa límite nos permite saber cómo es el movimiento de cada partícula del fluido cuando este atraviesa diferentes superficies, definiendo su vector de desplazamiento y su velocidad. Además, con esta teoría se puede definir las zonas en las

que va a haber flujo laminar o turbulento, prediciendo así el movimiento de las partículas y pudiendo definir el final de esta capa límite laminar, para trabajar solo en ella, pues en muchos casos es necesario.

Todo esto también fue posible gracias a descubrimientos y métodos matemáticos realizados por científicos como Euler, Bernoulli, Lagrange, etc. Unos ejemplos de capa límite los podemos observar en las Figuras 16 y 17, que es la capa límite representada en una placa plana y en una esfera respectivamente.

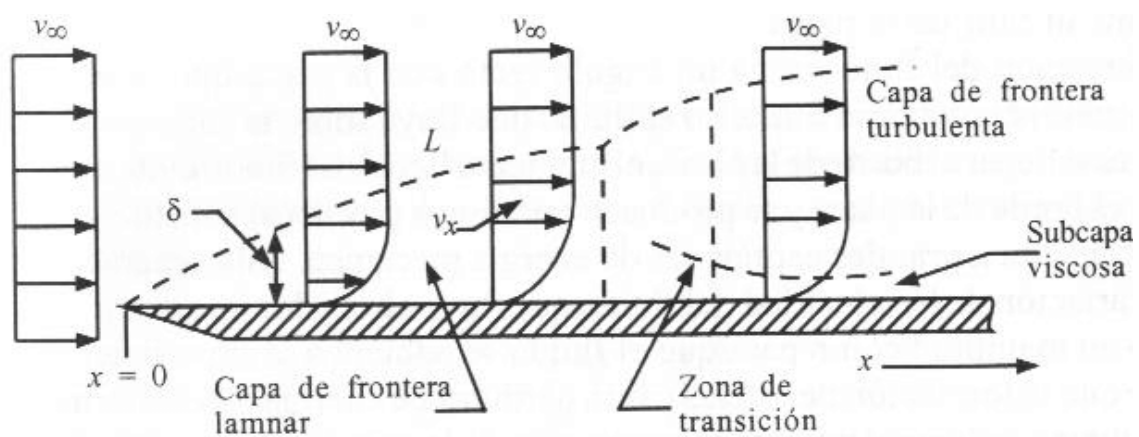


Figura 16. Capa límite en placa plana

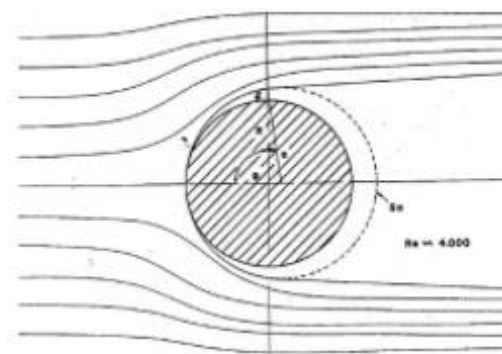


Figura 17. Capa límite en esfera

Fluido

Para poder entender bien con lo que estamos trabajando en este proyecto, vamos a explicar lo que es un fluido. Fluido es todo tipo de sustancia que es capaz de deformarse fácilmente, y que en ciertos casos puede cambiar hasta de volumen. Dentro de los fluidos se encuentran los líquidos y los gases, que son los estados de la materia que permiten la deformación de forma sencilla frente a una fuerza tangente al plano, siendo los más conocidos el aire atmosférico y el agua. Las características principales de un fluido son:

- Viscosidad: los fluidos son viscosos, es decir, pueden ejercer unas fuerzas viscosas que van en el sentido contrario a su movimiento.
- Compresibilidad: los fluidos son capaces de ocupar espacios inferiores a sus volúmenes hasta cierto grado, siendo los gases los que mayor capacidad tienen.
- Ausencia de memoria de forma: si un fluido se deforma, no hay fuerzas internas que hagan que vuelva a su forma inicial. Por ejemplo, si cambias un fluido de recipiente, su forma va a ser la del nuevo recipiente, siendo imposible que mantenga su forma original ni vuelva a ella.
- Deformabilidad infinita: se entiende como que las moléculas son tienen una posición de equilibrio entre ellas y que su movimiento es libre.

Aparte de estas propiedades, existen otras características de los fluidos que sirven para definirlos como son:

Relacionado con la energía del fluido:

- Presión, medido en Pa, es la cantidad de fuerza ejercida en una unidad de superficie
- Densidad, que es la cantidad de masa por unidad de volumen.

- Temperatura, la cual mide la cantidad de energía interna de un cuerpo.
- Entalpía, que es la cantidad de energía por un cuerpo con su entorno.
- Entropía, que se define como el desorden que hay en un sistema termodinámico.
- Calor específico, es la cantidad de energía en forma de calor que necesita un cuerpo para incrementar su temperatura en 1°C.
- Peso específico, es la relación entre el peso de una cantidad y el volumen.
- Fuerza de cohesión, son las fuerzas que unen las partículas.
- Energía interna, es el sumatorio de la energía cinética de las partículas.

Relacionado con el comportamiento de los fluidos:

- Viscosidad, es la capacidad de un fluido a ejercer una fuerza tangente a su movimiento.
- Conductividad térmica, es la capacidad de transmitir energía en forma de calor de un fluido a otro fluido, o a un cuerpo.
- Tensión superficial, que se entiende como la resistencia del fluido al aumentar su superficie
- Compresibilidad, que es la capacidad de reducir el volumen del fluido.
- Capilaridad, que es la capacidad de un fluido a fluir por las paredes de un conducto.
- Coeficiente de difusión, que es la facilidad de un soluto a moverse en un disolvente.



Figura 18. Diferentes fluidos con distintas densidades

Antecedentes

En la historia de la humanidad, agua y aire han sido siempre dos fluidos vitales necesarios para la vida y para la realización de trabajos gracias a su potencial energético como moler grano, conducir el agua a las comunidades para abastecerlas, etc. La civilización humana se ha desarrollado a lo largo del tiempo en estrecha convivencia con los fluidos intentando controlarlos.

Las máquinas hidráulicas y de fluido son las que intercambian energía con un fluido cuando este se comporta como incompresible, ya que, si el fluido no tiene esta característica, las máquinas con las que trabajan se denominan máquinas térmicas.

En la edad antigua, la civilización sumeria, que fue la primera en fundarse hace alrededor de 7500 años, fue la primera en intentar interaccionar con los fluidos para su propio provecho. Esta civilización también fue la primera en fundar ciudades, inventar la escritura, crear los códigos jurídicos y crear arte. Se les atribuye las primeras obras hidráulicas, y sobre todo en el sur de Mesopotamia, en donde se han encontrado los primeros sistemas complejos de canales, diques y presas, que llevaron a esta civilización a obtener una agricultura floreciente.

En el siglo III a.C. el emperador Hammurabi empezó a utilizar el viento como medio para poner en regadío la meseta de Mesopotamia, lo cual se realizaba a través de molinos de viento de eje vertical. Un ejemplo de ello se puede observar en la Figura 19.



Figura 19. Molinos de viento de eje vertical

Este nuevo conocimiento fue extendiéndose, luego de verse que era muy beneficioso para la población, por el llamado Creciente fértil y por Egipto, en donde hay constancia de las primeras obras hidráulicas para controlar el agua que desbordaba de las crecidas del Río Nilo. Poco después, se construyó una presa en el lago Meris cuya función era regular el caudal de agua que discurría a través del afluente del Nilo, el Bahr Yusef, e impedir que las crecidas inundaran los campos de cultivo.

En Europa, el primer invento que tuvo una gran aplicación, fue el tornillo de Arquímedes, el cual era un físico e ingeniero, considerado de los científicos más notables de la historia. Esta herramienta se utilizaba para drenar las bodegas de los barcos cuando estas se inundaban de agua.

En la época de la Edad Media, la expansión de los musulmanes desde la Península Ibérica hasta China hizo que estos distribuyeran sus nuevos inventos por estas nuevas tierras, dándole así la oportunidad de obtener los nuevos avances de Ingeniería Hidráulica como la noria o la rueda hidráulica dentada como se puede observar en la Figura 20. Los únicos en la Península que no contaban con estos avances eran las poblaciones cristianas del Norte, las cuales utilizaban un método de riego por gravedad. Esto hacía que los musulmanes tuvieran una gran ventaja al poder alimentar mejor a su población y ejército.



Figura 20. Rueda hidráulica dentada

El Siglo XVIII es el de las mejoras tecnológicas, en el que se empiezan a publicar los primeros tratados teóricos sobre los molinos de viento, los cuales eran unos profundos estudios sobre cómo se comporta aerodinámicamente los rotores. Los autores teóricos más destacados son Leopold Jacobs, Linperch y Belidor, seguido de John Smeaton, el cual llevo a cabo muchos experimentos científicos relacionado con las velas de los molinos. Unas décadas más tarde, James Watt inventó la máquina de vapor e inició la Revolución Industrial, y en el final de este siglo, ya se extendió el uso de las ruedas hidráulicas (antecedente de las turbomáquinas), en las cuales se llevaron a cabo estudios para saber cuál era el método más efectivo para ponerlo como se puede observar en la Figura 21.

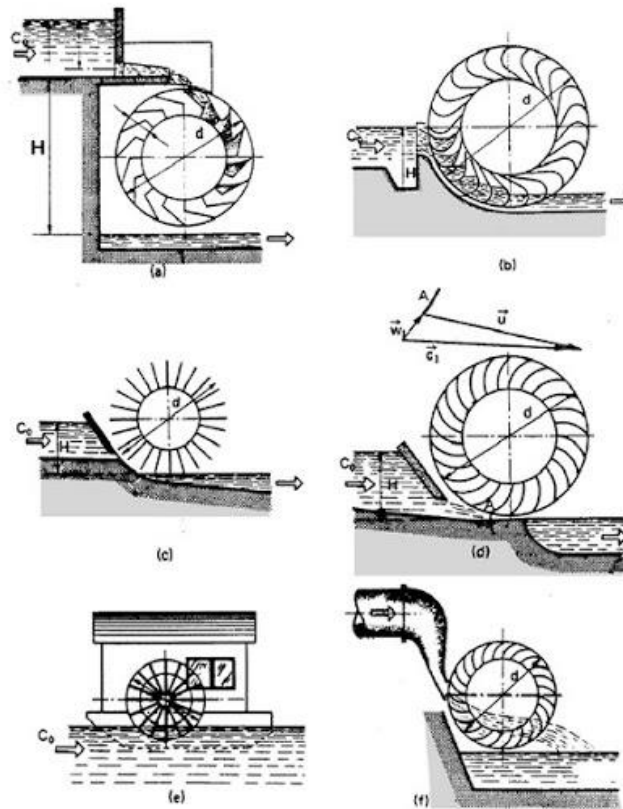


Figura 21. Estudio de las diferentes posiciones de la rueda hidráulica

A lo largo del Siglo XIV se fue intentando mejorar la turbina que creó Benoit Fourneyron, la cual funcionaba con un rendimiento alrededor del 80% pero únicamente se podía utilizar en las condiciones indicadas. Tres grandes científicos crearon 3 tipos distintos de turbinas aportándole su nombre: James Francis, Victor Kaplan y Lester Pelton. En el otro lado se desarrollaba paralelamente la bomba hidráulica, la cual empieza su desarrollo gracias al trabajo de Leonard Euler, cuya ecuación es hoy en día la base para el diseño de estas máquinas.

El primer diseño de las bombas hidráulicas se cree que es de Leonardo Da Vinci, pero el primer dibujo claro de una bomba fue del italiano Jordan en el Siglo XVII, seguidos de Lemour, Papin y el más destacado de todos, Osborne Reynolds, quién añadió el difusor y la pieza de parada para eliminar la rotación entre etapas.

Posterior a este tiempo son Prandtl y Magnus, que son dos científicos que se deben nombrar siempre que nos referimos al campo de los fluidos. Prandtl demostró la teoría

de la capa límite, y Magnus el efecto que sufre un cilindro que gira en el seno de una corriente fluida debido a las fuerzas aerodinámicas que se generan.

Por último, en el Siglo XX se han desarrollado mucho estas máquinas hasta llegar a grandes turbomáquinas que hoy en día proporcionan energía a las poblaciones y ayuda a la circulación de las aguas en las ciudades.

AUTOR	SIGLO	CONTRIBUCIÓN DESTACADA A LA MECÁNICA DE FLUIDOS
Tales de Mileto	VII - VI d.C.	Búsqueda de explicación del Universo a través de la física y las matemáticas. Teoremas geométricos
Arquímedes de Siracusa	III d.C.	Principio de Arquímedes
Herón de Alejandría	I d.C.	Invento de la eolípila
Leonardo da Vinci	XV - XVII d.C.	Principio de continuidad de la hidráulica, flujo unidimensional. Principios de sustentación
Simón Stevin	XVI - XVII d.C.	Paradoja hidrostática. Estabilidad en términos de flotación
Galileo Galilei	XVI - XVII d.C.	Método científico
Evangelista Torricelli	XVII d.C.	Teorema de Torricelli
Blaise Pascal	XVII d.C.	Principio de Pascal
Isaac Newton	XVII - XVIII d.C.	Ley de viscosidad de Newton
Henri Pitot	XVIII d.C.	Inventa tubo de Pitot. Estudio de máquinas hidráulicas
Daniel Bernoulli	XVIII d.C.	Ecuación de Bernoulli
Leonhard Euler	XVIII d.C.	Ecuaciones de Euler (fluidos ideales). Ecuación turbomáquinas.
Jean le Rond D'Alembert	XVIII d.C.	Paradoja de d'Alembert
Joseph-Louis Lagrange	XVIII - XIX d.C.	Formulación lagrangiana de descripción de flujo
Pierre-Simon Laplace	XVIII - XIX d.C.	Ley de Laplace
Robert Manning	XIX d.C.	Fórmula de Manning
Henry Darcy	XIX d.C.	Ecuación de Darcy-Weisbach
Julius Weisbach	XIX d.C.	Ecuación de Darcy-Weisbach
Jean Léonard M. Poiseuille	XIX d.C.	Ley de Poiseuille
Claude L. M. Henri Navier	XIX d.C.	Ecuación de Navier-Stokes (fluido viscoso)
Gabriel George Stokes	XIX d.C.	Ecuación de Navier-Stokes (fluido viscoso)
William Froude	XIX d.C.	Número de Froude
Osborne Reynolds	XIX d.C.	Número de Reynolds
John W. Strutt Rayleigh	XIX - XX d.C.	Análisis dimensional
Ludwig Prandtl	XIX - XX d.C.	Teoría de la Capa Límite
Theodore von Kármán	XIX - XX d.C.	Calle de Vórtices de von Kármán
Henri-Émile Bazin	XIX - XX d.C.	Fórmula de Bazin
Geoffrey Ingram Taylor	XIX - XX d.C.	Número de Taylor. Estudio estadístico de la turbulencia
Moritz Weber	XIX - XX d.C.	Número de Weber

Figura 22. Autores más destacados en la Mecánica de Fluidos

CICLO DEL AGUA

Siendo el agua el fluido que más se utiliza y con el que vamos a trabajar en este proyecto, vamos a definir el ciclo de este.

El ciclo del agua es el recorrido que lleva a cabo el agua desde su inicio, en este caso se va a definir en el océano, hasta su fin, que es la vuelta de este fluido al océano, por lo que es un ciclo cerrado. Este ciclo es un proceso por el cual el fluido, en este caso el agua, cambia entre todos sus estados y va cambiando su posición en el globo terráqueo.

Las 5 etapas por las que pasa el agua son:

- Evaporación: es el proceso físico por el que el agua cambia su estado líquido a gas por medio del calentamiento del agua. En este proceso el agua de los océanos es calentada hasta su punto de ebullición y pasa a estado gaseoso y se dirige a la atmosfera, en la cual va a formar formaciones llamadas coloquialmente como nubes.
- Condensación: en este proceso el agua en estado gaseoso pasa a estado líquido por medio del enfriamiento del vapor de agua. El vapor de agua asciende a gran altura, donde se reúne y se enfría gracias al gradiente térmico de las capas de la atmósfera. El cambio de estado se realiza en las formaciones que antes se han definido como nubes.
- Precipitación: este proceso se produce cuando la humedad relativa del vapor de agua presente en la atmósfera alcanza el 100%. Las precipitaciones pueden ser en forma de agua en estado líquido o sólido (nieve o granizo), y estas se producen en las nubes y caen directamente en la capa terrestre de nuestro planeta.
- Escorrentía: en este proceso el agua se infiltra en la tierra por medio de la gravedad y llega hasta las capas subterráneas donde se crean acuíferos y bolsas de agua subterráneos.

- Transporte: el último proceso del ciclo del agua es el movimiento del agua a través de ríos, lagos y capas subterráneas de nuestro planeta hasta su llegada de nuevo a los océanos.

Un claro ejemplo del ciclo del agua se puede observar en la Figura 23, en el que se pueden distinguir todas las fases de este ciclo cerrado.



Figura 23. Ciclo del agua

MICROCENTRAL HIDROELECTRICA DE BOMBEO

Como hemos explicado antes, este proyecto es una parte de uno mayor, que en conjunto van a formar una microcentral hidroeléctrica de bombeo. Se define como una microcentral debido a que las dimensiones tanto geométricas como en producción de energía de la misma, son insuficientes como para catalogarla como una central hidroeléctrica. Aunque se defina de otra forma, las partes de una y otra son iguales por lo que vamos a explicar lo que es una central hidroeléctrica.

Propiedades de la energía hidráulica

Que la producción de energía hidráulica a nivel mundial sea de un 16% no es una casualidad, debido a que posee muchas características que la hacen muy atractiva como:

- Energía renovable: la energía obtenida por medio de estas instalaciones es 100% limpia y renovable. La energía es extraída de un medio natural sin necesidad de generar ningún agente contaminante. El único impacto que tiene a nivel medioambiental es el terreno que se va a utilizar para construir la instalación, que puede incurrir en desviación de caudales de los ríos y el desplazamiento de población en el caso que esta sea de grandes dimensiones.
- Económicamente rentable: se puede pensar que la inversión es muy grande, pero nos permite obtener energía gratis del medioambiente y esto lo hará rentable en unos años.
- Eficiente: estas instalaciones destacan por sus altos niveles de rendimiento, ya que, de media, estas centrales pueden llegar a convertir un 90% de la energía cinética que posee el agua.
- Alto desarrollo: se estima que actualmente solo se explota el 30% del potencial hidroeléctrico de todo el mundo. Esto hace que este sector tenga una gran capacidad de crecimiento y consiga obtener en el futuro unos altos porcentajes de uso de energías renovables en la sociedad.
- Almacenamiento: el agua es un fluido que tiene una gran ventaja y es que se puede almacenar de forma muy sencilla y esto la convierte en la mejor energía renovable. La capacidad de almacenar el agua hace que cuando haya energía sobrante en la red, esta se puede utilizar para que una bomba hidráulica bombee el agua de vuelta a la presa, consiguiendo así una forma natural de almacenar energía.

- Versatilidad: a lo largo del tiempo se han descubierto muchas maneras de aprovechar la energía hidráulica y todavía hoy en día, se siguen produciendo avances en estas máquinas.

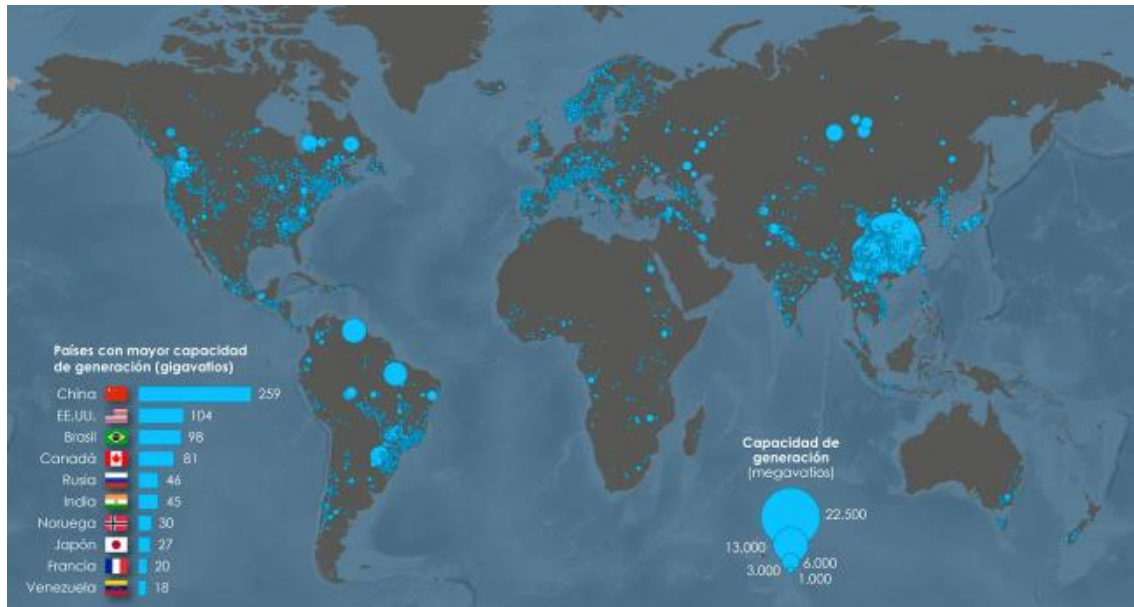


Figura 24. Aprovechamiento de la fuerza del agua

Partes de una central hidroeléctrica de bombeo

Esta infraestructura se puede dividir en 3 partes:

- Presa hidroeléctrica: es el elemento esencial de una central hidroeléctrica, ya que es el que almacena el agua y, por tanto, la energía potencial que se extraerá luego en la turbina.
- Turbina hidráulica: es la máquina encargada de extraer la energía del fluido y llevarla a red eléctrica por medio de un alternador que transforma la energía mecánica en energía eléctrica.

- Bomba hidráulica: es la máquina en la que se va a centrar este trabajo. Su función es la de administrar una energía al fluido para que esta pueda volver de aguas debajo de la central a la presa y así almacenar energía que no vayamos a usar.

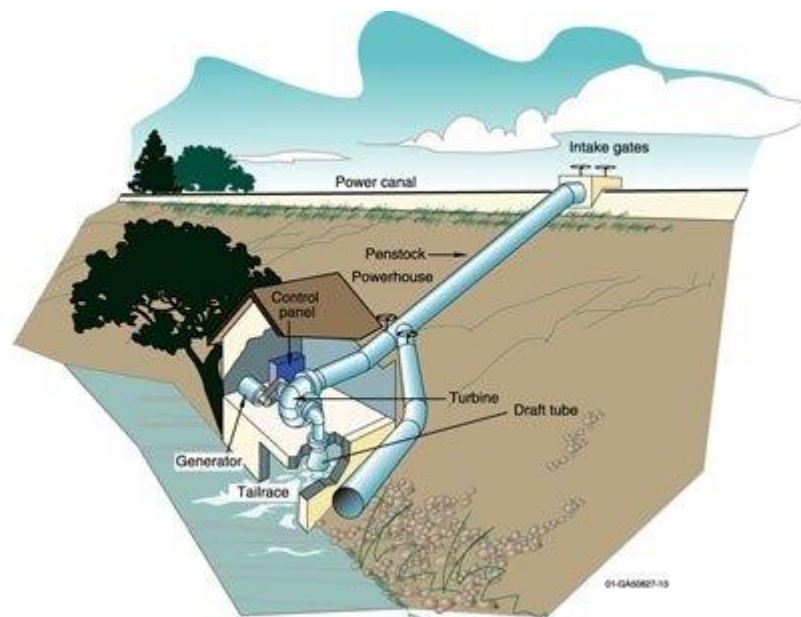


Figura 25. Microcentral hidroeléctrica

Funcionamiento

El funcionamiento de las centrales hidroeléctricas de bombeo es muy sencillo, teniendo dos sentidos de flujo, el descendente, del que se extrae la energía del agua, y el ascendente, en el cual hay que aportarle energía al agua para que suba esa cierta altura.

En primer lugar, el agua es retenida por la presa, proporcionándole una energía potencial que va a ser la que nos interesa extraer cuando este pase por la turbina, y ya empieza a discurrir el agua por las turbomáquinas.

El funcionamiento en el primer sentido es el típico de todas las centrales hidroeléctricas, haciendo pasar el agua que esta retenida en la presa, por medio de unas tuberías, a la

turbina, en la cual la velocidad con la que baja el agua hace girar el rodete de la turbina. Este movimiento hace que el rotor de la máquina eléctrica gire, produciendo así un campo magnético giratorio, que va a hacer que en el estator se produzcan unas corrientes que será la energía final extraída del agua. Esta energía final suele estar entre el 85% o 90% debido a que en las turbomáquinas hay pérdidas volumétricas, hidráulicas y mecánicas. Esta energía será traspasada a la red eléctrica directamente, ya que el generador eléctrico va a producir corriente alterna. Después de ceder la energía en la turbina, el agua vuelve a su cauce aguas abajo a través del canal de desagüe de la central.

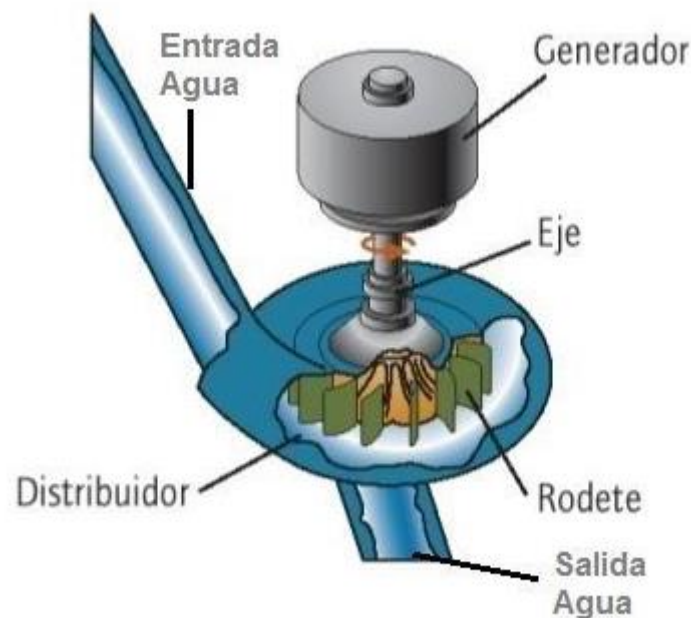


Figura 26. Funcionamiento turbina hidráulica

El segundo modo de funcionamiento es en el que el agua va en sentido ascendente desde aguas abajo a la presa. En este proceso entra en juego la turbomáquina llamada bomba hidráulica, la cual funciona al contrario que la turbina, es decir, esta máquina cede energía al fluido mediante el movimiento de rodete para conferir una velocidad al agua y que esta pueda llegar a la altura requerida.

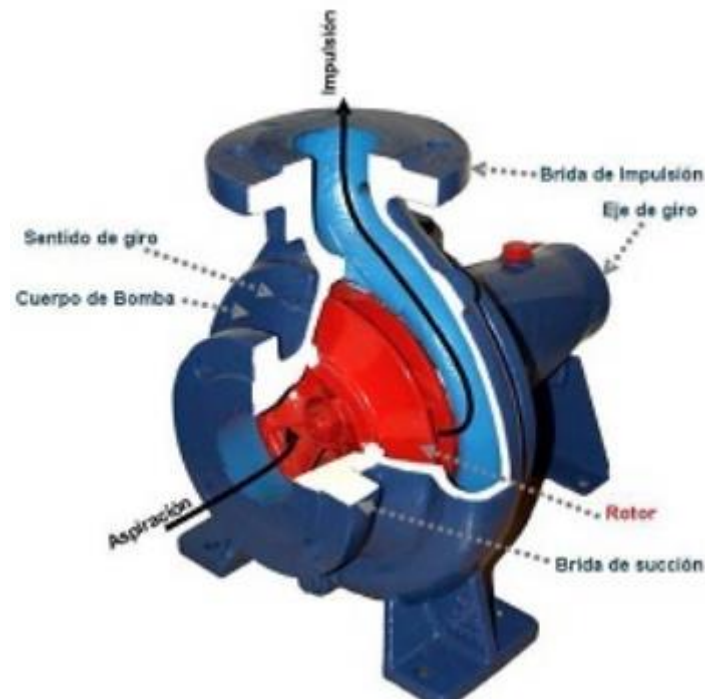


Figura 27. Funcionamiento de una bomba hidráulica

En ciertos casos se puede instalar en la central una turbomáquina reversible que pueda funcionar en los dos modos, aportando y consumiendo energía de la red.

Otros tipos de instalaciones que obtienen energía hidráulica

La definición de una central hidroeléctrica indica que es toda instalación que está destinada a extraer la energía que hay dentro del agua, pero dentro de esta definición se catalogan también estos tipos de centrales:

1. Centrales nucleares: este tipo de centrales funcionan llevando a cabo el fenómeno de fisión nuclear, que libera grandes cantidades de energía al agua de que está rodeado, calentándola y obteniendo grandes cantidades de vapor de agua que luego es turbinado. Estas centrales son muy contaminantes, ya

que, con los residuos nucleares que genera, no se puede hacer nada más que enterrarlos en cementerios nucleares protegidos de un revestimiento de plomo y otros metales para que la radiación no se disperse.

2. Centrales térmicas: son aquellas que utilizan de un combustible natural para calentar el agua y realizar el mismo proceso que las centrales nucleares. Son muy contaminantes ya que, al consumirse estos combustibles, se generan gases que afectan a la atmosfera y a la vida en el planeta.
3. Centrales geotérmicas: estas centrales son las que aprovechan los gradientes de temperaturas menos frecuentes de las capas profundas de la superficie para obtener la energía a través del calentamiento del agua y su posterior turbinación. Estas centrales son consideradas de energía renovables, aunque el devolver el agua al medio con una temperatura mayor a la adecuada puede incurrir en un perjuicio al medio en el que se deposite.
4. Centrales termosolares: el funcionamiento de estas centrales es muy simple, ya que, sabiendo que las radiaciones solares tienen un alto nivel de potencial energético aprovechable, se disponen una serie de espejos que centralizan todas las radiaciones solares en un punto, que será la caldera. El procedimiento posterior va a ser el mismo que en las anteriores.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE UNA BOMBA

Salto hidráulico y altura hidráulica

La definición de salto hidráulico es la diferencia de cotas entre dos depósitos de agua, normalmente llamados embalse de aspiración y de desagüe. Los saltos suelen estar formados de manera natural, aunque hay veces en los que interesa formarlos de forma artificial para aprovechar su energía. Lógicamente, cuanta más altura haya, mayor energía se podrá obtener del agua.

El salto es un parámetro muy necesario en el diseño de las máquinas hidráulicas y se puede dividir en dos categorías: salto bruto o salto neto. La unidad de medida del salto es el metro, y la potencia instalada, que veremos más adelante, es proporcional al salto.

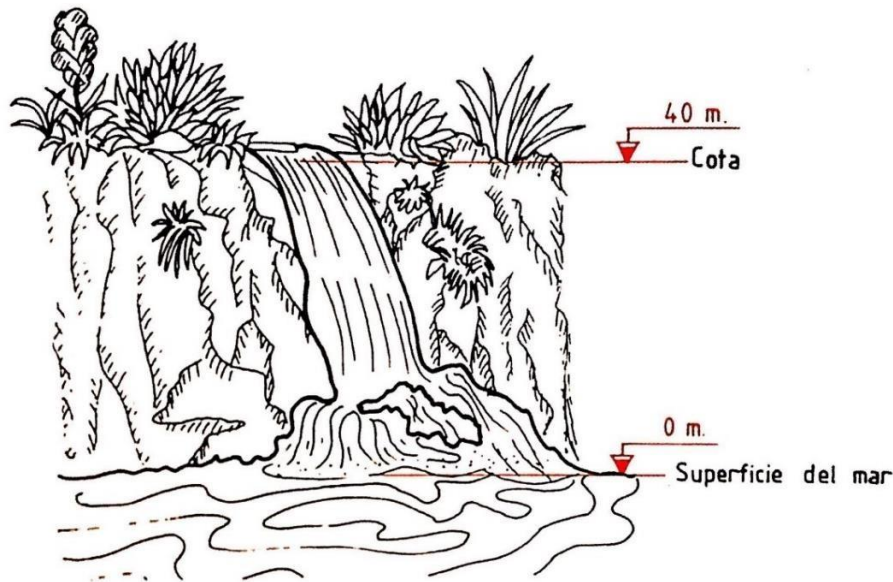


Figura 28. Salto natural (cascada)

El salto bruto es la diferencia de cotas entre el nivel de la superficie libre del depósito de aspiración, designada esta con la letra A, y la altura a la que se desagua el fluido turbinado, al cual se designa con la letra Z. Se puede ver un ejemplo de esto en la Figura 29 aunque están al revés los términos, siendo el depósito de aspiración el canal de aspiración y al revés, esto es debido a que la bomba hidráulica tiene los términos al revés de la turbina.

$$H_b = z_z - z_A$$

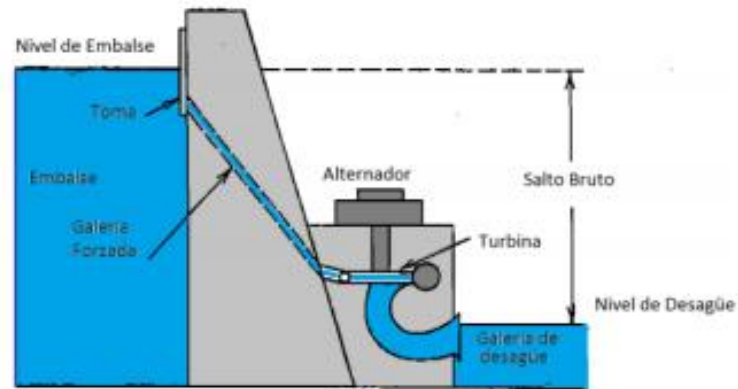


Figura 29. Salto bruto en una central

Lo que quiere hacer entender el salto bruto es que esta sería la altura ideal obtenida de la instalación si no hubiera pérdidas en las tuberías, en las máquinas y en la aspiración y desagüe. Dado que esto no es posible, este concepto no será el que tendrá la mayor relevancia a la hora del diseño de la instalación ya que solo servirá para hacer una aproximación.

El dato que se va a tener que coger a la hora de diseñar la instalación va a ser el salto neto, que se define como la diferencia entre el salto bruto y las pérdidas de altura desde el depósito de aspiración “A” hasta la entrada de la bomba designada con la letra E. Por lo que lo que se deberá de saber es el salto bruto y las pérdidas de la tubería forzada. Así, lo que interesa es hacer estas pérdidas lo más pequeñas posibles, ya que, así necesitaremos aportar menos potencia al fluido para subir hasta la altura del depósito de desagüe.

$$H = H_b - H_{rA-E}$$

Otra forma de calcular la altura efectiva o salto neto es por medio de las diferencias entre alturas totales de la entrada y salida de la bomba.

$$H = \frac{P_s - P_e}{\rho * g} + z_s - z_e + \frac{c_s^2 - c_e^2}{2 * g}$$

Y la última forma de calcularlo es mediante los parámetros de la bomba, siendo la diferencia entre la altura que da la bomba y las pérdidas internas de la misma.

$$H = H_u - H_{r-int}$$

Leyes de funcionamiento

Estas leyes se aplican en el sistema difusor de la bomba hidráulica y sirve para calcular caudales, velocidades absolutas del fluido o el diámetro de las partes del sistema difusor. Las dos leyes que se tratan son:

- Conservación del momento cinético: esta ley dice que, si el fluido no va guiado, el momento cinético del fluido se conserva. Esto sucede en el entrehierro entre el rodete y la corona difusora con alabes.

$$d_2 * c'_{2u} = d_3 * c_{3u}$$

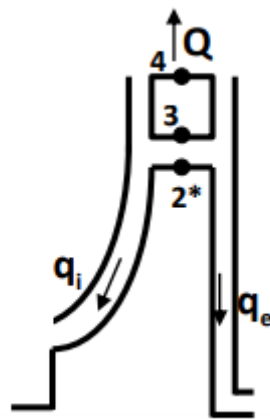


Figura 27. Entrehierro de la bomba

- Conservación de la masa: esta ley se puede aplicar en las zonas de la bomba donde se sabe que no hay fugas de caudal y por lo tanto el caudal debe mantenerse constante. Existen dos tipos de fugas volumétricas: las fugas internas y las fugas externas. Las externas son las que se pierden por el juego entre la carcasa y el eje de la bomba, y las internas son las que son producidas por el flujo en circulación dentro de la bomba que produce un caudal de cortocircuito en el que se pierde energía. Por lo tanto, esta ley se puede aplicar tanto en las tuberías para cuando cambia el diámetro de estas o dentro de la bomba, en el rodete, donde el caudal es distinto al de la tubería, pero también se mantiene constante.

$$Q_i = Q_j$$

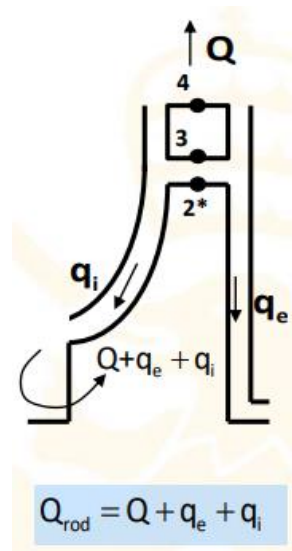


Figura 31. Fuga de caudales

Potencias y rendimientos hidráulicos

Las potencias y rendimientos son de gran importancia cuando se dispone a llevar a cabo el diseño de la turbomáquina y de la instalación. El objetivo será, por tanto, hacer que las pérdidas de potencia sean lo más pequeñas y los rendimientos lo mayor posible.

La potencia inicial de una bomba se denomina potencia de accionamiento y es aquella que el motor eléctrico aporta al eje de la bomba. Se designa con la letra P_a y de ella se extraerán todas las pérdidas hasta llegar a la potencia aportada al fluido. La potencia inicial es el producto entre el par motor (M) y la velocidad de giro (w).

$$P_a = M * w$$

Al extraer de la potencia de accionamiento las pérdidas mecánicas, se obtiene la potencia interna, que es la potencia real que se intercambia entre eje y rodete de la máquina. Las pérdidas mecánicas son aquellas que se dan debido a los cierres

mecánicos o los prensaestopas, el rozamiento en los cojinetes, la transmisión de la velocidad de giro y los órganos auxiliares. La potencia interna es el producto entre el caudal del rodete (Q_{rod}), la densidad del fluido (ρ), la fuerza de la gravedad (g) y la altura del rodete (H_u).

$$P_u = Q_{rod} * \rho * g * H_u$$

Después de haber sustraído de la potencia inicial las pérdidas mecánicas, se procede a quitar las pérdidas volumétricas y las hidráulicas. Las pérdidas volumétricas son debidas, como se explicó en el apartado anterior de leyes de funcionamiento, a las fugas entre el eje y el cierre, y el caudal de cortocircuito en el interior. Las pérdidas hidráulicas son otro caso, ya que, son las más desconocidas, pero las podemos dividir en pérdidas por rozamiento de superficie y por rozamiento de forma. Al haber sustraído todas las pérdidas, se obtiene la potencia final que la máquina va a ceder al fluido, esta se llaman potencia efectiva, y es el producto entre el caudal de la instalación (Q), la densidad del fluido (ρ), la fuerza de la gravedad (g) y la altura efectiva (H).

$$P = Q * \rho * g * H$$

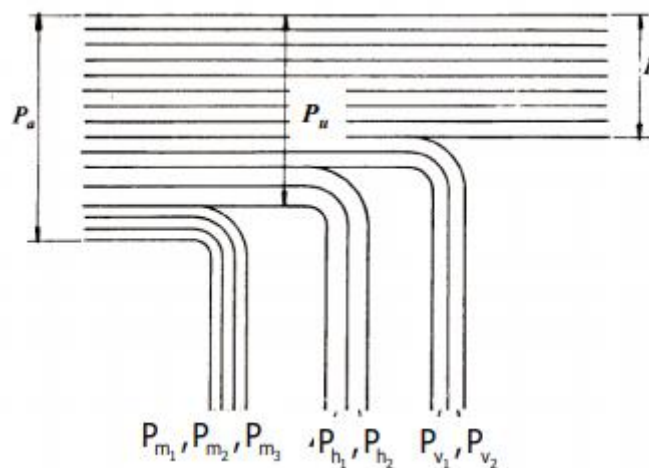


Figura 32. Flujo de potencia en una bomba hidráulica

Por otro lado, pero guardando una estrecha relación, están los rendimientos tanto hidráulicos, mecánicos o volumétricos. Los rendimientos son un cálculo porcentual de cuánto queda al final del camino del fluido a través de la bomba o, mejor dicho, de la cantidad inicial menos lo que se pierde por el camino. Los rendimientos son un buen indicador para saber si una máquina es eficiente o no.

Hay varios tipos de rendimientos:

- Rendimiento mecánico: es el que está relacionado con las pérdidas mecánicas antes expuestas.

$$\eta_{mec} = \frac{P_u}{P_a}$$

- Rendimiento volumétrico: es el relacionado con las pérdidas volumétricas.

$$\eta_V = \frac{Q_{rod}}{Q}$$

- Rendimiento hidráulico: es el que está relacionado con las pérdidas hidráulicas de la bomba.

$$\eta_H = \frac{H_u}{H}$$

Y, por último, el rendimiento que agrupa todos los demás y que muestra cómo funciona de bien la bomba es el rendimiento total.

$$\eta_T = \frac{P}{P_a} = \eta_{mec} * \eta_V * \eta_H$$

Caudales

Un concepto muy importante a tratar es el caudal hidráulico que puede hacer circular una bomba, es decir, la cantidad de agua que pasa por una tubería en un espacio de tiempo; así como el caudal que puede mover el rodete de la bomba que siempre será menor.

El caudal que puede mover una bomba se calcula como el producto entre la velocidad del fluido y la sección de paso de este fluido por la tubería. Se mide en m^3/s .

$$Q = v * A$$

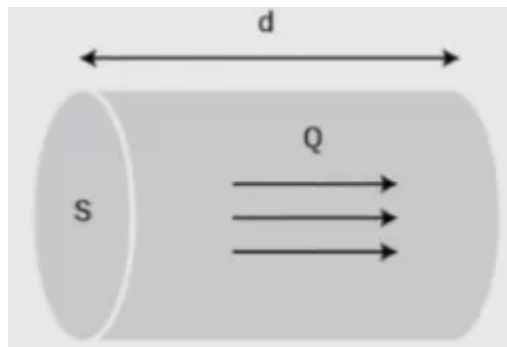


Figura 33. Representación del caudal

El otro caudal que se estudia es el del rodete, que quiere decir el caudal que pueden hacer mover las aspas del rodete e impulsarlo por el sistema difusor a la salida. Este caudal es el producto de una serie de parámetros: el número pi, el diámetro del punto a la entrada o salida del rodete, el ancho de las aspas, el espesor del aspa a la entrada o salida del rodete y la velocidad absoluta meridional.

$$Q_{rod} = \pi * d_i * b_i * \zeta_i * c_{im}$$

Fenómenos a evitar

En toda instalación hidráulica se tiene que evitar que se produzcan dos fenómenos: la cavitación y el golpe de ariete. Estos fenómenos producen daños y pérdidas de rendimiento en la máquina que con el tiempo puede llevar a un fallo de la máquina.

El primer fenómeno, la cavitación, se produce cuando la presión de vapor de agua se encuentra por debajo de la presión de saturación del líquido. La cavitación se da tanto en las tuberías como en las máquinas y provoca pérdida de rendimientos, vibraciones, erosión (como podemos observar en la Figura 35) y ruido. Para evitarlo, hay que tener en cuenta el NPSH_d, parámetro de la instalación, que expresa la contribución de la instalación a que se produzca esta situación. Por otro lado, se debe tener en cuenta el NPSH_r, que es la aportación de la bomba a que se produzca la cavitación. Al tener que realizar el diseño de una instalación, hay que saber que el NPSH_d tiene que ser siempre mayor que el NPSH_r para que se asegure que no se produce la cavitación.

$$NPSH_d = \frac{P_e - P_v}{\rho * g} + \frac{c_e^2}{2 * g}$$

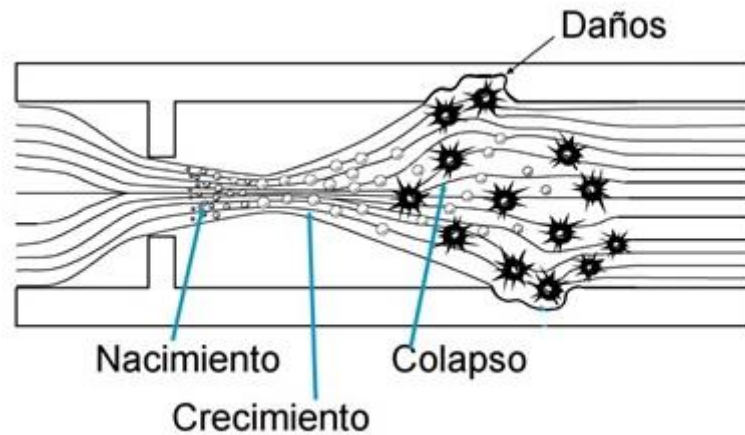


Figura 34. Cavitación en tubería



Figura 35. Rodete erosionado por cavitación

El segundo fenómeno a tener en cuenta es el golpe de ariete o pulso de Zhukowski, llamado así por su descubridor, que es una subida de presión en la tubería que se desplaza por ella a grandes velocidades. Esto es producido por el cierre rápido de una válvula cuando está el fluido en circulación o por arrancar una máquina hidráulica con la válvula de impulsión cerrada y abrirla rápidamente. Lo que se consigue así es la acumulación de energía que tiene que ser liberada por alguna parte, lo que se convierte en unas grandes presiones y velocidades. La consecuencia del golpe de ariete es la rotura de los elementos de la instalación tanto de válvulas como tuberías.



Figura 36. Posibles roturas debido a golpe de ariete

Leyes de semejanza dinámica

En las turbomáquinas existen unas leyes que sirven para conocer el funcionamiento de unas máquinas de diferentes tamaños, con la misma geometría y trabajando en puntos de igual rendimiento; y para conocer el funcionamiento de la misma máquina cuando varía alguno de sus parámetros (diámetro, revoluciones, etc).

Las características de estas leyes son las siguientes:

- Ignoran la semejanza dinámica y se centra solo en la semejanza geométrica.
- Casi igualdad de rendimientos entre el modelo y el prototipo. Hay que tener en cuenta que los resultados son una aproximación.
- No se infringe la semejanza cinemática entre prototipo y modelo.

Las siguientes leyes se cumplen para bombas semejantes geométricamente y que trabajan en puntos de rendimientos iguales:

$$1) \frac{Q'}{Q''} = \frac{n'}{n''} * \left(\frac{D'}{D''}\right)^3$$

$$2) \frac{H'}{H''} = \left(\frac{n'}{n''}\right)^2 * \left(\frac{D'}{D''}\right)^2$$

$$3) \frac{P'}{P''} = \frac{\rho'}{\rho''} * \left(\frac{n'}{n''}\right)^3 * \left(\frac{D'}{D''}\right)^5$$

Estas ecuaciones cuando interaccionan entre ellas dan lugar a:

- 1) Curva de puntos homólogos de una misma bomba: $D' = D''$

$$H'' = k_{\beta} * Q''^2$$

$$k_{\beta} = \frac{H'}{Q'^2}$$

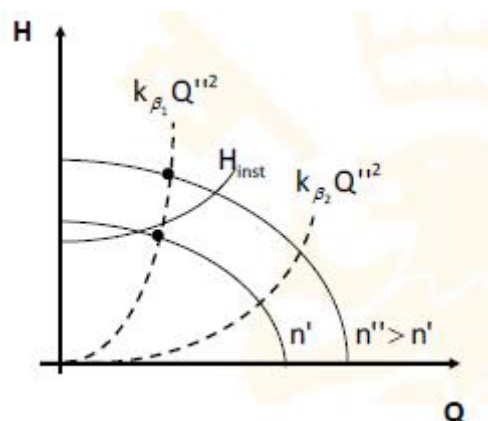


Figura 37. Curva transformada para número de revoluciones distintas

2) Curva de puntos homólogos de diferente escala para bombas diferentes: $n' = n''$

$$H'' = k_{\lambda} * Q''^{\frac{2}{3}}$$

$$k_{\lambda} = \frac{H'}{Q'^{\frac{2}{3}}}$$

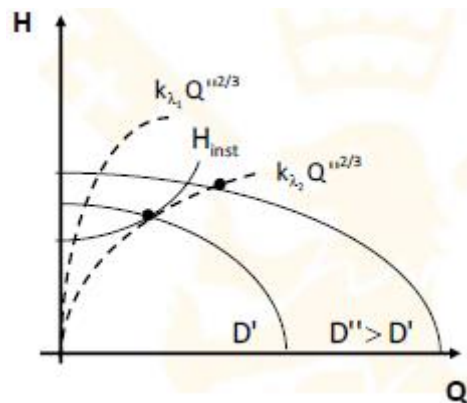


Figura 38. Curva transformada para distintos diámetros

Por último, hay que tener en cuenta que las bombas que son geométricamente semejantes y que trabajan en puntos de mismo rendimiento, tienen los mismos coeficientes de velocidad, que son los siguientes:

- $k_u = \frac{u}{\sqrt{2 * g * H}}$

- $k_c = \frac{c}{\sqrt{2 * g * H}}$

Número específico de revoluciones

El número específico de revoluciones es un parámetro de la bomba, que asigna un número a cada punto de funcionamiento de la bomba. Hay dos tipos, el que es en función del caudal (n_q) y el que es en función de la potencia (n_s). Es un parámetro que para identificar el punto de funcionamiento en el que está funcionando la bomba, y significa la velocidad a la que debe funcionar la bomba para dar una altura y caudal, o en el caso de n_s una potencia y altura.

$$n_q = n * Q^{\frac{1}{2}} * H^{-\frac{3}{4}}$$

$$n_s = n * P^{\frac{1}{2}} * H^{-\frac{5}{4}}$$

$$n_s = 3.65 * n_q \text{ (en agua)}$$

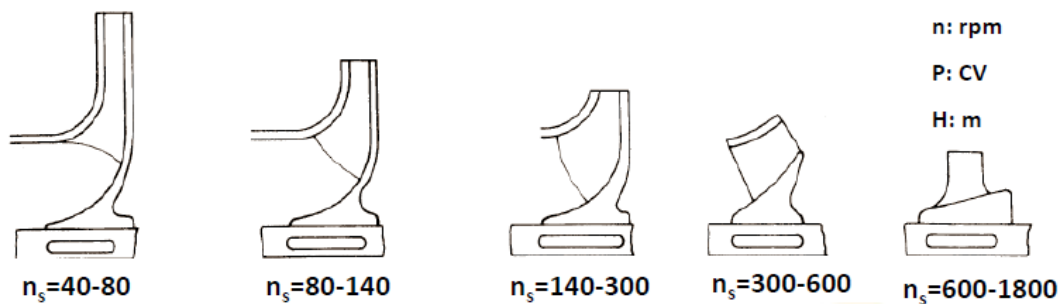


Figura 39. Número específico en función de la geometría

Este parámetro se relaciona mucho con los rendimientos que pueden llegar a dar las bombas como podemos observar en la Figura 40, y gracias a esto podemos diseñar la geometría ideal para las variables que dispongamos.

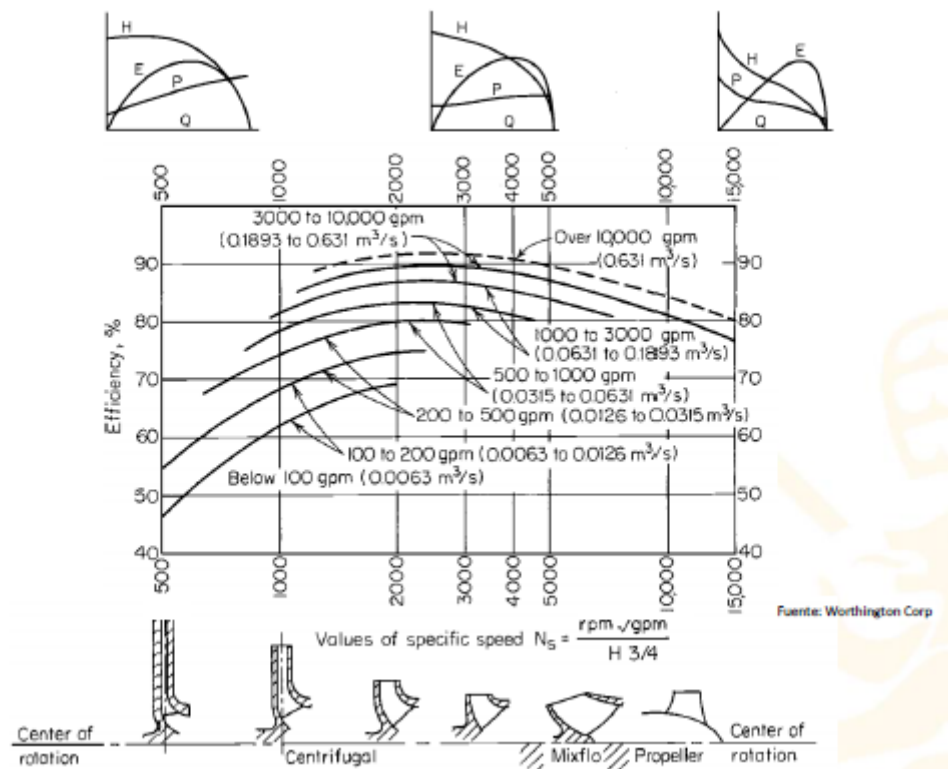


Figura 40. Curvas de rendimientos frente a número específico de revoluciones

MAQUINAS HIDRAULICAS: BOMBA HIDRAULICA

Antes de definir las especificaciones de la bomba que necesitaremos utilizar en el proyecto, vamos a explicar lo que es una bomba hidráulica, para qué sirve y todas sus características.

Estudio de partes de una bomba

Una bomba hidráulica es una turbomáquina cuya función principal es transmitir una cierta cantidad de energía al fluido para elevarlo a una cierta altura. Esta transmisión de energía se realiza mediante el rodete, la parte mecánica más importante de la bomba, la cual se realiza mediante la variación del momento cinético del fluido. El rodete es un órgano mecánico que tiene varios parámetros asociados a él, con los cuales podemos obtener una mejor eficiencia en la transmisión de la energía. Estos parámetros son: el diámetro de entrada y de salida del fluido, el ancho de entrada y de salida, los ángulos α y β de entrada y salida y los espesores y pasos circunferencial de entrada y salida. Con todos estos parámetros se intenta conseguir que el flujo de fluido sea el más favorable posible, esto es, que se consiga que haya menos choques del fluido y menos fugas internas de fluido con el fluido en recirculación.



Figura 41. Rodete radial

Aparte del rodete, hay otras partes de la bomba que son de gran importancia, como el sistema difusor, la carcasa, el eje, el sistema de estanqueidad, los cojinetes y las bridas de entrada y salida de la bomba.

- 1) El sistema difusor es la parte mecánica de la máquina encargada de direccionar el fluido a la salida del rodete. Puede estar compuesto por la caja espiral, la corona directriz y el cono difusor. En la Figura 42 podemos observar las distintas formas en las que puede estar formado, siendo respectivamente, la bomba con solo caja espiral, la bomba con caja espiral y cono difusor y la bomba con caja espiral, cono difusor y corona directriz.

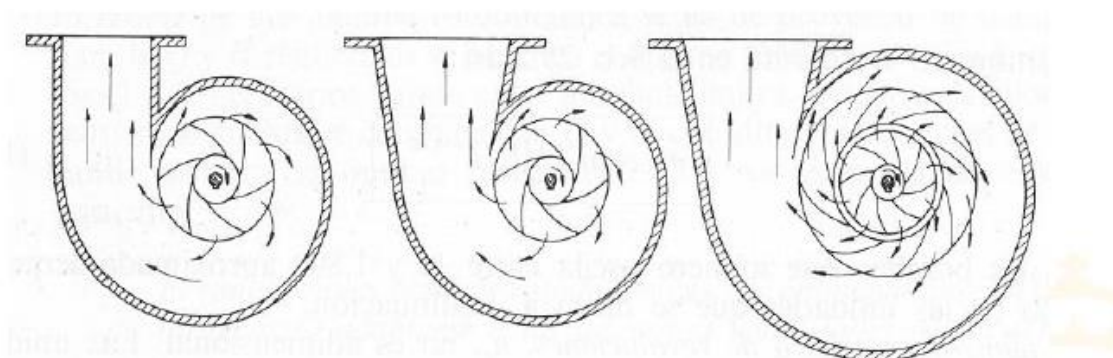


Figura 42. Caja espiral, Corona directriz y Cono difusor

- 2) La función de la caja espiral es doble, por una parte, dirigir el fluido que sale del rodete hacia la salida, por eso tiene esa forma de espiral logarítmica, y, por otra parte, transformar energía cinética en presión. El cono difusor consigue aumentar la presión del fluido mediante un aumento suave de la sección de la salida, reduciendo así la velocidad del fluido. La función de la corona directriz también es frenar el fluido para conseguir un aumento de la presión.
- 3) La carcasa es la parte estructural de la bomba la cual hace que no se produzcan fugas y mantiene todo el conjunto en un sistema cerrado y les aporta rigidez frente a las excitaciones externas. El material que se suele usar es una fundición GG25 o GGG50, pero en el caso de nuestra bomba se requerirá un material con menos prestaciones pues no vamos a utilizar con eficiencia el acero de fundición.

- 4) El eje tiene como función transmitir la energía mecánica obtenida en el motor al rodete, y así este pueda transmitirla al fluido. Tiene que estar fabricado con material que resista los momentos torsores y flectores que se van a producir en la máquina y hay que tener especial cuidado con esta parte, ya que, si se produce una fisura o está mal fabricada, puede acabar destrozando toda la máquina. En relación al eje, tenemos los cojinetes, que sirven para darle al eje el soporte que necesitan, y suelen venir en parejas.
- 5) El sistema de estanqueidad es una parte muy importante de la turbomáquina, ya que, es el encargado de que no se produzcan fugas del fluido por la parte del eje, al ser una parte que se anexa al eje. Los diferentes sistemas de estanqueidad son los retenes, empaquetadura (prensaestopas), cierre laberintico y cierre mecánico.
- 6) La última parte de la que hablaremos son las bridas de entrada y de salida, que son la entrada y la salida de la máquina, y son las partes de unión con la instalación, y debe de estar perfectamente cerrada para que no haya fugas.

Un esquema más detallado de la bomba es el de la Figura 43, en el que se puede observar perfectamente todas las demás partes no mencionadas.

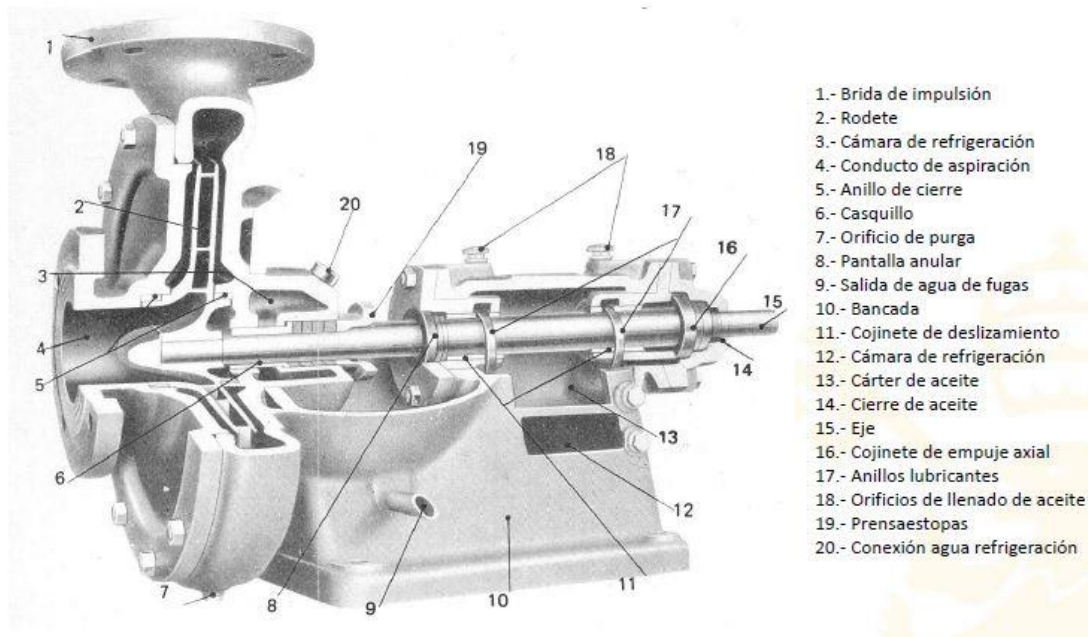


Figura 43. Esquema de partes de la bomba

Tipos de bombas

Las bombas se pueden clasificar en varias categorías, dependiendo del flujo en el rodete, el número de flujos, la posición del eje, el número de escalonamientos y la presión o altura suministrada. La clasificación es la siguiente:

1) Según la dirección del flujo del rodete:

- Radial
- Diagonal
- Axial

2) Según el número de escalonamientos:

- Simple o de un escalonamiento
- Compuesta o de varios escalonamientos

3) Según el número de flujos:

- De un flujo o simple aspiración
- De dos flujos o doble aspiración

4) Según posición del eje:

- Horizontal
- Vertical
- Inclinado

5) Según la presión suministrada:

- Baja presión
- Media presión
- Alta presión

Pérdidas en la bomba

En las bombas hidráulicas, como en todas las máquinas, existen cierto tipo de pérdidas, que son normales por naturaleza. Dentro de la bomba se van a producir 3 tipos de pérdidas: mecánicas, volumétricas e hidráulicas.

Las pérdidas mecánicas se van a producir entre el eje y el motor eléctrico, al tener una pequeña resistencia por los apoyos, los cojinetes. El segundo tipo de pérdidas son las volumétricas y son las que se producen por el caudal que se pierde entre cierre mecánico y el eje; y por el caudal en recirculación por culpa del rodete. Estos dos tipos de pérdidas se pueden calcular y se saben por qué se producen, pero el último tipo de pérdidas no se sabe con exactitud cómo ocurren y son las llamadas pérdidas hidráulicas.

Triángulos de velocidades en las bombas

Los triángulos de velocidad sirven para conocer todas las componentes de la velocidad del flujo cuando esta pasa por la entrada y salida del rodete. Son bastante útiles para el diseño del rodete de la bomba y para resolver problemas en donde se quiere conocer todas las componentes.

En el triángulo se puede distinguir las distintas variables: la velocidad absoluta del fluido (c), la velocidad relativa del fluido (w) y la velocidad lineal del rodete (u). Los dos ángulos importantes son: el que forma la velocidad absoluta del fluido con la velocidad lineal del rodete (α) y el ángulo que forman la velocidad relativa del fluido y la velocidad lineal del rodete (β). Todas las velocidades se miden en m/s y los ángulos en grados.

En las bombas el parámetro más importante de diseño es el ángulo β_2 , siendo las características principales teóricas de la bomba dependientes de este ángulo, siendo los valores comprendidos entre 20° y 30° los más favorables.

Los triángulos de velocidades se pueden observar en las Figuras 44 y 45, y todas las fórmulas necesarias para obtener todas las variables del triángulo.

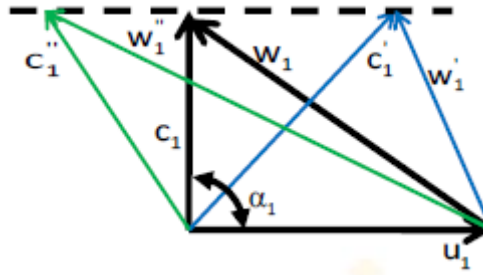


Figura 44. Triángulo de velocidades de la entrada del rodete

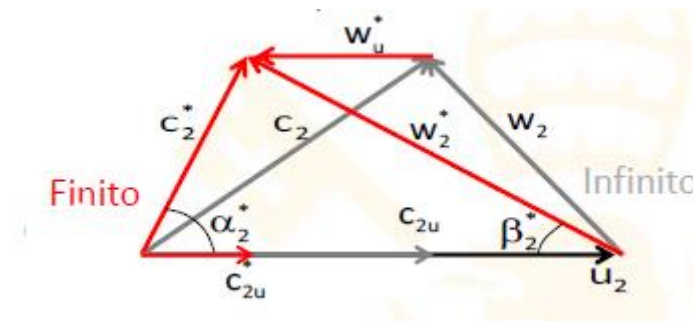


Figura 45. Triángulo de velocidades de la salida del rodete

$$c_i^2 = u_i^2 + w_i^2$$

$$c_{iu} = c_i * \sin \alpha \quad y \quad c_{im} = c_i * \cos \alpha$$

$$u_i = \frac{\pi * d_i * n}{60}$$

Curvas características de una bomba

Las bombas hidráulicas tienen unas curvas características que describen los puntos de funcionamiento en las que estas pueden trabajar. Estas curvas son muy importantes, ya que, si se tiene la curva de la bomba y de la instalación, se puede obtener el punto de funcionamiento de la instalación, que se obtendrá cortando una curva con la otra. La ecuación de la curva de una bomba y la instalación son las siguientes:

$$H_B = A - B * Q^2$$

$$H_{inst} = C + D * Q^2$$

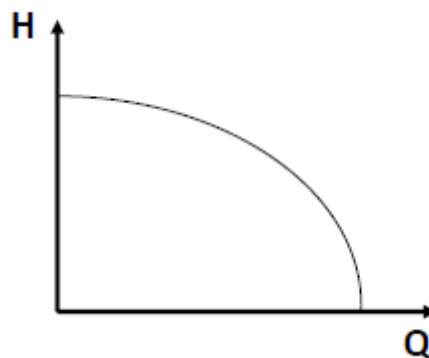


Figura 46. Curva característica de una bomba

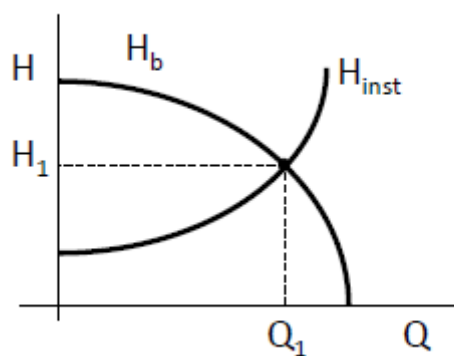


Figura 47. Intersección entre curva de bomba y de instalación

Estas curvas son muy necesarias para observar el comportamiento de la bomba e instalación, e incluso para obtener otras curvas de la misma bomba con número de revoluciones distinta o de una bomba geoméricamente semejante con una escala inferior o superior.

DESARROLLO DEL PROYECTO

DATOS Y OBSERVACIONES INICIALES

Antes de todo, para poder realizar el proyecto necesitamos conocer una serie de incógnitas del terreno como la altura a la que debemos subir el agua y la distancia del embalse aguas abajo a la presa. Además, necesitamos hacer una estimación del caudal máximo que tenemos que subir para obtener la bomba adecuada y que sea realmente efectiva.

Los parámetros que queremos conocer son complicados de obtener en esta situación, ya que, al no tener ninguna información del terreno, debemos de sacar los datos de las imágenes que tenemos del Google Maps como en la Figura 48. Todo lo que saquemos serán datos aproximados que luego en la realización del proyecto se intentarán adecuar a las nuevas medidas.

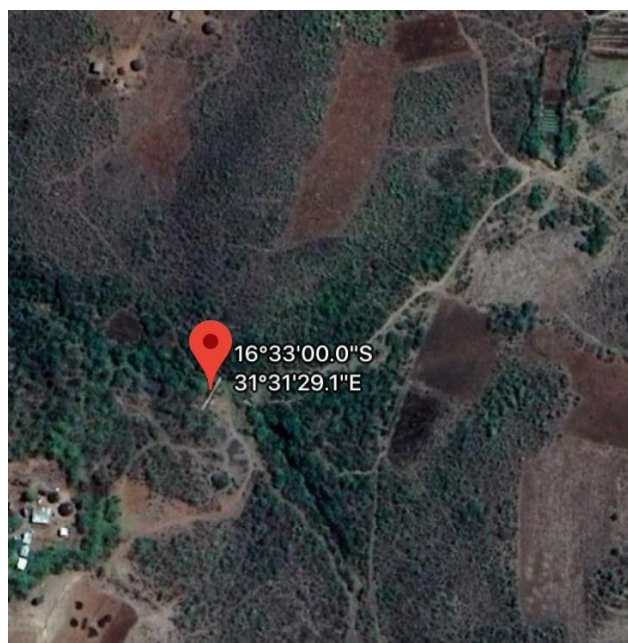


Figura 48. Coordenadas de la comunidad

Gracias a esta imagen y con la herramienta de medición de Google Maps, podemos calcular la distancia que hay al embalse aguas abajo de la presa como se puede observar en la Figura 49. Hemos obtenido una distancia de 61,83 metros y con una diferencia de altura de 2,5 metros. El dato de la altura la hemos sacado gracias a la Figura 7, en la cual gracias a las curvas de nivel podemos dar un dato aproximado de la altura real del desnivel.

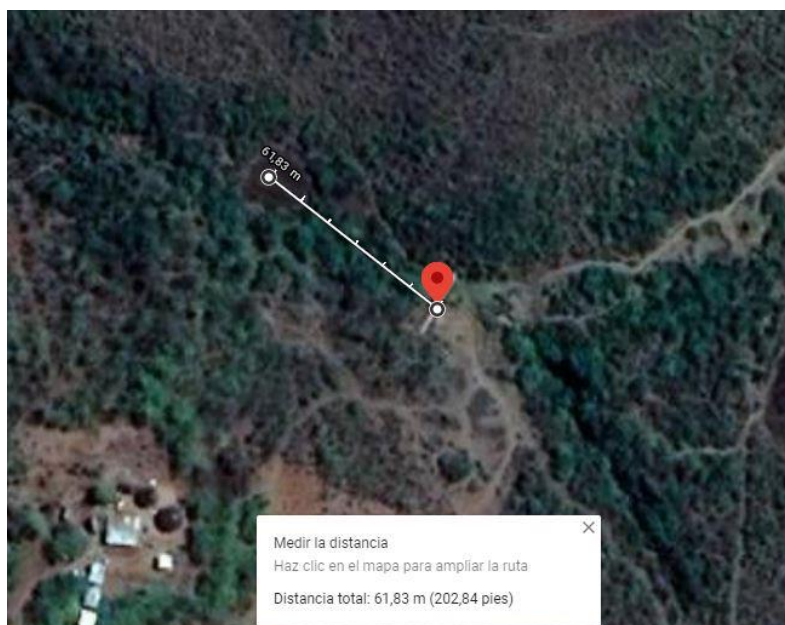


Figura 49. Medida de la distancia del embalse aguas abajo

El otro parámetro que debemos de definir es el caudal que va a circular por nuestra instalación, el cual lo sabremos al escoger el tipo de tubería correspondientes a las necesidades de la bomba.

Como observación, al haber estudiado qué tipo de bomba se utilizan con este tipo de alturas, podemos concluir que van a tratarse de bombas hidráulicas de pequeño tamaño y la mayoría de estas son bastante frágiles, por lo que o encontramos una bomba que sea robusta o se estudiará la viabilidad de crear una bomba de acero inoxidable mediante impresión 3D, ya que debemos asegurarnos que esta dure en el tiempo y no dé problemas.

CALCULOS PREVIOS

En esta sección se realizarán los cálculos previos al diseño de la instalación, en el que trataremos con los datos obtenidos en el apartado de datos iniciales. Se hace hincapié en que los datos son una aproximación, ya que, los datos reales se extraerán en el momento

de adaptación del proyecto cuando nos hallemos en el lugar. Los datos se van a poder observar en las Figuras 50 y 51.



Figura 50. Distancia de la presa al embalse aguas abajo

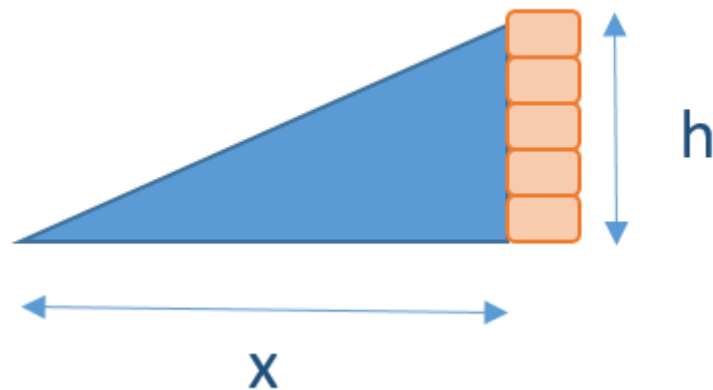


Figura 51. Distancias del terreno

$$x=61,87 \text{ m} ; h=2,5 \text{ m}$$

Para empezar, trataremos de realizar el modelo más sencillo para tener una idea de los datos que manejamos, e iremos poco a poco haciéndolo más complejo, teniendo en cuenta que la mano de obra que realizará el proyecto no está acostumbrada a trabajar con las herramientas y el material necesario.

La longitud de las tuberías de la instalación como mínimo tiene que ser, si la inclinación del terreno nos favorece, la hipotenusa de la Figura 51, que sería igual a 61.92 m.

$$a = \sqrt{(x^2 * h^2)} = 61.92 \text{ metros}$$

La longitud media sería la suma de la base y la altura del terreno ($x + h$) que sería igual a 64.37 m, y la máxima dependerá de las complicaciones del terreno, ya que, igual tiene que recorrer distancia en perpendicular a la dirección de la hipotenusa, y haciendo una estimación sería 66.82 m. El intervalo por tanto sería:

$$L = 64.37 \pm 2.45 \text{ m}$$

Por otra parte, se va a calcular la distancia media del embalse a las plantaciones de forma similar a la que se ha hecho antes. Para esto, va a ser necesario calcular la menor distancia que hay desde el embalse aguas abajo hasta las plantaciones y la altura a la que están. Como podemos observar en las Figuras 52 y 53 la mínima distancia del embalse a las plantaciones es de 37.88 metros.



Figura 52. Distancia mínima del embalse a las plantaciones

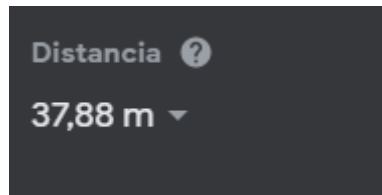


Figura 53. Dato obtenido de la distancia del embalse a las plantaciones

Con este dato y el obtenido gracias a las curvas de nivel de la Figura 8, podemos hacer el mismo calculo que antes y saldría una distancia media de:

$$x = 37.88 \text{ m} ; h = 1 \text{ m}$$

$$a = \sqrt{(x^2 * h^2)} = 37.91 \text{ metros} = \text{distancia mínima}$$

$$L = 38.91 \pm 0.9 \text{ m}$$

El caudal que se tiene que subir por la instalación, haciendo estimaciones con la gráfica de la Figura 54, lo calculamos viendo que la precipitación máxima que puede haber se produce en enero, y es de 11.22 milímetro de agua, o lo que es lo mismo 11.22 litros por metro cuadrado. El mínimo es en julio y es de 2,2 mm y es muy disperso, por lo que sería mucho menos y no deberíamos contar con él. Por último, las precipitaciones medias son en abril y en octubre, y son respectivamente, de 7.44 mm y de 8.1 mm. Me gustaría aclarar que estos datos son la media de todo lo que llueve al mes entre los días que llueve.

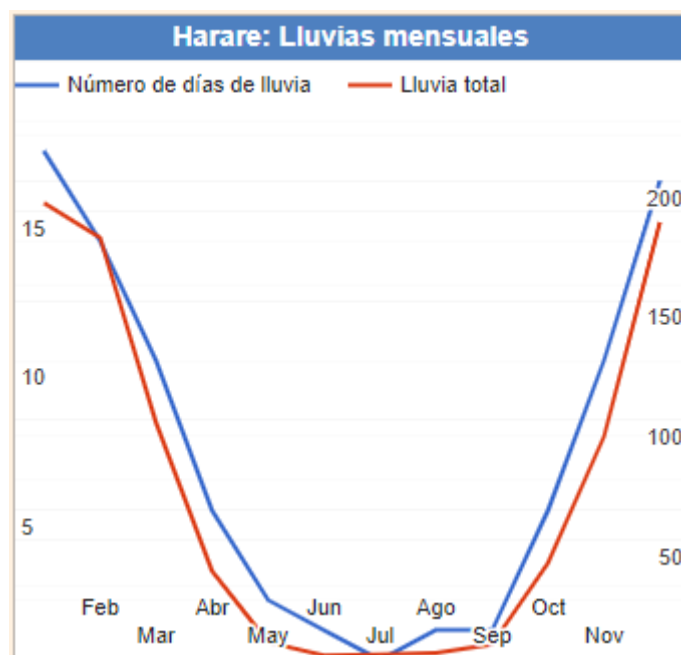


Figura 54. Gráfico de precipitaciones de Zimbabwe

Aunque tengamos las medidas de precipitaciones, con esto solo no podremos definir el caudal que necesitaremos. Para esto, necesitaremos una aproximación de cómo es la presa, cuanta energía vamos a obtener del agua en las turbinas y cuanta energía se va a consumir en la aldea. Así, podremos obtener la cantidad de energía que podremos usar para hacer funcionar la bomba, y cuanta energía recuperaremos finalmente. Con la energía necesaria y la altura obtenida de los planos de curvas de nivel podemos definir el caudal.

Sabiendo esto, podemos imaginar que se tratará de una bomba hidráulica de bajas prestaciones en altura y potencia, pero que sea robusta y soporte el paso de agua con partículas pequeñas, hasta 25/30 milímetros.

Finalmente, vamos a obtener el caudal en función de la potencia que se va a consumir en toda la instalación, restando a la potencia obtenida por la bomba el consumo eléctrico de todas las infraestructuras, quedando así la potencia que se puede usar para regar los cultivos y para almacenar de nuevo el agua en la presa.

PROPUESTA DE PROYECTO

La propuesta final que se va a dar a este proyecto es la de una instalación hidráulica formada por una bomba hidráulica y una serie de tuberías en serie para dirigir el flujo, con dos válvulas para que cuando generemos la bifurcación de la tubería, se pueda llevar el agua tanto a la presa como a las plantaciones cuando sea necesario. En esta bifurcación solo podrá ir el agua por una dirección, por eso, se necesitan dos válvulas, en las que explicaremos más adelante los modos de disponer las válvulas para poder dirigir el agua en una dirección o en otra.

El mejor material para usar en las tuberías es acero inoxidable, ya que, es muy duradero y es muy difícil que se fracture y se deteriore, pero debido a las características del proyecto, es más razonable usar unas tuberías de pvc, un polímero que es muy duradero, barato y que funciona muy bien en este tipo de proyectos. El diámetro de la tubería va a venir indicado por la bomba que se instale.

Las válvulas que se van a instalar van a ser de tipo aguja como se puede observar en la Figura 55, ya que nos ofrecen la posibilidad de estar abriéndolas y cerrándolas sin que haya un gran desgaste de la válvula y ofrecen la posibilidad de regular el caudal, que nos va a ser muy útil para que cuando encendamos o apaguemos la bomba no se produzcan golpes de ariete. En las válvulas no vamos a ahorrar dinero puesto que, son solo dos y la diferencia de precio entre una de plástico y una de acero inoxidable no es muy grande, no como en las prestaciones que proporcionan.



Figura 55. Válvula tipo aguja

La parte más importante de este proyecto es la bomba hidráulica, por lo que es de sentido común que procedamos a usar la mayor cantidad del presupuesto en ella. Se necesita una bomba hidráulica que sea robusta, eficaz (con buen rendimiento), duradera y que necesite poco mantenimiento. Hay que tener muy en cuenta que la instalación que se ponga tiene que ser de fácil uso, ya que la gente de la comunidad no tiene muchos conocimientos de este tipo de trabajos y hay que hacer que sea lo más sencillo para que ellos lo utilicen constantemente.

La bomba que se elige necesita cumplir las prestaciones que hemos calculado anteriormente, siendo la altura de 2.5 metros y el caudal fijo que vamos a obtener del agua que se necesitará diariamente para regar los campos de la escuela de agricultura.

Estos datos han sido sacados del Trabajo de Fin de Grado de un compañero de la escuela, que realiza el estudio de la presa. Para empezar, se ha calculado toda el agua necesaria para las plantaciones sabiendo que tipo de cosecha va a haber y en qué época del año y el agua que va a haber que almacenar, como se puede observar en la Figura 56. El área del terreno es alrededor de 25.000 m² y la mitad de la parcela se utilizará para cultivar maíz, y la otra para cultivar ciruelos y arándanos.

Mes	Agua requerida (m^3)
Enero	2176
Febrero	1966
Marzo	2176
Abril	2106
Mayo	2176
Junio	2106
Julio	2176
Agosto	2106
Septiembre	2176
Octubre	2106
Noviembre	2176
Diciembre	2106

Figura 56. Demanda de agua por la generación eléctrica

En la Figura 57 se hace una distinción para saber a dónde va destinada el agua necesaria, si es para el regadío o si es para la central hidroeléctrica, esto es bueno para el futuro, por si se quiere calcular la cantidad de agua necesaria al mes para regar otra cosecha en la plantación.

Mes	Agua requerida regadío m^3	Agua requerida central hidroeléctrica m^3	Agua requerida total m^3
Enero	-	2176	2176
Febrero	-	1966	1966
Marzo	-	2176	2176
Abril	18	2106	2124
Mayo	297	-	297
Junio	323	-	323
Julio	323	-	323
Agosto	348	-	348
Septiembre	608	-	608
Octubre	2947*	-	2947*
Noviembre	1704	2176	3880
Diciembre	-	2106	2106

Figura 57. Distinción de la demanda de energía eléctrica de la presa

Mes	Precipitaciones (m ³)	Evaporado (m ³)	Demanda (m ³)	Aprovechamiento (m ³)
Enero	36877,89	375,193	2176	2176
Febrero	27854,58	356,72	1966	1966
Marzo	16673,52	454,181	2176	2176
Abril	2550,07	420,42	2124	2124
Mayo	392,32	90,29	297	460
Junio	196,16	37,14	323	460
Julio	196,16	40,63	323	460
Agosto	0	0,00	348	460
Septiembre	196,16	80,83	608	610
Octubre	2550,07	750,386	2947*	1800
Noviembre	12161,86	401,31	3880	3880
Diciembre	32954,71	375,193	2106	2106

Figura 58. Aprovechamiento de la energía por cada mes

Con todo esto, se puede concluir en que la mejor bomba hidráulica para la instalación tiene que ser una que esté formada de un material firme y robusto, con una altura de, por lo menos, 2 o 3 veces la altura calculada a la presa (2.5 metros) y una potencia tal que pueda dar un caudal que sirva tanto para regar las plantaciones como subir el agua a la presa.

Tras una búsqueda exhaustiva, se ha llegado a la conclusión de que la bomba ideal es la que se puede observar en la Figura 59, una bomba de agua sucia con unas características que da lugar a que puedan pasar partículas hasta de 35 milímetros. Tiene una capacidad de subir agua hasta 7 metros, un caudal de 0.004371 metros cúbicos por segundo y una potencia de 780 vatios, ideal para un proyecto de estas características.

La altura es más que suficiente, el caudal es también más que el necesario ya que el caudal que proporciona la bomba hidráulica, que es de $0.004371 \text{ m}^3/\text{s}$, nos da como máximo una circulación de 11329.63 m^3 al mes, más del triple necesario en noviembre; y una potencia muy baja, de 780 vatios, que no es un consumo muy elevado de potencia a final de año.



Figura 59. Bomba Einhell

Para esta bomba, la tubería necesaria tiene que ser tanto de 25 como de 32 milímetros de pvc como hemos explicado antes, con una longitud necesaria de 64 metros para devolver el agua a la presa y de alrededor 38 metros para llevar el agua a las plantaciones que se pueden observar en la Figura 60.



Figura 60. Plantaciones de la escuela de agricultura

CALCULO ENERGETICO DE LA COMUNIDAD

El cálculo energético es una de las cosas más importantes que se debe de obtener correctamente, ya que, esto va a ser la base de la bomba que se va a elegir y la energía que se necesitará almacenar en la presa. Una de las características más notables de este proyecto es la capacidad de almacenar energía de una forma bastante sencilla. De otra manera, el almacenamiento de energía en forma eléctrica sería complicado y habría que comprar baterías y encarecería bastante el proyecto, como suele ocurrir en los proyectos de placas solares. Gracias a que tratamos con energía hidráulica, podemos sobrepasar este obstáculo y reducir el costo del proyecto.

Para realizar el cálculo energético, que será una aproximación, se debe conocer el número de viviendas a las que hay que distribuir energía, gasto de energía medio por vivienda en este país y en esa zona, si se va a utilizar para el alumbrado de la comunidad y demás usos.

En la comunidad hay, o está en proceso de hacerse:

1. Una escuela de agricultura, el cual se divide en un edificio en el que se ubicará la escuela y otro que servirá para la administración del centro.

2. Una línea de bombeo de agua para el riego de las hectáreas de la plantación de la escuela de agricultura.
3. Una clínica médica básica, en el que hay dos habitaciones para los pacientes y una sala de espera para los acompañantes de los enfermos.
4. Una serie de 10 viviendas unifamiliares ubicadas alrededor de la presa y que tiene una instalación eléctrica muy básica que consta únicamente de luz.

Con esto, se puede obtener el consumo energético de toda la comunidad y establecer el margen en el que podemos trabajar para almacenar energía.

Se sabe que las viviendas tienen un consumo de energía muy bajo, ya que solo constan de luz para alumbrar el hogar y suponiendo que cada vivienda tiene una media de 4 bombillas de 60 vatios, que son las más comunes, tendrían el siguiente consumo anual y por hora:

Consumo energético de las viviendas

$$4 * 10 * \left(\frac{60}{1000} \right) = 2.4 \text{ kW}$$

Consumo energético anual máximo de las viviendas

$$4 * 10 * \left(\frac{60}{1000} \right) * 24 * 365 = 21024 \text{ kWh}$$

Para calcular el consumo medio, hemos estimado una media de 4 horas de uso de bombillas al día, ya que, en Zimbabue suele haber casi 12 h de noche y de estas, si

duermes una media de 8 horas, la media normal de una persona, solo te quedarán 4 horas para el uso de las bombillas en la vivienda.

Consumo energético anual medio de las viviendas

$$4 * 10 * \left(\frac{60}{1000} \right) * 4 * 365 = 3504 kWh$$

	Bombilla incandescente	Fluorescente compacta	LED
			
450 lúmenes 3 horas/día	40 W 7,9 €/año*	10 W 2,0 €/año*	5 W 1,0 €/año*
800 lúmenes 3 horas/día	60 W 11,8 €/año*	15 W 3,0 €/año*	10 W 2,0 €/año*
1100 lúmenes 3 horas/día	75 W 14,8 €/año*	20 W 3,9 €/año*	14 W 2,8 €/año*
VIDA ÚTIL	1.000 h.	8-10.000 h.	25.000 h.

Figura 61. Consumo energético y duración de cada tipo de bombilla

Para calcular el consumo energético que tiene la clínica médica, deberíamos suponer un consumo de las máquinas, si las hay, y el consumo de las bombillas. La clínica tiene una sala de espera en la que podría haber 2 bombillas, y dos salas para los pacientes con una bombilla en cada una de ellas y deberíamos de suponer un consumo adicional por si en el futuro se disponen de máquinas médicas para tratar a los pacientes como un monitor para las constantes o un desfibrilador.

Consumo energético de la consulta médica

$$4 * \left(\frac{60}{1000} \right) = 0.24 \text{ kW}$$

Consumo energético anual máximo de la consulta médica

$$4 * \left(\frac{60}{1000} \right) * 24 * 365 = 2102.4 \text{ kWh}$$

Consumo energético anual medio de la consulta médica

$$4 * \left(\frac{60}{1000} \right) * 4 * 365 = 350.4 \text{ kWh}$$

El último cálculo que queda por hacer es consumo de los edificios de la escuela de agricultura, la escuela y el edificio de administración, así como el gasto que supone la bomba de agua para regar las plantaciones que hay al lado de esta escuela. El edificio de la escuela suponemos que cuenta con alrededor de 10 bombillas, igual que el de administración, y que en un futuro puede haber un ordenador para llevar la gestión de la escuela. La bomba tendrá un consumo de 780 vatios y esto supondremos que es la media de la potencia que se va a utilizar tanto para elevar agua como para regar las plantaciones.

Consumo energético de la escuela de agricultura

$$10 * \left(\frac{60}{1000} \right) = 0.6 \text{ kW}$$

Consumo energético del edificio de administración

$$10 * \left(\frac{60}{1000} \right) + 1 * \frac{200}{1000} = 0.8 \text{ kW}$$

Consumo energético de la bomba hidráulica

$$0.78 \text{ kW}$$

Consumo energético anual máximo de toda la escuela

$$((0.6 + 0.8) * 24 * 365) + (0.78 * 24 * 365) = 19096.8 \text{ kWh}$$

Consumo energético anual medio de toda la escuela

$$((0.6 + 0.8) * 4 * 365) + (0.78 * 4 * 365) = 3182.8 \text{ kWh}$$

Y, por último, se va a hacer un resumen y un consumo energético final de toda la instalación.

Consumo energético anual medio de toda la infraestructura

$$3182.8 + 350.4 + 3504 = 7037.2 \text{ kWh}$$

Con estos cálculos, se debe proceder a realizar la instalación de la turbina hidráulica de la presa, que es el proyecto que está realizando un compañero y que va a la par que este. Además, estos cálculos sirven para calcular el presupuesto del proyecto, que es el siguiente apartado que se va a realizar.

PRESUPUESTO

En este punto, se va a estudiar la viabilidad del proyecto creando un apartado donde se van a meter todos los gastos e inversiones que va a tener el proyecto y se va a calcular el gasto total de la instalación del proyecto. En esta tabla, la Tabla 1, estarán todos los productos que necesitamos en el apartado de materiales, como va a ser la bomba, las válvulas y la tubería. El precio de todo esta sacado de páginas web de proveedores de estos productos, aunque en el futuro cuando se vaya a realizar el proyecto, los precios de estos productos pueden variar.

En el segundo apartado de la Tabla 1, se va a introducir todos los gastos de la instalación del proyecto como la mano de obra, la estructura de anclaje de la bomba y la instalación eléctrica. La mano de obra va a estar compuesta por gente de la comunidad, a la que vamos a compensar dándole la comida de todos los días, ya que, para ellos es una gran necesidad, y nosotros preferimos gastar más en el proyecto para que luego les sea más beneficioso.

El ingreso que se le puede sacar a este proyecto, por lo que se puede ver en la tabla de ingresos potenciales previstos, la Tabla 2, es muy superior a lo que va a costar realizar el proyecto; pero hay que tener en cuenta que el proyecto de la presa tiene un costo de alrededor de 30 mil euros. Con esto, se puede suponer que la inversión va a ser recuperada en 3 o 4 años si el costo de la turbina es 4 o 5 veces superior al de la bomba.

El maíz va a generar un beneficio doble para la comunidad, ya que, van a tener todo el maíz que quieran para comer y pueden comerciar con gran parte de ella. Lo mismo va a pasar con los ciruelos y arándanos, pero en mayor medida, porque va a ser más eficiente vender este producto para comprar otros que necesiten.

Descripción	Características	Proveedor	Unidad	Coste	Valor (€)
a) Materiales					
Válvulas tipo aguja	Acero inox. 1/8 ". Presión nominal 16 MPa	ASKAFA	2,0	11,56	23,12
Tuberías	PVC Ø 32 mm	ADEQUA	120,0	0,78	93,60
Bomba hidráulica de aguas sucias	780 W. 15.700 l/h. Paso de cuerpos extraños hasta 35 mm. Altura max. 8 metros. 230 v 50 Hz	EINHELL	1,0	50,95	50,95
Conector rápido	Acero inox. Ø 32 mm.	varios	7,0	1,3	9,10
b) Instalación y montaje					
Estructura de anclaje bomba					40,00
Mano de obra	Trabajo personal local: 4 personas y 10 días		320,0	0,5	160,00
Instalación eléctrica	Cableado		200,0	0,4	80,00
TOTAL COSTE PRESUPUESTO					456,77

Tabla 1. Tabla de gastos del proyecto

Ingresos potenciales previstos			<u>producto</u>	<u>coste</u>	<u>ingreso</u>
	Ahorro energético (coste oportunidad)	kwh	7.037,20	0,035	246,30
	Plantación tipología:	25000m2			
	a) Maíz	12500m2	15.875,00	0,23	3.651,25
	b) Arándanos	6250m2	6.250,00	0,75	4.687,50
	c) Ciruelos	6250 m2	12.500,00	0,30	3.750,00
TOTAL INGRESO ANUAL	(una vez productiva la cosecha)				12.335,05

Tabla 2. Tabla de beneficios potenciales previstos

Ahora, se explicará la viabilidad económica del proyecto. Durante los últimos meses del año anterior se planteó cómo íbamos a obtener el dinero para hacer posible dicho presupuesto de inversión y gastos, y cuáles serían nuestras fuentes de financiación. El importe total fue recaudado a través de un evento deportivo que se realizó el día 13 de marzo del año 2021 en un club de padel en Pozuelo, Madrid. En el torneo hubo una participación de más de 70 parejas a un coste inscripción de 20 euros. Además, se obtuvieron de forma gratuita regalos, prendas deportivas y productos consumibles como barritas energéticas de Hero, zumos Juver y golosinas Vidal. El evento tuvo mucho éxito, acudieron más de 300 personas y la recaudación total fue de 1.500 €. Con ello, conseguimos cubrir el valor necesario para la inversión prevista.

PLAN DE EJECUCION

En este apartado se va a explicar detenidamente el modo a llevar a cabo el proyecto para que se realice de la mejor forma posible, ya que la mano de obra de la que se va a disponer en este país no está bien cualificada para realizar este tipo de trabajos y, por lo tanto, se debe de explicar con detalle todos los pasos a seguir:

- 1) Antes de todo, se tiene que hacer un estudio de la zona para certificar que los datos que se han cogido y los cálculos realizados son correctos. Se ha de calcular la distancia de la presa al embalse aguas abajo, la distancia del embalse a las plantaciones y la altura que hay a la presa. Si se obtienen datos que difieren con lo sacado de los planos que tenemos del terreno, que va a ser lo más probable, se va a tener que volver a realizar los cálculos. Aunque haya cambios, no tendremos ningún problema porque la bomba hidráulica que se ha elegido tiene un gran margen para que no diera problemas si ocurría esto.
- 2) En segundo lugar, se va a tener que realizar un desbroce y limpieza del terreno en el que se va a instalar la bomba. Esto es necesario para que se pueda trabajar con comodidad y para que reduzcamos el riesgo de que pueda entrar en la bomba un cuerpo extraño superior a lo que puede hacer circular. En esta fase, se tiene que intentar dejar todo el terreno libre de plantas y extraer todos los cuerpos extraños que se encuentren en el lugar y esto será posible gracias a las

herramientas de las que dispondremos para el trabajo tales como: palas, hoces, rastrillos...

- 3) Después, se tendrá que realizar la instalación de la tubería desde el embalse hasta la presa y desde el embalse a las plantaciones. En esta fase, habría que hacer limpieza también de las zonas por las que va a ir la instalación e intentar fijarla lo mejor posible al suelo, pudiendo incluso llevarla por debajo del suelo si se ve beneficioso. Además, se ha de instalar las dos válvulas de tipo aguja en un lugar de fácil acceso y es preferible que se instalen lo más cerca de la bomba para que la tubería no almacene agua.
- 4) El siguiente paso es la instalación de la bomba, en donde se debe estudiar correctamente el lugar donde se va a colocar, para que, en lo posible, esté siempre cubierta de agua, que es lo que necesitamos para que pueda funcionar. Todas las bombas tienen que estar cebadas, esto es, que antes de encenderlas, estén llenas de agua y esto se puede hacer sumergiendo la bomba o haciendo vacío en la bomba para que succione el agua. Para que la bomba esté bien sujeta, se ha pensado detenidamente y la mejor solución es la creación de una estructura de la bomba, en la que una parte sujete la bomba de la mejor manera y ponerle unas patas para amarrarla al suelo, con una superficie de contacto con el suelo lo más grande posible y de un material que sea robusto y duradero como el acero inoxidable. El diseño de la estructura se deja para el momento de la instalación del proyecto, porque al no conocer el terreno, se supone que no vamos a conseguir ninguna estructura que pueda ser viable al cien por cien. El precio de la estructura se introducirá dentro de los gastos del presupuesto con un precio razonable.
- 5) Se tendrán que conectar las tuberías a la bomba a través de un conector rápido (racord), para que nos de la seguridad de que no se vayan a separar y que sea una conexión robusta. Las conexiones de las tuberías con las válvulas van a ser también con unos conectores rápidos.
- 6) Lo último que queda por instalar es la instalación eléctrica de la bomba, que en este caso va a ser muy sencilla, ya que, la bomba tiene un cable que se puede

enchufar directamente a la corriente y lo que se va a hacer es adquirir un alargador de cable de unos 200 metros aproximados, sacado con la herramienta de medir de Google Earth, para que pueda llegar a la aldea, como se puede observar en la Figura 62.



Figura 62. Plano final con instalación eléctrica

CONCLUSION DEL PROYECTO

Por todo lo que se ha explicado en este proyecto, se puede decir sin ninguna falta que es un proyecto totalmente viable, que va a generar un gran desarrollo en la comunidad gracias al riego de las plantaciones, que va a generar riqueza y lo más importante, va a hacer que la gente de la comunidad sepa que se les va a proporcionar toda la ayuda que necesiten cuando estemos allí realizándolo, y les dejaremos unas buenas instalaciones y unas directrices de cómo gestionarlas.

Además, el proyecto no va a generar ningún impacto negativo en el medioambiente, ya que la obra de la instalación va a ser muy pequeña y no va a afectar en nada al cauce del río.

BIBLIOGRAFIA

- Datosmacro, ``Datos económicos de Zimbabue``
- Wikipedia, ``Zimbabue``
- Asignatura de turbomáquinas de Univesidad Pontificia Comillas, ``Bombas hidráulicas`` Autores: Eva Maria Arenas Pinillas y Alexis Sanchez Cantizano
- Inoxalia, ``Tipos de válvulas``: <https://www.inoxalia.net/tipos-valvulas-distinto-funcionamiento/>
- Naciones Unidas, ``Objetivos de Desarrollo Sostenible``
- RTarquitectura, ``Consumo de bombillas``: <https://www.rtarquitectura.com/tipos-de-bombillas-consumo-y-luminosidad/>
- Historia de la electricidad, ``Empresa Provincial de Energía de Córdoba``
- Turmero, Pablo. ``Historia de la Mecánica de Fluidos``. Espacio web: Monografías.com.

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Presa de Mutange
- Figura 2. Situación geográfica del país
- Figura 3. Parámetros Socio-Demográfico

- Figura 4. Datos económicos de Zimbabue
- Figura 5. Pilares de la economía sostenible
- Figura 6. Clima de Zimbabue
- Figura 7. Precipitaciones en los diferentes meses
- Figura 8. Curvas de nivel del terreno
- Figura 9. Tornillo de Arquímedes
- Figura 10. Tornillo de Arquímedes en depuradora
- Figura 11. Bomba hidráulica
- Figura 12. Central hidroeléctrica reversible
- Figura 13. Central hidroeléctrica reversible de Okutataragi, Japon
- Figura 14. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)
- Figura 15. Cronograma del Trabajo de Fin de Grado
- Figura 16. Capa límite en placa plana
- Figura 17. Capa límite en esfera
- Figura 18. Diferentes fluidos con distintas densidades
- Figura 19. Molinos de viento de eje vertical
- Figura 20. Rueda hidráulica dentada
- Figura 21. Estudio de las diferentes posiciones de la rueda hidráulica
- Figura 22. Autores más destacados en la Mecánica de Fluidos
- Figura 23. Ciclo del agua
- Figura 24. Aprovechamiento de la fuerza del agua

- Figura 25. Microcentral hidroeléctrica
- Figura 26. Funcionamiento turbina hidráulica
- Figura 27. Funcionamiento de una bomba hidráulica
- Figura 28. Salto natural (cascada)
- Figura 29. Salto bruto en una central
- Figura 30. Entrehierro de la bomba
- Figura 31. Fuga de caudales
- Figura 32. Flujo de potencia en una bomba hidráulica
- Figura 33. Representación del caudal
- Figura 34. Cavitación en tubería
- Figura 35. Rodete erosionado por cavitación
- Figura 36. Posibles roturas debido a golpe de ariete
- Figura 37. Curva transformada para número de revoluciones distintas
- Figura 38. Curva transformada para distintos diámetros
- Figura 39. Número específico en función de la geometría
- Figura 40. Curvas de rendimientos frente a número específico de revoluciones
- Figura 41. Rodete radial
- Figura 42. Caja espiral, Corona directriz y Cono difusor
- Figura 43. Esquema de partes de la bomba
- Figura 44. Triángulo de velocidades de la entrada del rodete
- Figura 45. Triángulo de velocidades de la salida del rodete

- Figura 46. Curva característica de una bomba
- Figura 47. Intersección entre curva de bomba y de instalación
- Figura 48. Coordenadas de la comunidad
- Figura 49. Medida de la distancia del embalse aguas abajo
- Figura 50. Distancia de la presa al embalse aguas abajo
- Figura 51. Distancias del terreno
- Figura 52. Distancia mínima del embalse a las plantaciones
- Figura 53. Dato obtenido de la distancia del embalse a las plantaciones
- Figura 54. Gráfico de precipitaciones en Zimbabue
- Figura 55. Válvula tipo aguja
- Figura 56. Demanda de agua por la generación eléctrica
- Figura 57. Distinción de la demanda de energía eléctrica de la presa
- Figura 58. Aprovechamiento de energía por cada mes
- Figura 59. Bomba Einhell
- Figura 60. Plantaciones de la escuela de agricultura
- Figura 61. Consumo energético y duración de cada tipo de bombilla
- Figura 62. Plano final con instalación eléctrica

INDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Tabla de gastos del proyecto

- Tabla 2. Tabla de beneficios potenciales previstos

ANEXO

EXECUTION PLAN

This section will explain in detail how the project is to be carried out in the best possible way, since the workforce that will be available in this country is not well qualified to carry out this type of work and, therefore, all the steps to be taken should be explained in detail.

- 1) First, a survey of the area has to be done to certify that the data that has been collected and the calculations made are correct. The distance from the dam to the reservoir downstream, the distance from the reservoir to the plantations and the height to the dam must be calculated. If you get data that differs from what is taken from the ground plans that we have, which is going to be most likely, you're going to have to redo the calculations. Although there are changes, we will not have any problem because the hydraulic pump that has been chosen has a great margin so that it would not give problems if this happened.
- 2) In the second place, the site on which the pump is to be installed will have to be cleared and cleaned. This is necessary so that you can work comfortably and so that we reduce the risk that a foreign body may enter the pump in excess of what it can circulate. In this phase, you have to try to leave all the land free of plants and remove all the foreign bodies that are in the place and this will be possible thanks to the tools that we will have for the work such as: shovels, sickles, rakes...
- 3) Then, the pipe will have to be installed from the reservoir to the dam and from the reservoir to the plantations. At this stage, it would also be necessary to clean the areas through which the installation is to be carried out and to try to fix it as

best as possible to the ground, and even to bring it below the ground if it is beneficial. In addition, the two needle-type valves must be installed in an easily accessible location and it is preferable that they be installed as close to the pump so that the pipe does not store water.

- 4) The next step is the installation of the pump, where you must correctly study the place where you are going to place it, so that, if possible, it is always covered with water, which is what we need to make it work. All pumps have to be barley, that is, that before they are lit, they are filled with water and this can be done by submerging the pump or by making vacuum in the pump to suck the water. In order for the pump to be securely attached, careful thought has been given and the best solution is to create a bomb structure, in which a part holds the pump in the best way and puts legs to tie it to the ground, with as large a floor contact surface as possible and a material that is robust and durable as stainless steel. The design of the structure is left for the moment of the installation of the project, because not knowing the land, we are not supposed to get any structure that can be 100% viable. The price of the structure will be entered within the budget expenditure with a reasonable price.
- 5) The pipes will have to be connected to the pump through a quick connector (racord), so that it gives us the security that they will not separate and that it is a robust connection.
- 6) The connections of the pipes with the valves will also be with quick connectors. The last thing to install is the electrical installation of the pump, which in this case will be very simple, because, the pump has a cable that can be plugged directly into the current and what you are going to do is to acquire a cable extension of about 100 meters approximate, so you can reach the village.