



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Metodología para la Implantación de Picocentrales Hidráulicas

AUTOR:

Núñez Pérez, María

Tutor:

Castro Ruiz, Francisco

Valladolid, julio de 2021.





Quiero agradecer a OAN International la labor que hace y que me haya encomendado este proyecto y, a todos aquellos que confiaron en mí desde el inicio de mis estudios.

María





ÍNDICE GENERAL

1. ÍNDICE DE FIGURAS	7
2. ÍNDICE DE TABLAS	10
3. RESUMEN.....	11
4. ABSTRACT	11
5. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	13
5.1. PRESENTACIÓN Y OBJETIVOS	13
5.2. NECESIDAD Y CONTEXTO	14
5.2.1. OAN International	14
5.2.2. Situación energética en Benín	14
5.2.3. Principales problemas del sistema de electricidad en la comuna de Nikki	17
5.2.4. Búsqueda Bibliográfica preliminar	18
6. ESTADO DE LA TÉCNICA	20
6.1. PICOCENTRALES HIDRÁULICAS.....	20
6.1.1. Centrales eléctricas	20
6.1.2. Centrales hidráulicas	20
6.1.3. Minihidráulica.....	21
6.1.3.1. Tipos de minicentrales hidráulicas.....	22
6.1.3.2. Ventajas del uso de minicentrales hidráulicas.....	22
6.2. ANÁLISIS DE TIPOS DE TURBINAS.....	25
6.2.1. Introducción y clasificación de las máquinas de fluido	25
6.2.2. Introducción y clasificación de las turbinas hidráulicas	28
6.3. SELECCIÓN: TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES	32
7. DISEÑO DE LA TURBINA DE ARQUÍMEDES.....	36
7.1. EMPLAZAMIENTO	36
7.1.1. Determinación del caudal de diseño	36
7.1.1.1. Cálculo del caudal de diseño aplicando el Método Racional según la norma 5.2-IC	39
7.1.1.2. Cálculo del caudal de diseño con el coeficiente de escorrentía	51
7.1.2. Determinación del salto neto	54
7.2. DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TORNILLO.....	56
7.2.1. Parámetros internos y parámetros externos	56
7.2.2. Descarga del tornillo. Caudales	64
7.2.3. Cálculo de la altura <i>hin</i>	69
7.2.4. Limitaciones por el generador.....	74
7.2.4.1. Limitación de la velocidad de rotación	74
7.2.4.2. Limitación de potencia.....	75
7.3. RESULTADO DE DISEÑO	77



8. PREDISEÑO DE LA CENTRAL	80
8.1. OBRA CIVIL	80
8.2. INSTALACIÓN ELÉCTRICA	87
8.2.1. Alternador de coche como generador	87
8.2.1.1. Principales fallos de alternador de coche	89
8.2.2. Controlador eléctrico	89
8.2.3. Sistema de distribución y carga	90
9. MODELADO POR ORDENADOR	92
9.1. MODELADO DE UN PASO.....	92
9.2. DISEÑO DEL ACOPLAMIENTO MODULAR.....	96
10. PRESUPUESTO	99
10.1. COSTE DE MANO DE OBRA	100
10.2. COSTE DE MATERIAL	101
10.3. RESULTADO DEL PRESUPUESTO	102
11. CONCLUSIONES	103
12. BIBLIOGRAFÍA	104
ANEJOS.....	
1. MICROSOFT EXCEL CAUDALES.....	
2. MICROSOFT EXCEL CÁLCULO DISEÑO ÓPTIMO.....	
3. PLANOS.....	
3.1. Plano tornillo módulo. Impresión 3D.....	
3.2. Plano tornillo modular. Impresión 3D.....	
3.3. Eje salida	
3.4. Plano tornillo módulo. Soldadura.....	
3.5. Plano tornillo modular. Soldadura.....	

1. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución del consumo por forma de energía en Benín (Ktep).	15
Figura 2: Mapa de la distribución de la electrificación en Benín en 2017	16
Figura 3: Acceso a la electricidad (% de población)- Benín.....	17
Figura 4: “Dibujo esquemático de bombas de desplazamiento positivo: (a) pistón alternativo o émbolo, (b) bomba externa de engranajes, (c) bomba de tornillo doble, (d) paleta deslizante, (e) bomba de tres lóbulos, (f) doble pistón azimutal, (g) bomba peristáltica”	27
Figura 5: Esquema básico de una turbina Pelton.....	29
Figura 6: Turbina Pelton.	30
Figura 7: Turbina Francis.....	31
Figura 8: Esquema básico de una turbina Francis	31
Figura 9: Esquema básico de una turbina Kaplan de eje vertical.....	31
Figura 10: Turbina de Tornillo de Arquímedes del Jardín Botánico de Gijón...	33
Figura 11: Central de Turbina de Tornillo de Arquímedes en Austria	33
Figura 12: Estructura de una turbina de Arquímedes genérica	34
Figura 13: Peces descendiendo por el rotor de la turbina sin perjuicios.....	35
Figura 14: Tipificación de los años en función de la aportación registrada ...	37
Figura 15: Elaboración de la curva de caudales clasificados	38
Figura 16: Vista de la presa de Nikki.....	40
Figura 17: Cuenca aportante al embalse.	41
Figura 18: Longitud del cauce.....	41
Figura 19: Perímetro y área de la cuenca aportante.....	42
Figura 20: Longitud del cauce.....	42
Figura 21: Rutas de perfil para cotas y pendientes.....	42
Figura 22: Precipitaciones de lluvia mensual promedio de Nikki, Benín.....	44
Figura 23: Mapa del Ministerio de Fomento de 2016, de coeficiente <i>I1Id</i>	47
Figura 24: Mapa de regiones de España para el cálculo del coeficiente corrector.....	49
Figura 25: Muestra de la tabla Excel para el cálculo del caudal por semanas	52
Figura 26: Hietograma promedio de Nikki.	53
Figura 27: Hidrograma de Nikki en un año promedio.	53
Figura 28: Esquema general de un salto de agua	54
Figura 29: Fotografía 1 del azud de Nikki.	55
Figura 30: Fotografía 2 del azud de Nikki.	55
Figura 31: Fotografía 3 del azud de Nikki sin caudal.	55
Figura 32: Vista de perfil de una sección de un Tornillo de Arquímedes de 2 álabes.	56
Figura 33: Valores del diámetro exterior y del ángulo de inclinación en función del caudal de diseño	57

Figura 34: Vista 1 del volumen por rotación	60
Figura 35: Vista 2 del volumen por rotación	60
Figura 36: Tabla de relaciones de parámetros óptimos del tornillo de Arquímedes, en función del número de álabes	61
Figura 37: Representación gráfica de los datos de la tabla de valores óptimos de ρ y de λ	62
Figura 38: Representación gráfica de los datos de la tabla de valores óptimos de ν	62
Figura 39: Balance de caudales.	64
Figura 40: Sección transversal de un tornillo de Arquímedes usado para una planta hidroeléctrica	65
Figura 41: Placas guía.	65
Figura 42: Definición de los ángulos $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$	68
Figura 43: Sección transversal de la entrada de un tornillo de Arquímedes. .	70
Figura 44: Sección de corte por el plano 3 de la Fig.43	71
Figura 45: Resultados del cálculo de k para diferentes valores de νt vs. ρ ..	72
Figura 46: Curva de velocidad del alternador frente a la corriente y a la potencia	74
Figura 47: Muestra del catálogo de alternadores de coche Bosch	76
Figura 48: Fotografías de los cultivos de la cooperativa Gah Maro	80
Figura 49: Fotografía del aliviadero del azud.....	81
Figura 50: Fotografía del murete del aliviadero que se necesitaría demoler parcialmente.....	82
Figura 51: Esquema de medidas en metros del azud de Nikki.....	83
Figura 52: Esquema ilustrativo de la segunda solución planteada.	83
Figura 53: Esquema ilustrativo de la tercera solución planteada.....	84
Figura 54: Fotografía del tramo horizontal del azud.	85
Figura 55: Partes de un alternador de coche	88
Figura 56: Croquis eje interior (Di).....	92
Figura 57: Extrusión eje interior.....	93
Figura 58: Croquis diámetro exterior (D0).....	93
Figura 59: Croquis del helicoidal 1.....	94
Figura 60: Croquis perfil del álabe.....	94
Figura 61: Extrusión álabe 1	94
Figura 62 : Croquis helicoidal 2, desfasado 180° respecto al helicoidal 1	95
Figura 63: Croquis álabe 2	95
Figura 64: Extrusión álabe 2	95
Figura 65: Croquis eje salida.....	96
Figura 66: Extrusión eje salida.....	97
Figura 67: Croquis agujero salida	97
Figura 68: Corte agujero salida.....	97
Figura 69: Croquis agujeros pasantes.....	98



Figura 70: Corte agujeros pasantes	98
Figura 71: Modelo para impresión 3D.....	98
Figura 72: Modelo para fabricación en hierro.....	99



2. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de centrales hidráulicas según su potencia generada.	21
Tabla 2: Emisiones de CO2 evitadas en 2010 por las centrales hidráulicas.	22
Tabla 3: Ratios de generación de empleo en 2010.	23
Tabla 4: Valores de la constante k para cada tipo de turbina	38
Tabla 5: Cotas y pendiente de las rutas de perfil.	43
Tabla 6: Valores iniciales para el Método Racional.	43
Tabla 7: Muestra de la tabla del valor inicial del umbral de escorrentía.	48
Tabla 8: Muestra de la tabla para el cálculo del coeficiente corrector del umbral de escorrentía.	49
Tabla 9: Método de Raws	51
Tabla 10: Datos sobre el azud de Nikki.	57
Tabla 11: Parámetros adimensionales internos.	59
Tabla 12: Valores numéricos de los ángulos $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$.	68
Tabla 13: Diseño óptimo final de la turbina de tornillo de Arquímedes.	78
Tabla 14: Salarios en España por categoría profesional	100
Tabla 15: Salarios en Benín por categoría profesional	100
Tabla 16: Mano de Obra Directa.	101
Tabla 17: Coste de material	102



3. RESUMEN

Numerosos países en vías de desarrollo no cuentan con suministro eléctrico seguro, estable y ecológicamente limpio, especialmente las zonas rurales. Las picocentrales hidráulicas, permiten generar energía renovable con pequeños saltos de agua. En concreto, la turbina de tornillo de Arquímedes tiene una alta eficiencia con un amplio rango de caudales y es robusta y fiable durante un largo periodo de vida. A mayores, tiene una fabricación relativamente sencilla para que pueda fabricarse e implantarse en cualquier lugar del mundo con un pequeño salto de agua de al menos 1m.

Este trabajo presenta un programa de diseño de turbinas de tornillo de Arquímedes en el soporte de Microsoft Excel, para ser implementado en cualquier emplazamiento. Concretamente, se ha diseñado una picocentral en la comuna de Nikki, Benín, priorizando la autonomía de los trabajadores locales para realizar todos los procesos requeridos y la compra de materiales en lugares cercanos.

Palabras clave: Picocentral, turbina, tornillo de Arquímedes, hidráulica, sostenibilidad.

4. ABSTRACT

Many developing countries do not have a safe, stable, and ecologically clean electricity supply, especially in rural areas. Pico-hydro power generation systems allow the production of renewable energy with low heads. Particularly, the Archimedean screw turbine has a high efficiency with a wide range of flow values, and it is robust and reliable over a long lifetime. In addition, it is relatively simple to manufacture so that it can be constructed and implemented anywhere in the world with a low head of at least 1m.

This paper presents a design program of Archimedean screw turbines in Microsoft Excel support, to be implemented at any location. Specifically, a pico-hydro power generation system has been designed to the municipality of Nikki, Benin, prioritizing the autonomy of local workers to carry out all the required processes and the purchase of materials in nearby places.

Keywords: Pico-hydro system, turbine, Archimedean screw, hydraulic, sustainability.



5. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

5.1. PRESENTACIÓN Y OBJETIVOS

Este trabajo se ha llevado a cabo en colaboración con OAN Internacional y con Ignacio Gómez Cambrero, compañero de la escuela técnica superior de ingeniería ICAI, que ha llevado a cabo el apartado 9 de este documento y los planos del Anejo 3.

El principal objetivo del presente trabajo es el de colaborar en el progreso de la comunidad de Nikki (norte de la República de Benín, África) y en el aumento de su calidad de vida. El proyecto está encuadrado dentro del Comité de Infraestructuras, Agua y Energías de OAN Internacional, focalizado en la producción de energía eléctrica para iluminación a través de fuentes renovables para así cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Dicho propósito se persigue por medio del estudio de la implantación de una picocentral hidráulica aprovechando sus saltos de agua. Se prioriza el hecho de que la fabricación e implementación de la instalación sea llevada a cabo por los trabajadores autóctonos y con sus recursos propios, fomentando su independencia. Por lo tanto, durante todo el presente trabajo se tiene en cuenta la utilización de materiales, piezas, y procesos de fabricación que puedan llevarse a cabo en el terreno, sin necesidad de importar nada del extranjero. Para ello, los objetivos perseguidos son los que se muestran a continuación:

- En primer lugar, la evaluación de los caudales disponibles en el azud de emplazamiento a lo largo del año, obteniendo así los datos de entrada para el diseño de la turbina.
- A continuación, el análisis de las características de los diferentes tipos de turbinas hidráulicas más utilizadas en la actualidad y la toma de decisión de aquella más propicia para su fabricación e instalación en el contexto del proyecto.
- Posteriormente, la realización de los cálculos del diseño óptimo de la turbina seleccionada, así como el análisis de los resultados y de las conclusiones.

A mayores, se estudia la posibilidad de que la experiencia en Nikki sea extensible a otras zonas rurales aisladas eléctricamente de países en vías de desarrollo. De esta manera el presente trabajo puede ser un prototipo y ejemplo para otros proyectos en ubicaciones diversas. Por ello, se desarrolla un programa con la hoja de cálculo Microsoft Excel, en la que se calculan los parámetros de diseño de la turbina hidráulica de tornillo de Arquímedes y su potencia, a partir de los datos de la corriente de agua a aprovechar.

5.2. NECESIDAD Y CONTEXTO

5.2.1. OAN International

OAN International es una organización no gubernamental para el desarrollo, cuyas siglas significan Objetivo Analizar Nikki. Su cometido consiste en acompañar en el progreso de la comuna beninesa de Nikki mediante el intercambio de conocimientos. Además, busca crear un nuevo arquetipo de cooperación sostenible y replicable con un voluntariado crítico y responsable.

La organización fue fundada en 2014 y en la actualidad se estructura en cinco departamentos que abarcan los distintos campos de acción:

- Comité de agronomía.
- Comité biosanitario.
- Comité de energía, agua e infraestructuras.
- Comité de políticas sociales.

Dentro del comité dedicado a la ingeniería, se priorizan los servicios básicos de agua, saneamiento, gestión de residuos y acceso a energía limpia y segura. Buscando contribuir a su desarrollo, se han llevado a cabo proyectos como el de perforación y construcción de bombas hidráulicas *Vergnet* para dar acceso a agua potable; el desarrollo de una red de reparadores de bombas, con las formaciones pertinentes para formar una veintena de mecánicos locales, o el proyecto *Fassol*. Este último consistió en atraer empresas que ofrecieran kits de paneles solares de baja potencia asequibles para la población (*Objetivo Analizar Nikki International [OAN]*), (Cadañá, 2017).

El presente trabajo se desarrolla en la línea ingenieril del último proyecto explicado, la búsqueda de acceso a energía eléctrica en zonas rurales aisladas o de países en vías de desarrollo.

5.2.2. Situación energética en Benín

Benín, se encuentra en el golfo de Guinea, cuya capital es Porto-Novo y su sede del gobierno está en Cotonou, que ejerce de núcleo económico y es el mayor centro de población. Sus fronteras son con Nigeria al este, y Togo al oeste; y con Níger y Burkina Faso al norte. Benín es uno de los países africanos occidentales menos desarrollados en materia energética. Más del 95% de la energía consumida en Benín es importada. El 85% de la electricidad proviene de Nigeria, Costa de Marfil y de Ghana y el total de los productos petrolíferos se importan del extranjero (*DatosMundial, 2016*). Los costes de importación energética suponen aproximadamente un 4.4% del PIB, lo cual frena la evolución del país, siendo muy susceptible de sufrir las oscilaciones del precio (*Mesa, 2017*).

El consumo de energía eléctrica en Benín en 2018 fue de 1188 GWh (*Expansión Datosmacro, 2018*). “El consumo per cápita al año es aproximadamente la mitad que el de los países de África Subsahariana y menos de una cuarta parte del de la media mundial” (*Mesa, 2017*). El principal sector de energía del país es la biomasa, después los productos petrolíferos y la electricidad, representando únicamente un 2.7% en el año 2015, como se puede observar en la Fig.1. En la actualidad estas proporciones apenas han variado.

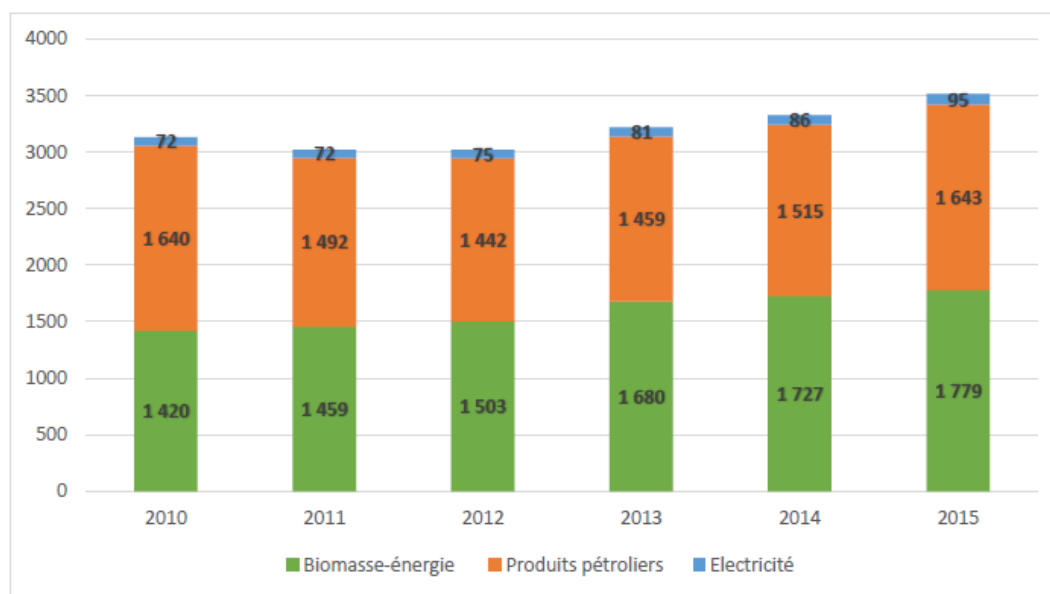


Figura 1: Evolución del consumo por forma de energía en Benín (Ktep) (Autorité de Régulation de l'Électricité [ARE], 2018).

En cuanto a los sectores de consumo, la mayor parte de la energía se consume en los hogares, con unos datos que oscilan el 65% y solamente un 20% en el sector transportes y un 15% en el industrial (*Mesa, 2017*).

La Société Béninoise d'Énergie Electrique (SBEE) es la encargada de la producción y distribución de la electricidad en Benín, siendo un grupo empresarial público en forma de monopolio. El 88% de la energía eléctrica distribuida por la SBEE se produce en las presas hidroeléctricas de Akosombo en Ghana y Nangbéto en Togo. El 12% proviene de centrales térmicas aisladas de la Región Norte. La potencia instalada es de alrededor de 635MW (*Société Béninoise d'Énergie Electrique, 2020*).

En la Fig.2 se muestra la distribución desigual a lo largo del territorio beninés, según se disponía en el año 2017. A las zonas rurales llega mucha menos electrificación que a las urbanas, como se puede observar.

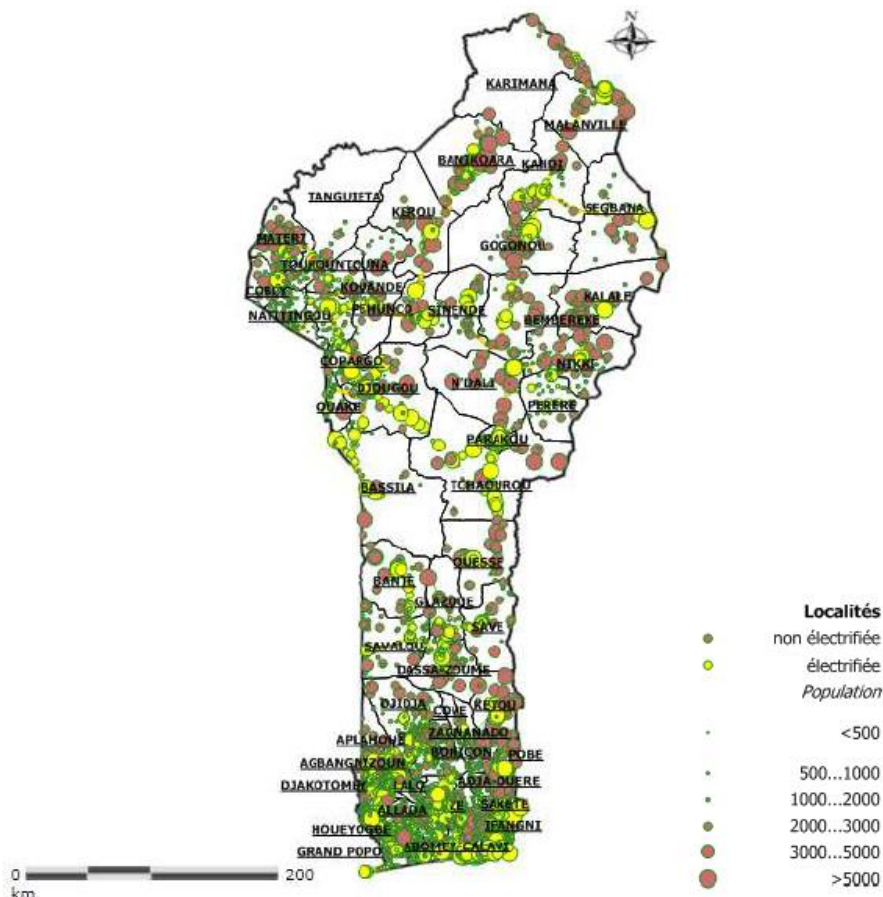


Figura 2: Mapa de la distribución de la electrificación en Benín en 2017 (Mesa, 2017).

Benín es un país con potencial para un suministro autosuficiente desde el año 2020, debido al descenso de los precios de las tecnologías de energías renovables y el aumento de los combustibles fósiles. Sin embargo, la inversión financiera en proyectos de energías renovables en Benín ha sido solamente de 5 megavatios, el segundo país africano, después de Liberia, que menos ha invertido en este tipo de instalaciones (Vilar, 2012). A pesar de disponer de los recursos naturales suficientes, se tienen unos niveles muy bajos en conocimientos y formación técnica de trabajadores, lo que impide que las energías renovables y limpias sean explotadas en el territorio.

La utilización de fuentes renovables para la producción energética disminuye el uso de leña y grupos electrógenos, logrando de este modo el séptimo propósito de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: “Garantizar el acceso a una energía asequible, fiable, sostenible y moderna para todos”.

Este proyecto, presenta una alternativa de producción de energía eléctrica renovable, limpia y sostenible, con prioridad en que los trabajadores locales desarrollen todo el proceso del proyecto con sus recursos y con independencia de terceros.

5.2.3. Principales problemas del sistema de electricidad en la comuna de Nikki

En el departamento de Borgou de la República Democrática de Benín coexisten 8 comunas, siendo una de ellas la comuna de Nikki. A su vez, Nikki se organiza en los llamados “arrondissement” cuya traducción del francés es departamento. Hay 7 departamentos, siendo Nikki el que ejerce de capital (Santos, 2017).

Solamente el 41.528% de la población tuvo acceso a la electricidad en Benín en el año 2018, el cual es el dato más actualizado disponible (Fig.3). Sin embargo, se debe tener en cuenta el bajo acceso a la electricidad en las zonas rurales, donde se concentra el 60% de la población de Nikki. Esto se debe a que la SBEE, ha priorizado durante las últimas décadas, la electrificación de las urbes beninesas. Desde el año 1990 la tasa de electrificación urbana ha crecido del 20 al 52.4%, sin embargo, la rural no alcanza el 3%, a pesar de que, en el Plan de Desarrollo Comunal de 2017, el ministerio se propusiera objetivos más ambiciosos (Ministere de la decentralisation et de la gouvernance Locale/ Commune de Nikki, 2017), (Mesa, 2017).

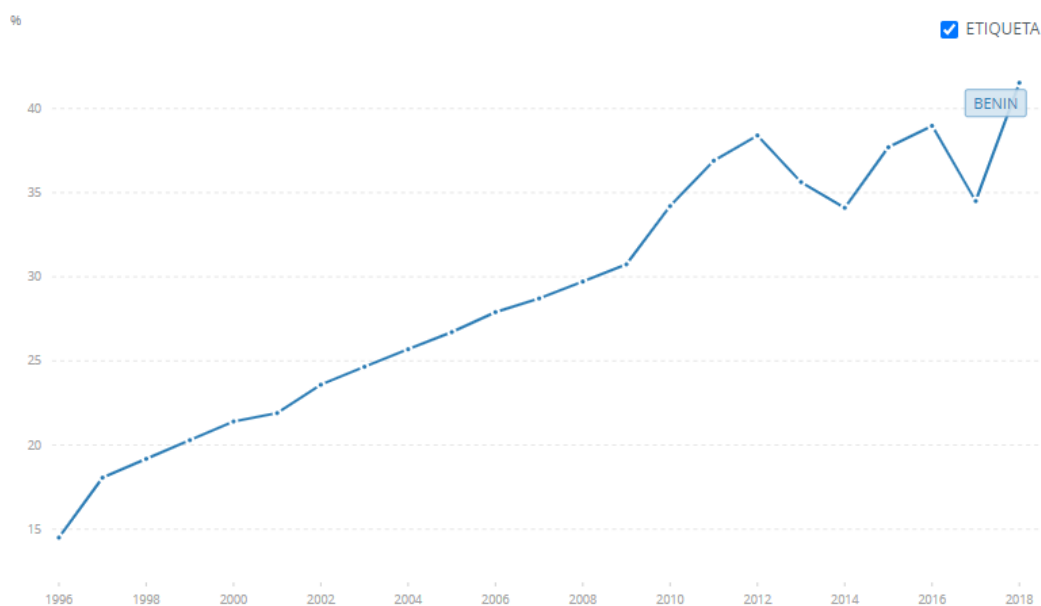


Figura 3: Acceso a la electricidad (% de población)- Benín (Datos del Banco Mundial 2018).

5.2.4. Búsqueda Bibliográfica preliminar

Al inicio del estudio de este trabajo, se consultaron varios documentos de diversas fuentes, para conocer qué proyectos e investigaciones se han llevado a cabo en electrificación de zonas rurales, en el diseño de turbinas de tornillo de Arquímedes, y en centrales hidráulicas de pequeña escala en distintos lugares del mundo. El fin de esta investigación inicial, fue el de contextualizar el proyecto y establecer unos objetivos novedosos pero alcanzables.

Concretamente, la base de datos de la UVA, Elsevier Science Direct Journals, ha proporcionado documentos de interés como:

- Nor F. Yah, Ahmed N. Oumer, Mat S. Idris. *Small scale hydro-power as a source of renewable energy in Malasya*, 2017.
- Abudukeremu Kadier, Mohd Sahaid Kalil... *Pico hydropower (PHP) development in Malaysia: Potential, present status, barriers, and future perspectives*, 2017.
- A.H. Elbatran, O.B. Yaakob... *Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: A review*, 2014.
- Julien Rohmer, Dominique Knittel... *Modeling and experimental results of an Arquimedes screw turbine*, 2015.
- S.J. Williamson, B.H. Stark, J.D. Booker. *Low head pico hydro turbine selectrion using a multi-criteria analysis*, 2012.
- J. Susanto, S,Stamp, *Local installation methods for low head pico-hydropower in the Lao PDR*, 2012.
- Silvia Vicente, Hans Bludsuweit. *Flexible design of a pico-hydropower system for Laos communities*, 2012.

También de la revista Sustainability se ha consultado el artículo:

- Arash Yoosef Doost, William David Lubitz, *Archimedes screw turbines: A sustainable development solution for green and renewable energy generation- a Review of a potential and design procedures*, 2020.

De la International Journal of Renewable Energy Research:

- Kamal Kashyap, Robin Thakur... *Identification of Archimedes screw turbine of efficient conversion of traditional water mills into micro hydro-power stations in Western Himalayan regions of India*, 2020.

De AENSI Journals:

- Mohd Farriz, Razali Sapiee... *Cost analysis of pico hydro turbine for power production*, 2014.

De la Research library de la UVA:



- Dirk Nuembergk, Chris Rorres, *Analytical model for water inflow of an Archimedes Screw used in hydropower generation*, 2013.

Además, trabajos de fin de grado y de máster también fueron de utilidad como:

- Fátima Cadahía Paz, *Diseño de una microrred eléctrica aislada para su implantación en la comuna de Nikki*, 2017.
- Juan Manuel Mascías de la Rica, *Ensayo de microturbinas hidráulicas para la generación de energía eléctrica en zonas desabastecidas (II)*, 2012.
- Iván Segura Rodríguez, *Optimización y estudio hidrodinámico de una microturbina hidráulica para el aprovechamiento de pequeños saltos de agua*, 2016.

Por último, se desea destacar que los proyectos de las empresas españolas Sinfín Energy e Hidrotor, junto con Ritz Atro, Jash Rehart y Spaans Babcock Hydro Power, han servido como modelo inicial para la realización de este trabajo y como comprobación final de los resultados de diseño.

6. ESTADO DE LA TÉCNICA

6.1. PICOCENTRALES HIDRÁULICAS

6.1.1. Centrales eléctricas

Las centrales eléctricas son instalaciones que transforman la energía potencial que posee un fluido en energía mecánica, por el movimiento de un motor, que a su vez, transmite al eje de un generador, para así obtener energía eléctrica. Se denomina *grupo* al conjunto de motor y generador. En grandes instalaciones, el motor es una turbina (Agüera, 2019).

Los tipos de centrales eléctricas más notables son las hidráulicas, las térmicas, y las nucleares. En menor medida, se encuentran las centrales mareomotrices, las eólicas y las solares. Por último, las menos importantes son las geotérmicas y las hidrotérmicas (Agüera, 2019).

6.1.2. Centrales hidráulicas

La energía potencial, en este tipo de instalaciones, la proporciona el salto que existe entre dos superficies libres de agua. En ellas, se transforma la energía potencial asociada a la diferencia de niveles (salto) en mecánica, por medio de turbinas hidráulicas. En las centrales convencionales, de gran tamaño, se construyen presas para dar cierta altura con respecto de la turbina al embalse de agua, aumentando el salto. Para grandes caudales, esta elevación puede ser desde 1m, hasta los aproximadamente 2000m que presentan las centrales de pequeños caudales. El diseño de la turbina hidráulica se verá condicionada por estos dos factores: salto y caudal (Agüera, 2019).

Las hidráulicas son las centrales más beneficiosas económicamente, aunque requieren un alto coste de instalación. Esto se debe a su bajo coste de explotación, si las condiciones meteorológicas de precipitaciones son propicias (Agüera, 2019). Además, algunas fuentes las consideran no contaminantes. Sin embargo, otras comienzan a denunciar que no se deben considerar limpias porque provocan un importante impacto en los ecosistemas fluviales, como consecuencia de las rápidas fluctuaciones de caudal que ocasionan en los ríos (Ambientum, 2019).

Una desventaja de la energía eléctrica es que no es fácilmente acumulable, y las centrales eléctricas tienen la característica de que, en las horas de baja demanda, producen un excedente. Es por ello, que se han construido centrales de bombeo o acumulación. En ellas, se eleva el agua en horas de bajo consumo y en horas punta, se turbinan el agua, haciéndolo atravesar la turbina y generando electricidad. El motor eléctrico y la bomba de las horas de bajo

consumo se transforman en el generador y la turbina, respectivamente, en las horas punta. Estas centrales, además albergan la posibilidad de instalar grandes potencias sin caudales muy elevados, construyendo dos embalses, uno superior y otro inferior (Agüera, 2019).

La clasificación de las centrales hidráulicas según el valor del salto es:

- Centrales de alta presión: Trabajan con saltos de agua superiores a 200m, con caudales relativamente pequeños, con valores del orden de $20m^3/s$ por turbina. Se suelen encontrar en zonas de alta montaña.
- Centrales de media presión: Engloban saltos de entre 200m y 20m, con caudales de hasta $200m^3/s$.
- Centrales de baja presión: Compete a saltos de menos de 20m con caudales de alrededor de $300m^3/s$ por turbina (Agüera, 2019).

La clasificación de las centrales hidráulicas según su potencia generada se muestra en la Tabla 1.:

Tabla 1: Clasificación de centrales hidráulicas según su potencia generada (Castro A. IDAE, 2006; Williams A., Porter S., 2006).

Clasificación		Potencia generada
Gran Hidráulica >10MW	Grandes	>100MW
	Medianas	10 - 100MW
Minihidráulica ≤10MW	Pequeñas	1 - 10MW
	Mini	100kW - 1MW
	Micro	5 - 100kW
	Pico	<5kW

6.1.3. Minihidráulica

No existe un convenio aceptado ni globalmente, ni por todos los países europeos. Sin embargo, se considera que la potencia máxima instalada que puede tener una central hidráulica, para ser considerada como minicentral, es de 10MW. La razón es que es el término admitido por la Comisión Europea y la UNIPEDA (Unión de Productores de Electricidad). Aun así, se debe tener en cuenta que países como China o algunos de América Latina, ponen el límite en 30MW y hay otros que lo bajan hasta los 1.5MW (Castro A. IDAE, 2006).

6.1.3.1. Tipos de minicentrales hidráulicas

El emplazamiento de una central o minicentral hidráulica supedita el diseño de esta. Por la importancia que tiene la topografía del terreno, una forma de clasificar las centrales hidráulicas surge de estudiar su funcionamiento basándose en la modalidad de toma y acumulación de las aguas:

- Centrales de agua fluyente: Son aquellas cuyo caudal no está regulado, ya que captan una parte del caudal del río y tras su paso por la central, lo devuelven a su cauce.
- Centrales de pie de presa o de flujo regulado: Se sitúan aguas abajo de los embalses construidos con fines hidroeléctricos u otros y se benefician del desnivel creado por la propia presa (Castro A. IDAE, 2006).

6.1.3.2. Ventajas del uso de minicentrales hidráulicas

Ambientales: Los acuerdos tomados tras el Protocolo de Kioto, así como las negociaciones posteriores para incrementar la actuación frente al calentamiento global, en especial, dentro de la Unión Europea, dejan ver el interés social y político por el cambio climático. La generación y el consumo de energía son causantes del 80% de las emisiones de efecto invernadero, por ello, la integración de energías renovables contribuirá de forma importante, a disminuir las emisiones del sector (IDAE, 2011).

La Tabla 2 refleja las emisiones de CO_2 evitadas únicamente en el año 2010 por las centrales hidráulicas y minihidráulicas (Castro A. IDAE, 2006).

Tabla 2: Emisiones de CO_2 evitadas en 2010 por las centrales hidráulicas (IDAE, 2011).

Emisiones CO_2 evitadas	tCO_2
<i>Minihidráulica (menor de 10 MW)</i>	472.812
<i>Hidráulica (entre 10 y 50 MW)</i>	255.490

La energía obtenida de minicentrales hidroeléctricas, a mayores, presenta los siguientes beneficios para el medio ambiente:

- Uso no consuntivo del agua, porque recoge el agua de un punto del curso fluvial y lo devuelve a su cauce a una menor altura, una vez transformada su energía en eléctrica a su paso por la central.

- Carácter autóctono, lo que provoca una disminución de la dependencia del sector energético exterior y el aumento de la seguridad de suministro.
- Energía limpia, sin producción de residuos contaminantes, aunque en la etapa de construcción deben extremarse los medios de evasión de impacto ambiental.
- Carácter de generación distribuida. La mayoría de las veces, las unidades de producción renovables se ubican próximas a los puntos de consumo. Esa distancia entre los lugares de consumo y de producción hace inevitable una serie de pérdidas al sistema de un 10% de la producción neta de electricidad.
- Es inagotable, gracias al ciclo hidrológico natural (Castro A. IDAE, 2006).

Socioeconómicos: Un cuantioso número de investigaciones ha probado que, a igual potencia instalada, las unidades de producción de energía de fuentes renovables producen hasta cinco veces más puestos de trabajo que de las fuentes no renovables. Entonces, el sector de las renovables crea empleo de forma eficiente, incluyendo la generación de puestos de trabajo durante la fabricación, construcción y operación de sus instalaciones. A mayores, también es responsable del empleo derivado de la demanda de bienes de otra clase que generan estas actividades.

La creación de puestos de trabajo a finales de 2010 tomados a partir de las previsiones del Plan de Energías Renovables 2005-2010 para minihidráulica, son las que se muestran en la Tabla 3, siendo los datos encontrados más recientes (Castro A. IDAE, 2006).

Tabla 3: Ratios de generación de empleo en 2010 (Castro A. IDAE, 2006).

Ratios de generación de empleo	Área minihidráulica (menor 10MW)	Área hidráulica (entre 10 y 50MW)	Total área hidroeléctrica
Fase de construcción e instalación (hombres - año)	8.370	6.696	15.066
Operación y mantenimiento (hombres - año)	612	517	1.129
Total empleo generado (hombres - año)	8.982	7.213	16.195



Lugares con acceso limitado a la energía eléctrica: En poblaciones apartadas, en las que solamente se necesita una pequeña cantidad de electricidad, las minicentrales hidráulicas son una solución muy adecuada. En concreto, las picocentrales, suelen ser suficientes, ya que la mayoría de estas comunidades consumen ente 1 y 5kW. Con pequeñas turbinas de 200 o 300W y con un desnivel de solo 1 metro, se puede suministrar a una vivienda al completo (*Guru Nanak, 2015*). También en áreas rurales de todo el mundo, como en países en vías de desarrollo, las picocentrales han supuesto una mejora significativa en el acceso a la electricidad, como han probado ya varios estudios realizados en distintos países de diferentes continentes (*Ho-Yan, B. P., 2012*). Los países en vías de desarrollo dependen de combustibles fósiles para la insuficiente energía eléctrica que producen, y las minicentrales hidráulicas facilitan una transición hacia una energía baja en emisiones de carbono, además, de una ganancia de independencia y control energético.

La diversificación de las fuentes de energía es un propósito recurrente en muchos gobiernos. Apoyar y contribuir al desarrollo de las minicentrales hidráulicas, puede ayudar a alcanzar dicho objetivo. (*Charisiadis C., 2015*).

6.2. ANÁLISIS DE TIPOS DE TURBINAS

6.2.1. Introducción y clasificación de las máquinas de fluido

La clasificación de las máquinas de fluido se puede realizar atendiendo a tres factores diferentes.

Según el sentido de transferencia de la energía entre el fluido y la máquina se pueden diferenciar dos tipos:

- **Máquinas generadoras:** transmiten energía de la máquina al fluido, de manera que el fluido presenta un incremento de energía específica entre las áreas de entrada y salida de la máquina. Los compresores, los ventiladores y las bombas, son ejemplos de máquinas generadoras. Las máquinas generadoras utilizan energía mecánica que debe ser provista por un motor *(Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. UVa, 2020)*.
- **Máquinas motoras:** la transmisión de energía es del fluido a la máquina, por lo que el fluido experimenta una disminución de la energía específica entre las secciones de entrada y de salida de la máquina. Las turbinas de vapor, hidráulicas, de gas y las aeroturbinas son tipos de máquinas motoras. La energía mecánica conseguida se puede transformar en otros tipos de energía, generalmente en energía eléctrica, a través de un generador, y transmitirse a otros sistemas como a un vehículo, una máquina herramienta... *(Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. UVa, 2020)*.

Atendiendo al grado de compresibilidad del fluido, las máquinas de fluido se clasifican en:

- **Máquinas de flujo compresible o térmicas:** Deben tenerse en cuenta las variaciones de densidad experimentadas por el fluido por ser significativas. Se realiza un balance de energía total debido a que la variación de densidad supone la conversión de energía interna en energía mecánica y al contrario *(Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. UVa, 2020)*.
- **Máquinas hidráulicas:** En ellas el fluido es un líquido, por tanto, su variación de densidad es despreciable. Esta propiedad también se da cuando el fluido es un gas que experimenta cambios de presión no significativos, por ejemplo, en un ventilador. La consecuencia inmediata es que al llevarse a cabo el balance de energía mecánica a través de la máquina está muy simplificada, porque no es necesario utilizar la



ecuación de conservación de la energía total (*Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. UVa, 2020*).

En último lugar, si la clasificación se realiza atendiendo al principio de funcionamiento:

- **Máquinas dinámicas:** Se fundamentan en el cambio de cantidad de movimiento entre el fluido y la máquina. Las principales son las máquinas rotodinámicas o turbomáquinas. En ellas el elemento más importante está dotado de movimiento giratorio, por lo que la transferencia de energía es debido a una variación de momento cinético (*Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. UVa, 2020*).
- **Máquinas de desplazamiento positivo:** Principalmente, se deben a fenómenos mecánicos y fluidostáticos, pero en ciertos casos se podrían requerir los efectos fluidodinámicos. A pesar de la existencia de una amplia diversidad de diseños según la aplicación para la que se destina, la propiedad que todos comparten es que el desplazamiento del fluido a lo largo de la máquina es discontinuo. Ciertas de estas máquinas disponen de un *órgano de retención* en el que una parte de la masa fluida queda encerrada, el cual se traslada desde la zona de alimentación (zona de baja presión en bombas), a la zona de descarga (alta presión en bombas). Sin embargo, otras máquinas disponen de un compartimento de volumen no constante provocando los procesos de admisión y descarga con válvulas que alternativamente se abren y se cierran (Fig.4) (*Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. UVa, 2020*).

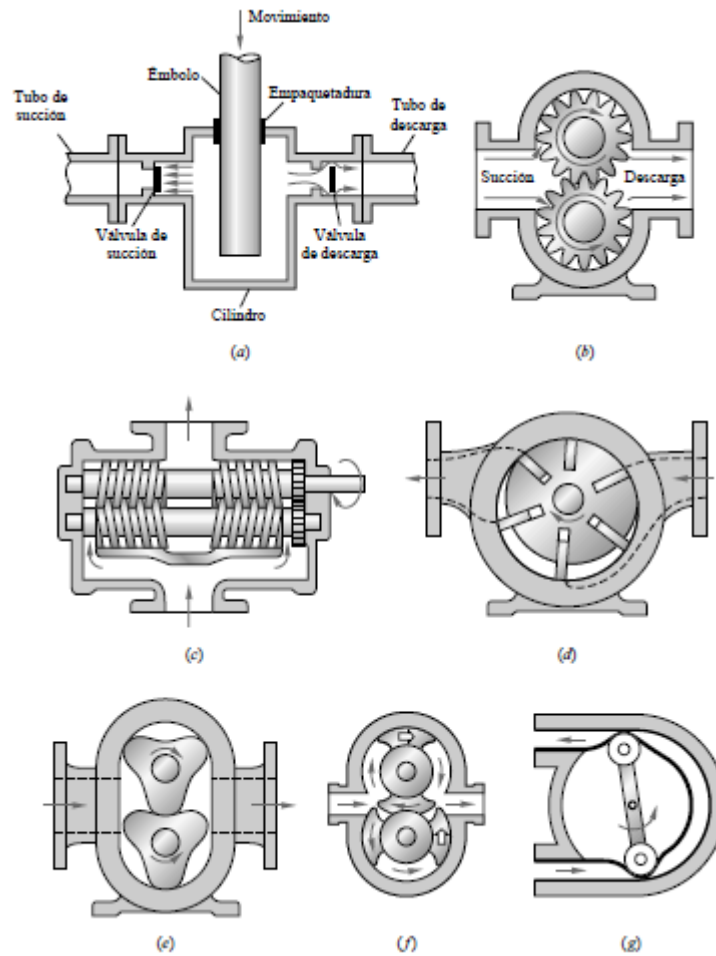


Figura 4: "Dibujo esquemático de bombas de desplazamiento positivo: (a) pistón alternativo o émbolo, (b) bomba externa de engranajes, (c) bomba de tornillo doble, (d) paleta deslizante, (e) bomba de tres lóbulos, (f) doble pistón azimutal, (g) bomba peristáltica" (White F., 2004).

La división de las turbomáquinas se realiza separando aquellas que aportan energía al fluido de trabajo, como las bombas, y aquellas que ganan energía al extraerla de él, como las turbinas. *Turbo-* es un prefijo latino que significa "rotación" o "giro", es decir, aporta la información de que las turbomáquinas rotan de una manera o de otra (White F., 2004).

El artefacto más primitivo conocido con el objetivo de transferir energía a un fluido es la bomba. Las norias, que eran utilizadas en Asia y en África, datan del 1000 a.C., y la bomba de tornillo de Arquímedes, del 250 a.C. que aun en nuestros días es utilizada para bombear tanto sólidos como líquidos. Por otro lado, las turbinas de paletas fueron utilizadas por los romanos desde el 70 a.C. y los molinos babilónicos nacieron aproximadamente en el 700 A.C. (White F., 2004).

6.2.2. Introducción y clasificación de las turbinas hidráulicas

La combinación de un órgano fijo y de una rueda móvil (rodete) constituye una célula. Una turbomáquina monocelular, también llamada turbomáquina elemental, está formada por tres elementos diferenciados por los que el fluido tiene que circular sucesivamente: el distribuidor (conjunto de álabes fijos), el rodete (conjunto de álabes móviles), y el difusor y distribuidor (tubo de aspiración). El tubo de aspiración forma parte del estátor de la turbina, por lo tanto, son órganos fijos. A diferencia del rodete que siempre existe en una turbina, el tubo de aspiración puede aparecer o no según el tipo de turbina (Fernández Díez, P., 1996).

- El distribuidor es un elemento fijo que conduce el agua, llevándola de la entrada de la turbina a la entrada del rodete y la reparte entorno a él, en turbinas de admisión total, o a una parte, en turbinas de admisión parcial. El distribuidor, por tanto, hace posible el control de agua que accede al interior de la turbina, pudiendo regular el caudal entre el nulo y el máximo valor. A mayores, es un elemento que convierte la energía de presión en energía de velocidad (Fernández Díez, P., 1996).
- El rodete es el componente más importante de la turbina. El rodete consta de álabes donde se produce el intercambio de energía entre el fluido y la máquina (Fernández Díez, P., 1996).
- El difusor, es el conducto que permite el vertido del agua que proviene del rodete, y lo dirige hacia el canal de fuga, de tal manera que se puede recuperar un porcentaje de la energía cinética a la salida del rodete. Si la turbina no dispone de un difusor, se la denomina turbina de escape libre (Fernández Díez, P., 1996).

El caudal y el salto neto de agua son los parámetros elementales que determinan la potencia de una turbina. La fórmula de la potencia es la Ec.1:

$$W = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_n$$

(1)

Con el objetivo de modificar el valor de la potencia generada a través de la turbina, teniendo en cuenta la curva de demanda de energía eléctrica, se podría modificar la altura neta o el caudal. Debido a que la altura neta es dependiente de la cota del agua en el nivel de aguas arriba de la alimentación de la turbina, es especialmente complicado variar su valor. Es por ello, por lo

que el parámetro que se controla para lograr variar la potencia es el caudal.
(Departamento de Ingeniería Fluidomecánica. UVa, 2020).

Se pueden hacer dos clasificaciones de las turbinas hidráulicas. La primera de ellas se corresponde a si la presión se mantiene constante o cambia en el rodete:

- Turbinas de impulsión o de acción: En ellas la presión en el rotor no varía, entonces el agua sale del distribuidor a presión atmosférica. En este tipo de turbinas toda la energía potencial del salto inicial es transmitido al rodete como energía cinética. Son adecuadas para saltos de desniveles mayores a 400m y tienen algunas piezas singulares como la válvula de aguja del inyector, que se utiliza para controlar el caudal; un deflector para direccionar el chorro si se diera el caso de que la carga se redujera de repente; y un contrachorro que para vertiginosamente la máquina si fuera necesario. Este tipo de turbina es de escape libre, por no disponer de difusor (Zamora Parra, B., Viedma Robles, A., 2016) (Fernández Díez, P., 1996).
 - Turbinas Pelton: patentada aproximadamente en el año 1880, es la turbina de acción más utilizada y popular, llamada así por su autor Lester A. Pelton. Se utilizan para saltos mayores a los 400m. Disponen de ciertos elementos particulares como la válvula de aguja del inyector, cuya función es la de regular el caudal; el deflector que sirve para desviar el chorro cuando la carga se reduce repentinamente. También dispone de un contrachorro que detiene la turbina de forma rápida si fuera necesario. A las turbinas Pelton también se las llama de escape libre; y en alguna bibliografía, turbinas tangenciales por la forma que tiene el chorro de agua de incidir sobre el rodete. En las Fig. 5 y Fig.6 se observan dos esquemas de la turbina Pelton (Zamora Parra, B., Viedma Robles, A., 2016).

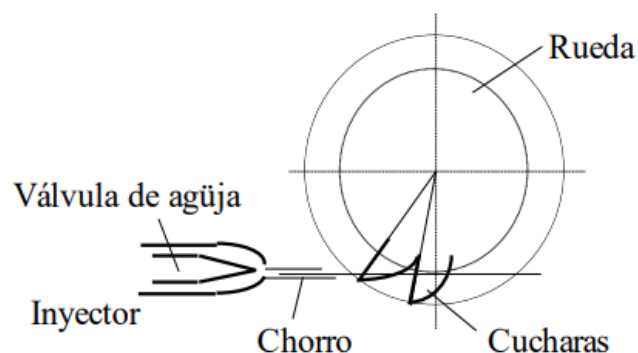


Figura 5: Esquema básico de una turbina Pelton (Zamora Parra, B., Viedma Robles, A., 2016).

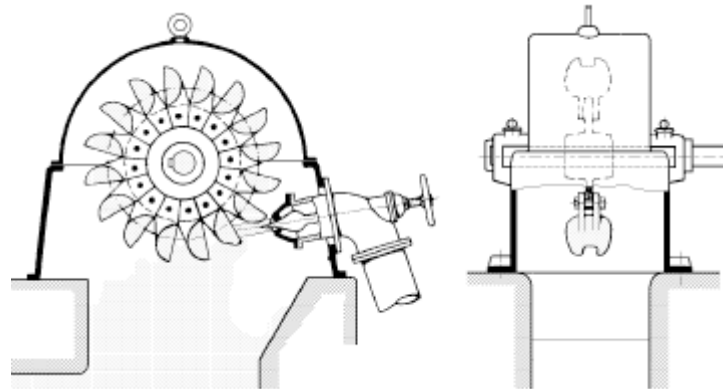


Figura 6: Turbina Pelton. (Fernández Díez, P., 1996).

- Turbinas de reacción: Son aquellas en las que se provoca una caída de presión en el paso por el rotor, con lo cual el fluido llena completamente el espacio entre los álabes. En este tipo de turbinas la modificación del caudal con el objetivo de variar la potencia generada se puede conseguir cambiando el ángulo de los álabes a la salida del distribuidor o, se puede variar el ángulo a la entrada del rodete.
Dependiendo de la dirección que sigue el líquido, las turbinas de reacción pueden ser de dos clases (Zamora Parra, B., Viedma Robles, A., 2016), (Fernández Díez, P., 1996), (Departamento de Ingeniería Fluidomecánica. UVA, 2020):
 - Turbinas radiales. También conocidas como turbinas Francis. Esta máquina es radial centrípeta, presenta un tubo de aspiración y es especialmente práctica porque su rodete no es de difícil acceso. Este tipo de turbina hidráulica es la más utilizada en la actualidad debido a la facilidad de su regulación, su eficiente funcionamiento a alta velocidad de rotación y su eficacia en un amplio rango de saltos: desde los 0.5m hasta los 180m. Pueden trabajar a distintas velocidades, pudiendo ser lentas, normales, rápidas y extrarápidas. Un esquema general de la turbina Francis se observa en la Fig. 7 y Fig.8 (Zamora Parra, B., Viedma Robles, A., 2016), (Fernández Díez, P., 1996).

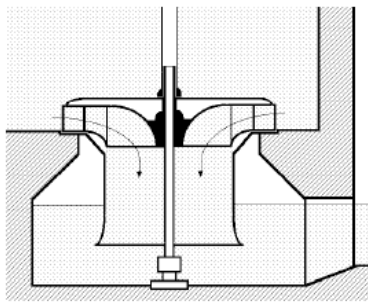


Figura 7: Turbina Francis (Fernández Díez, P., 1996).

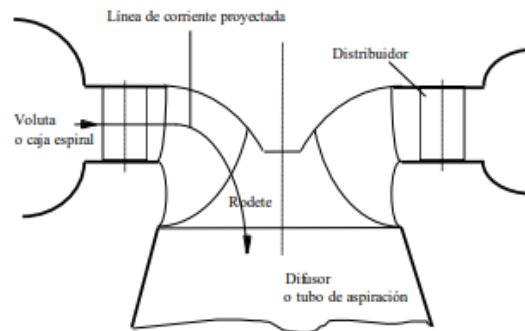


Figura 8: Esquema básico de una turbina Francis (Zamora Parra, B., Viedma Robles, A., 2016).

- Turbinas axiales o turbinas Kaplan. El flujo de agua es completamente de dirección axial y los álabes pueden ser fijos, llamándose entonces turbinas de hélice; o pueden ser álabes orientables que permiten controlar la carga, llamándose turbinas Kaplan (Fig. 9). Este tipo de turbinas son aplicables en casos de salto de desnivel inferior a 60m. Para saltos de agua muy pequeños, superiores a 2m e inferiores a 15m, se emplean unas turbinas Kaplan denominadas turbinas tubulares. Estas últimas turbinas no tienen voluta y están colocadas axialmente en el centro de un conducto forzado. Las turbinas tubulares pueden ser utilizadas como turbinas o como bombas, por lo que son máquinas reversibles y tienen como ventajas a mayores, el mejor impacto ambiental que provocan y un menor coste de producción (Zamora Parra, B., Viedma Robles, A., 2016).

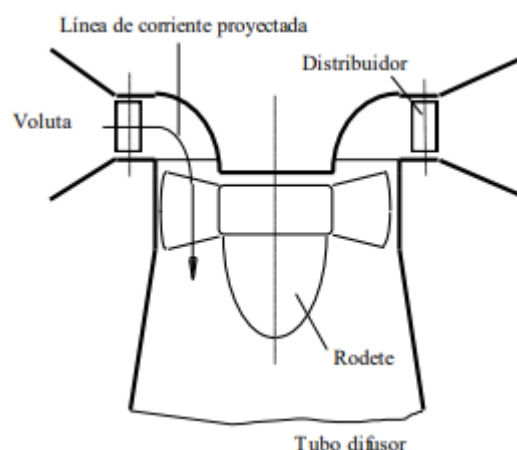


Figura 9: Esquema básico de una turbina Kaplan de eje vertical (Zamora Parra, B., Viedma Robles, A., 2016).

6.3. SELECCIÓN: TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES

El tornillo de Arquímedes es una máquina ancestral usada para impulsar agua desde un nivel inferior a otro superior. Está tradicionalmente reconocido dicho invento a Arquímedes, quien vivió entre el año 287 A.C. y 212 A.C. En los últimos años, el tornillo de Arquímedes ha sido instalado como máquina hidráulica, a través de la cual el agua desciende y genera potencia. Esta turbina consiste en un tornillo giratorio sostenido mediante cojinetes a sus extremos, con un reductor y un generador situados en la caja de control. El agua desciende por fracciones denominadas “buckets” o cubos, formados entre los álabes, el eje y la carcasa (Charisiadis C., 2015).

Los análisis de la geometría y los parámetros a estudiar, incluyendo la pendiente de los álabes, han sido llevadas a cabo por el Tornillo de Arquímedes. Esto es en mayor parte desde la perspectiva de su uso como bomba, y sus resultados se basan en el volumen de agua que hace ascender en cada rotación. Cabe destacar la diferencia en el diseño óptimo del tornillo por su geometría, que por su uso para bombeo o como turbina. Más adelante se detallará el diseño más adecuado del tornillo de Arquímedes como turbina hidráulica.

Hasta la fecha, los tornillos de Arquímedes se están convirtiendo en el mayor éxito comercial de las máquinas contemporáneas de minicentrales hidráulicas. Muchas de ellas han sido instaladas en los últimos años, siendo las principales empresas dedicadas a ello: ANDRITZ Atro GmbH, y REHART Group. Dos empresas alemanas con sedes en todo el mundo. GESS-CZ s.r.o. de la República Checa, la británica Mann Power Consulting Ltd. Spaans Babcock de Países Bajos, o las españolas Sinfín Energy o Hidrotor. La Fig.10 muestra la instalación llevada a cabo en noviembre de 2018 por Sinfín Energy en el Jardín Botánico Atlántico de Gijón, Asturias, con una potencia de 1,20 kW. La Fig.11 es la fotografía de una central de mayor potencia. Con un salto de 3.60m produce una potencia de 80 kW. Esta segunda instalación se encuentra en Austria y es obra de Rehart Power.



Figura 10: Turbina de Tornillo de Arquímedes del Jardín Botánico de Gijón (Sinfin Energy, 2019).



Figura 11: Central de Turbina de Tornillo de Arquímedes en Austria (Rehart Power, 2014).

El principio de funcionamiento es: el agua fluye descendiendo a través del tornillo y provoca el momento que lo hace rotar. Esta rotación es transmitida a la caja de transmisión (“gear box”), encargada de transmitir el movimiento al generador aumentando las revoluciones por minuto del tornillo. A continuación, el generador recibe esa energía mecánica y produce energía eléctrica. El canal de entrada tiene una rejilla que retiene las materias no deseadas que flotan en el seno del río y dos compuertas. La primera, es la de control, y la segunda es de emergencia para aislar la turbina del flujo de agua durante el mantenimiento. En la Fig. 12 se tiene un esquema de una turbina de

Arquímedes general, en la que se pueden distinguir las principales partes por las que suele estar compuesta (Jash Rehart, 2019).

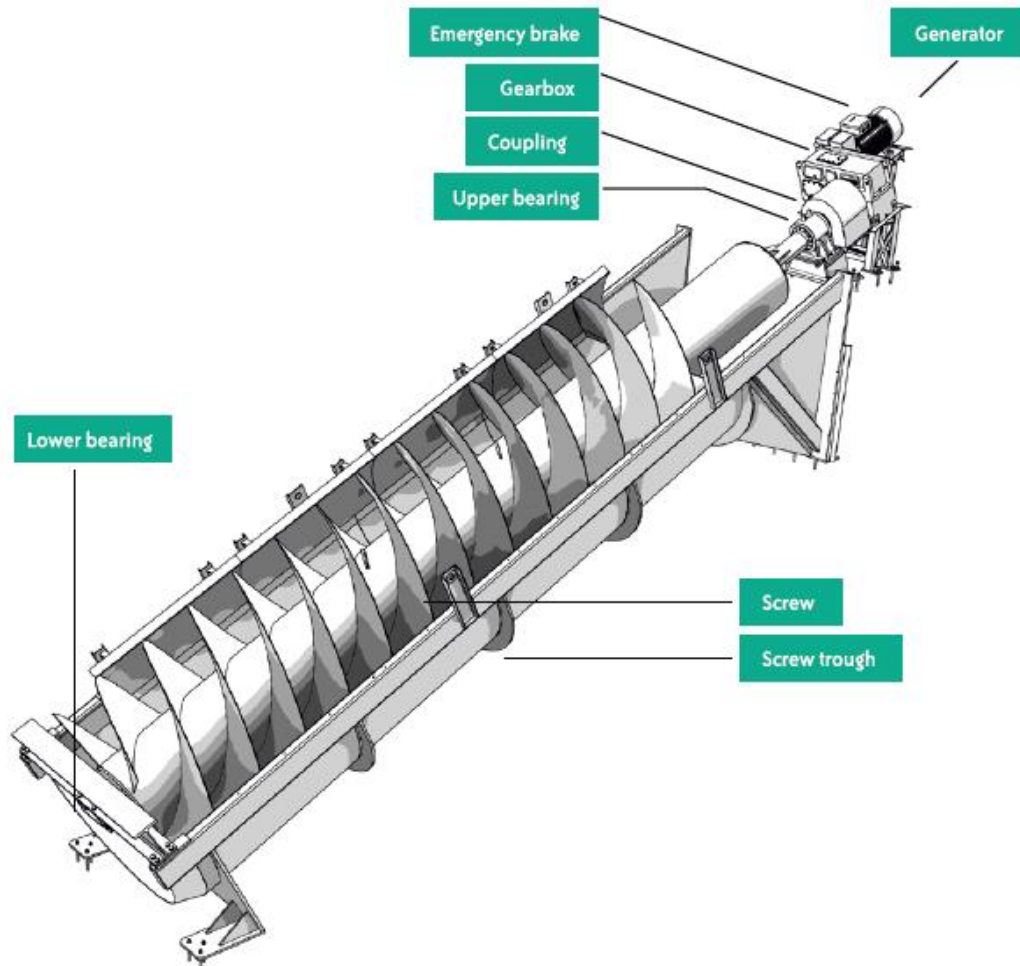


Figura 12: Estructura de una turbina de Arquímedes genérica (Jash Rehart, 2019).

Las ventajas de la turbina de Arquímedes son:

- Estas turbinas son robustas y fiables durante un largo periodo de vida. Entre otros factores, este hecho se debe a que están fabricadas con muy pocas piezas. Además, la baja velocidad de rotación del tornillo resulta en un bajo desgaste y muy pocos costes de mantenimiento. La eficiencia se mantiene en un valor elevado a lo largo de los años de uso.
- En pequeños saltos de agua, de como mínimo 1m, este tipo de turbina es apropiada. Hasta 12m, 24m si es una instalación de dos etapas, la turbina de Arquímedes da muy buenos resultados.

- La eficiencia se mantiene alta con un amplio rango de caudales de entrada. Variar alturas y caudal, apenas tiene ningún efecto sobre la eficiencia de la máquina.
- Este tipo de turbina no necesita disponer de una bomba de grasa para su adecuada lubricación. Esto reduce los costes de operación y simultáneamente aumenta la eficiencia (*Spaans Babcock, 2021*).
- El tamaño de los cangilones contribuye junto con la baja velocidad de rotación de la turbina en que la ictiofauna pueda descender a través del tornillo de manera segura entre los álabes. Por lo tanto, esta turbina es adecuada y segura para los peces, sin obstaculizar la migración aguas abajo a través del rotor de ella, como se ve representado en la Fig.13. Tanto es así, que históricamente, el tornillo de Arquímedes fue usado en las técnicas de acuicultura para el trasvase de peces (*Sinfin Energy, 2019*).

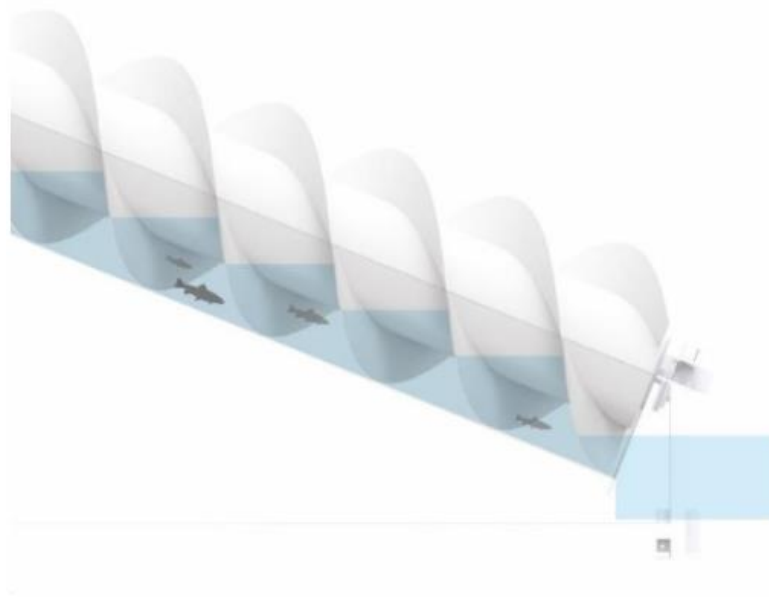


Figura 13: Peces descendiendo por el rotor de la turbina sin perjuicios. (*Sinfin Energy, 2019*).

- El diseño de la turbina permite que pequeños sedimentos la atraviesen de tal forma que el lecho del río se mantenga con su estructura natural.
- Independientemente del tipo de tornillo y el emplazamiento del proyecto, la obra civil a realizar nunca será tediosa ni requerirá mucho tiempo de trabajo. Como resultado, se tiene un proyecto de rápida instalación y puesta en marcha, con las mínimas molestias causadas a la comunidad o a los residentes cercanos (*Jash Rehart, 2019*).

7. DISEÑO DE LA TURBINA DE ARQUÍMEDES

7.1. EMPLAZAMIENTO

La potencia que genera una central hidroeléctrica depende directamente de la altura de salto y del caudal turbinado. Por ello, es esencial definir estas dos variables de forma acertada, tanto para diseñar las instalaciones, como para dimensionar los equipos (Castro A. IDAE, 2006).

7.1.1. Determinación del caudal de diseño

Elegir el caudal de diseño de forma acertada conlleva definir el equipo a instalar de tal manera que la energía producida sea la mayor posible para las condiciones hidrológicas en las que se trabaje. Por consiguiente, el régimen de caudales del río en las inmediaciones a la toma de agua es necesario conocerlo para la definición del caudal de diseño de la instalación hidroeléctrica (Castro A. IDAE, 2006).

Las estaciones de aforo se encargan de medir los caudales de los ríos en puntos singulares de cauces y canales. A partir de los datos que nos proporcionan, conocemos los caudales instantáneos que circulan por el tramo del río donde estará ubicada la central y con ellos, se calculan los caudales medios, máximos y mínimos diarios, con datos de cuantiosos años hidrológicos. Se recomienda que estas series hidrológicas sean de más de 25 años para que el estudio hidrológico derivado sea acertado (Castro A. IDAE, 2006).

Existe el caso de que no exista ninguna estación de aforo en la cuenca donde se instalará la minicentral. Este es el caso de las minicentrales que se sitúan en pueblos remotos o en países en vías de desarrollo y también la situación de este trabajo. En esa situación es conveniente realizar un estudio hidrológico teórico, que se fundamenta en los valores de las precipitaciones del territorio y en aforos estudiados en cuencas semejantes a la de interés (Castro A. IDAE, 2006).

Cuando se dan estos casos, se necesita reunir y estudiar los valores pluviométricos existentes, realizar análisis de estos y completarlos si fuera necesario con metodologías de correlación de cuencas. El primer paso a llevar a cabo en estas situaciones es definir las características físicas de la cuenca de interés. Los parámetros que determinan su relieve y forma son los principales. Seguidamente, se vinculan las aportaciones de la cuenca en función de las precipitaciones, superficies y de los coeficientes de escorrentía. Con todas estas relaciones, se consigue un parámetro de corrección con el que se obtienen los resultados finales (Castro A. IDAE, 2006).

Es muy recomendable, siempre que sea posible, completar estos datos con medidas del caudal de forma directa en un periodo de al menos un año (Castro A. IDAE, 2006).

Sea cual sea la fuente de la que se obtiene el estudio hidrológico, finalmente se obtiene una estimación anual lo bastante amplia para llevar a cabo una distribución estadística que clasifique los años según la aportación registrada. Los años se dividen en muy húmedos, húmedos, medios, secos o muy secos, lo que permite realizar una representación gráfica como la que se muestra en la Fig.14 (Castro A. IDAE, 2006).

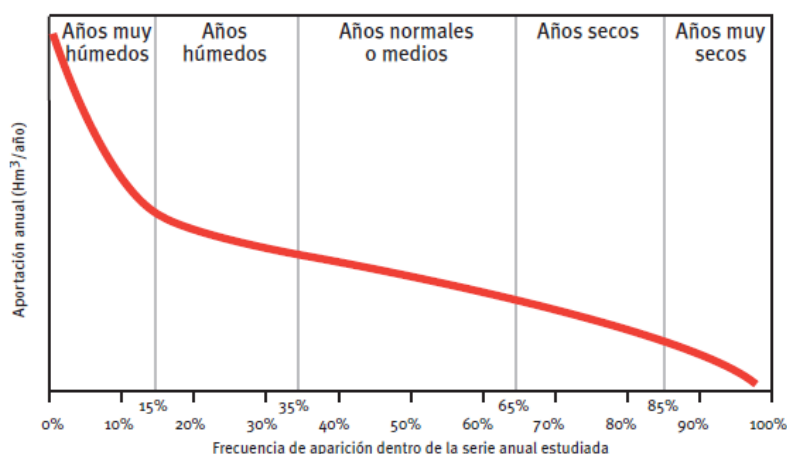


Figura 14: Tipificación de los años en función de la aportación registrada (Castro A. IDAE, 2006).

A continuación, se elaboraría la curva de caudales clasificados. Se lleva a cabo utilizando la distribución estadística de caudales por años. Se elegirá un año medio representativo y se construirá la curva de caudales clasificados de la cuenca de interés, así se obtendría el caudal en función de los días del año en los que se sobrepasa el valor indicado. De esta manera, se define de forma bastante apropiada, en términos adimensionales, el régimen hidrológico de un cauce a efectos de su aprovechamiento hidroeléctrico.

La curva de caudales clasificados (Fig.15) es representada gráficamente para conocer los datos de que nos informa sobre: el volumen de agua presente, el volumen turbinado, el volumen vertido, mínimo técnico o caudal ecológico (Castro A. IDAE, 2006).

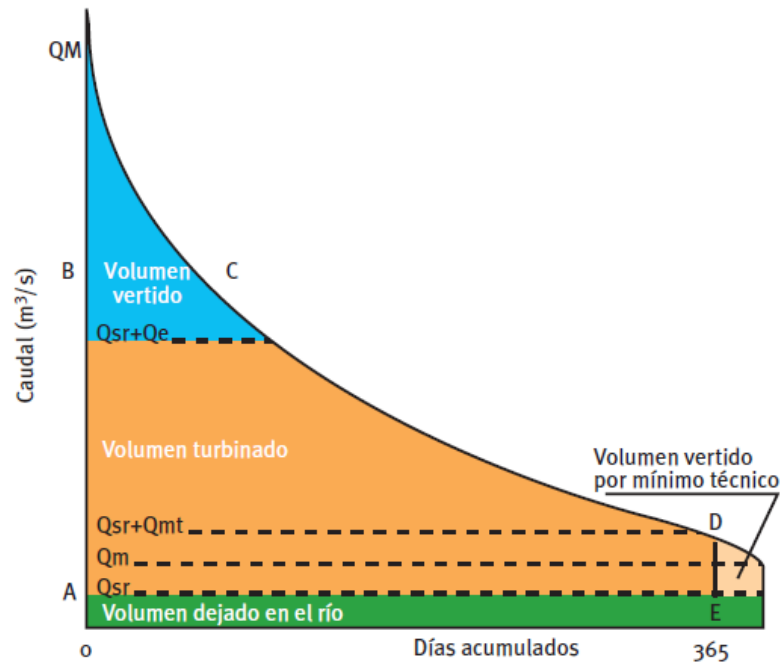


Figura 15: Elaboración de la curva de caudales clasificados (Castro A. IDAE, 2006).

Los parámetros que aparecen en la curva de caudales clasificados son:

- QM: Caudal máximo alcanzado en el año o caudal de crecida.
- Qm: Caudal mínimo del año o estiaje.
- Qrs: Caudal de servidumbre que se necesita dejar en el flujo por su cauce habitual. Abarca el caudal ecológico y el necesario para otras aplicaciones. El caudal ecológico es fijado por el Organismo de cuenca, de no ser conocido, se puede tomar como aproximación inicial un valor que sea el 10% del caudal medio interanual.
- Qmt: Caudal mínimo teórico Ec.2

$$Q_{mt} = K \cdot Q_e$$

(2)

Siendo K de la Ec.2 una constante cuyo valor es función del tipo de turbina utilizada. Sus valores se obtienen tabulados en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores de la constante k para cada tipo de turbina

Tipo de turbina	Valor de k
Pelton	0.10
Kaplan	0.25
Semi Kaplan	0.40
Francis	0.40

- Q_e : Caudal de equipamiento. Se escoge de manera tal que el volumen turbinado sea un valor máximo, situación que se da cuando el área interior al polígono resultante de unir A,B,C,D,E,A en el gráfico de la Fig. 15, sea máximo (Castro A. IDAE, 2006).

7.1.1.1. Cálculo del caudal de diseño aplicando el Método Racional según la norma 5.2-IC

Debido a que el emplazamiento de la minicentral se encuentra en un lugar rural remoto sin estaciones de aforo ni apenas información disponible, el método de cálculo del caudal de diseño expuesto en el apartado anterior, no se puede aplicar.

La información de la que sí se dispone es el hietograma de la comuna de Nikki, por lo que se acude a la metodología Racional para calcular el caudal de diseño. Concretamente, se recurre a una de las etapas de cálculo que este método expone: el cálculo de la escorrentía producida por la precipitación neta, obteniendo así el hidrograma.

En España, aplicar de forma práctica el Método Racional cuenta con una normativa particular: la Norma 5.2-IC, Ministerio de Fomento, 2016, que es la actualización de una versión anterior de 1990. Según esta norma, los cálculos que se explican a continuación son válidos ya que no existen datos de caudales disponibles y si y sólo si la cuenca es de un área menor de 50 km^2 . (Ministerio de Fomento, 2016).

Datos de partida

Para conocer los parámetros de entrada para realizar los cálculos, se utiliza el programa informático Google Earth, que a partir de un globo terráqueo virtual permite visualizar mapas y calcular distancias entre otras aplicaciones. En la Fig. 16 se muestra la presa de Nikki, en la que este estudio se está llevando a cabo.



Figura 16: Vista de la presa de Nikki (Google Earth).

Para obtener los valores de la longitud del cauce y de la superficie de la cuenca aportante de la presa, se traza en Google Earth el área aproximada de la cuenca siguiendo los cursos de agua que en el mapa se observan y las zonas de humedad, además de ser el punto de menor altitud aguas abajo. El resultado es el que se muestra en la Fig.17. Todo lo que queda fuera del área representada en color amarillo, pertenece a otras cuencas, por lo que el agua que cayera fuera del área no llegaría al embalse de Nikki. De forma más exacta, se buscaría obtener un modelo digital del terreno a partir de las curvas de nivel y un programa especializado en hidrología, aportaría la información exacta de la cuenca aportante tras haber fijado el punto del embalse.

Para conocer la longitud del cauce, se traza la ruta de mayor longitud dentro de la cuenca aportante, que se observa en la Fig.18. Las Fig.19 y Fig.20 muestran los resultados obtenidos.



Figura 17: Cuenca aportante al embalse. (Google Earth).



Figura 18: Longitud del cauce. (Google Earth).

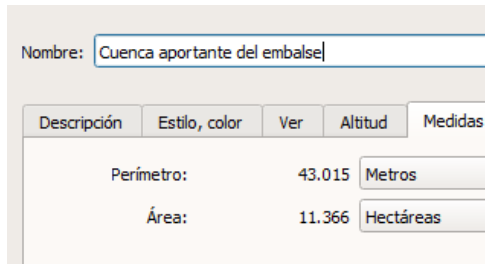


Figura 19: Perímetro y área de la cuenca aportante (Google Earth).

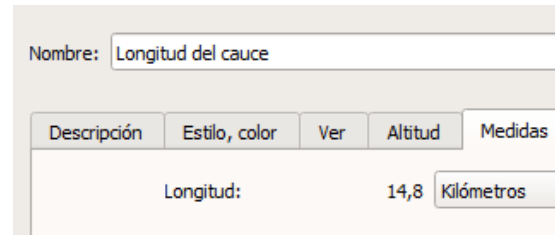


Figura 20: Longitud del cauce (Google Earth).

Se debe tener en cuenta a la hora de interpretar las medidas realizadas que se ha configurado Google Earth para que el punto se utilice como separador de miles y la coma como separador de decimales.

A mayores, para conocer los valores de las cotas máxima y mínima y la pendiente del terreno, se han trazado 5 rutas de perfil dentro del área de cuenca aportante, como muestra la Fig. 21. Tomando de cada ruta su perfil de elevación, sus cotas y sus pendientes se obtiene la Tabla 5.

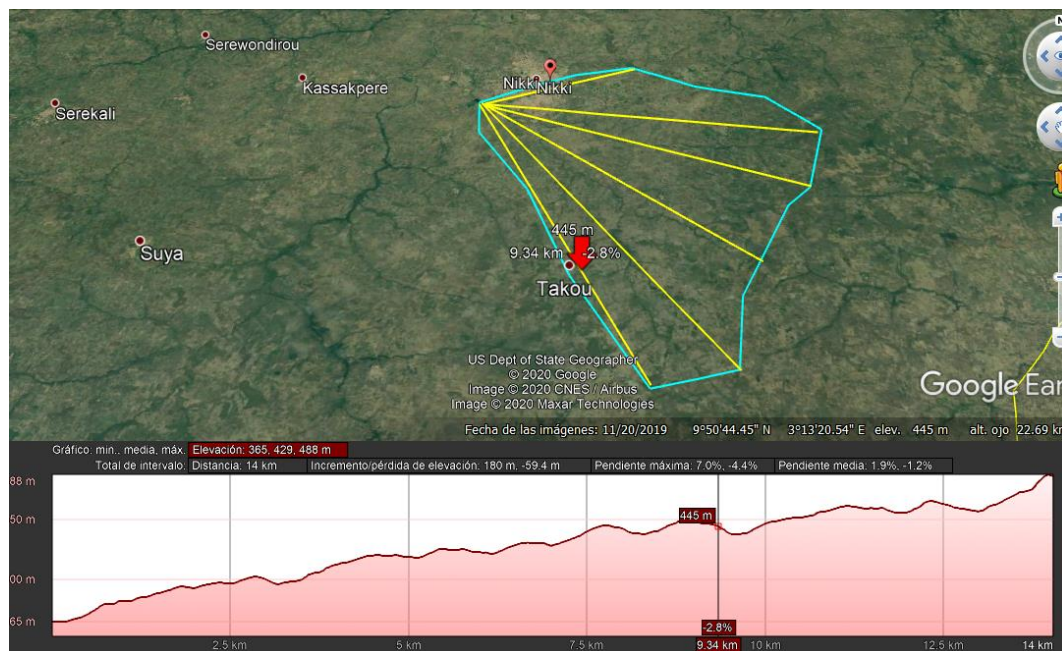


Figura 21: Rutas de perfil para cotas y pendientes (Google Earth).

Tabla 5: Cotas y pendiente de las rutas de perfil.

Rutas de perfil	Cota máxima (m)	Cota mínima (m)	Pendiente media (%)
1	446	366	1.8
2	488	364	1.9
3	480	364	1.6
4	475	364	1.5
5	487	365	1.9

El valor de la pendiente que posteriormente se usa como dato para los cálculos es el promedio de las pendientes medias de las rutas de perfil.

Los valores obtenidos son los organizados en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores iniciales para el Método Racional

<i>L</i>	14.8km	Longitud del cauce
<i>CM</i>	488m	Cota máxima
<i>Cm</i>	364m	Cota mínima
<i>Cap</i>	133.66km ²	Cuenca aportante
<i>Pte</i>	1.74%	Pendiente
<i>PR</i>	8años	Período de retorno

Para estimar el periodo de retorno, la norma 5.2-IC establece periodos de retorno de 25, 50 o 100 años para la construcción de carreteras. Para estimarlo para la central hidráulica que se está diseñando, se ha tomado como base el estudio publicado por el IDAE sobre minicentrales hidroeléctricas en los manuales de energías renovables del 2006, que establecen periodos de retorno de 8-12 años. Por ser la central hidráulica de estudio una pico central, se toman 8 años como periodo de retorno (*Ministerio de Fomento, 2016*), (*Castro A. IDAE, 2006*).

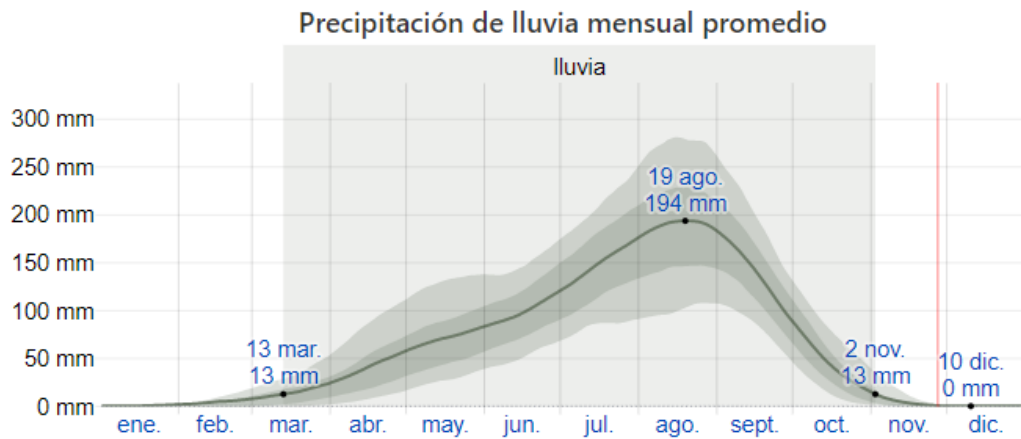
1. Corrección de la precipitación diaria

Tomando los datos medios de precipitaciones de lluvia mensual en Nikki, se toma el valor máximo para la precipitación diaria máxima. Por la ley estadística de Gumbel, para un periodo de retorno de 8 años, la probabilidad de que se presente un caso de precipitación menor a 194mm es de 87.5% (Ec.3) (*Sánchez San Román, F.J., 2017*).

$$PR = 8 = \frac{1}{1 - F(x)} \rightarrow F(x) = 0.875$$

(3)

$$P_d = 194mm$$



La lluvia promedio (línea sólida) acumulada en un periodo móvil de 31 días centrado en el día en cuestión, con las bandas de percentiles del 25º al 75º y del 10º al 90º. La línea delgada punteada es el equivalente de nieve en líquido promedio correspondiente.

Figura 22: Precipitaciones de lluvia mensual promedio de Nikki, Benín. (Weather Spark, 2020).

Primeramente, se necesita conocer la precipitación diaria máxima para el valor escogido para el periodo de retorno. Usualmente, se utilizan los datos de las precipitaciones máximas, que darán el día más caudaloso del año y se aplica o bien la ley estadística de SQRT ET-max o la de Gumbel.

Esta precipitación diaria se corrige en cuencas de aportación de área mayor a 1km². K_A es el factor reductor que se utiliza para corregir el hecho de que en grandes cuencas la precipitación es heterogénea en toda su área (Ec.4) (Sánchez San Román, F.J., 2016).

$$K_A = 1 - \frac{\log(Cap(km^2))}{15} = 0.86296$$

(4)

Al multiplicar la precipitación diaria por el factor reductor, se obtiene la precipitación diaria corregida: Pdc . (Ec.5).

$$Pdc = Pd \cdot K_A = 167.41mm$$

(5)

Siendo: Pdc = Precipitación diaria corregida

Pd = Precipitación diaria máxima

K_A = Factor de reducción

2. Intensidad media diaria

La intensidad media diaria se calcula como muestra la Ec.6.

$$Id = \frac{Pdc}{24} = 6.9756 \text{ mm/h}$$

(6)

Siendo: Pdc = Precipitación diaria corregida (mm)

Id = Intensidad diaria (mm/h)

3. Tiempo de concentración de la cuenca

El tiempo de concentración de una cuenca es el mínimo tiempo que se necesita para que cada uno de los puntos de la cuenca aporten agua de escorrentía a la vez, al punto de salida (Ec.7) (Ibáñez Asensio, S., 2011).

$$tc = 0.3 \cdot \frac{L(km)^{0.76}}{Pte_{media}^{0.19}} = 5.77h$$

(7)

Siendo: tc = Tiempo de concentración (h)

L = Longitud del cauce (km)

Pte_{media} = Pendiente media (m/m)

Habiéndose calculado la pendiente media como la diferencia de la cota máxima y la cota mínima dividida por la longitud del cauce (Ec.8) (Sánchez San Román, F.J., 2016):

$$Pte_{media} = \frac{CM - Cm}{L} = 0.00837 \frac{m}{m}$$

(8)

4. Intensidad para el tiempo de concentración calculado

La norma 5.2-IC establece dos métodos según si se tienen las curvas IDF (Intensidad- Duración- Frecuencia) o no. Estas curvas representan la intensidad de una lluvia fuerte en mm/h; la duración de dicha precipitación en minutos, que se estima con una probabilidad. Esa probabilidad o frecuencia en años es el también conocido como periodo de retorno y es la tercera de las magnitudes de las curvas. (IDEAM, 2014).

Sin conocer las curvas IDF, el Ministerio de Fomento proporciona un mapa de España dividido por zonas en las que facilita el valor del cociente $\frac{I1}{Id}$ (Fig.23). $I1$ es la intensidad en una hora y Id la intensidad en un día. La expresión que se aplica para calcular la intensidad media en el periodo de tiempo t es la Ec.9:

$$It = Id \cdot \left(\frac{I1}{Id} \right)^{3.5287 - 2.5287 \cdot tc^{0.1}}$$

(9)

Siendo: It = Intensidad media en el periodo t .

Id = Intensidad media diaria.

$I1$ = Intensidad en la hora más lluviosa del día escogido.

t = Periodo en horas en el que se analiza la intensidad.

Para Benín no se han encontrado datos similares disponibles, por lo que habría que realizar hipótesis o calcular por otro método la intensidad.

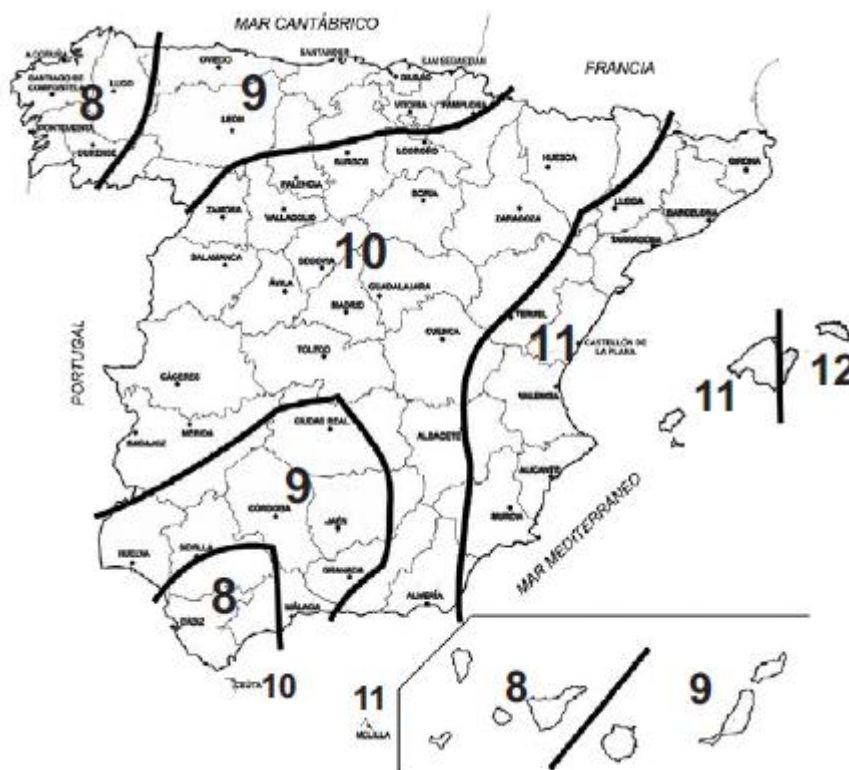


Figura 23: Mapa del Ministerio de Fomento de 2016, de coeficiente $\frac{I_1}{I_d}$. : (Sánchez San Román, F.J., 2016).

5. Evaluación del umbral de escorrentía

El umbral de escorrentía se define como la cantidad de precipitación sobre un terreno, que cuando es superada, impide al suelo infiltrar más agua y hace que fluya sobre el terreno en un flujo difuso (EADIC, 2015). La fórmula que permite calcularla es la Ec.10.

$$P_0 = P_0 \text{ inicial} \cdot \beta$$

(10)

Siendo: P_0 = Umbral de escorrentía.

$P_0 \text{ inicial}$ = Umbral de escorrentía sin corregir.

β = Coeficiente corrector.

$P_0 \text{ inicial}$ se obtiene de la Tabla 7 a la que se accede según el uso del suelo y el grupo de suelo, en función de si son de infiltración rápida, media, lenta o muy lenta y de la pendiente del terreno (Sánchez San Román, F.J., 2016).

Tabla 7: Muestra de la tabla del valor inicial del umbral de escorrentía. (Sánchez San Román, F.J., 2016).

Uso de suelo	[1]	Pen- diente (%)	Grupo de suelo			
			A	B	C	D
Tejido urbano continuo			1	1	1	1
Tejido urbano discontinuo, urbanizaciones, aeropuertos			24	14	8	6
Zonas industriales y comerciales			6	4	3	3
Granjas agrícolas			24	14	8	6
Zonas industriales			12	7	5	4
Grandes superficies de equipamiento y servicios			6	4	3	3
Autopistas, Redes viarias, ferroviarias			1	1	1	1
Complejos ferroviarios			12	7	5	4
Zonas de extracción minera			16	9	6	5
Escombreras y vertederos			20	11	8	6
Zonas de construcción			24	14	8	6

Para conocer el grupo de suelo del terreno estudiado, se ha consultado con una doctora en edafología. Para conocer el tipo de suelo habría que realizar un estudio del suelo a partir de una muestra de este, ya que las capas más importantes y determinantes de él son las más profundas, no la superficial. Una aproximación podría ser a través de unos mapas de suelos de los que se obtiene la textura del suelo y con ella y unos valores tabulados, obtener la filtración del suelo y así poderlo clasificarlo. Para la zona de Nikki no se han obtenido los mapas mencionados.

β es el coeficiente corrector. Se calcula dependiendo del periodo de retorno y de la geografía de la zona de estudio. En la bibliografía se encuentra un mapa por regiones de España, que se adjunta en la Fig.24, y con ayuda de la Tabla 8 se calcularía el coeficiente corrector deseado. La Tabla 8 es una muestra de la aportada por el Ministerio de fomento, la completa es la Tabla 2.5, (BOE, 10 de marzo de 2016). Conociendo β_m y F_T se puede calcular con la Ec.11.

$$\beta = \beta_m \cdot F_T \tag{11}$$

No se han conseguido unas herramientas similares para el cálculo del coeficiente corrector en Nikki.



Figura 24: Mapa de regiones de España para el cálculo del coeficiente corrector. (Sánchez San Román, F.J., 2016).

Tabla 8: Muestra de la tabla para el cálculo del coeficiente corrector del umbral de escorrentía. . (Sánchez San Román, F.J., 2016).

Región	Valor medio, β_m	Desviación respecto al valor medio para el intervalo de confianza del			Periodo de retorno T (años), F_T					
		50% Δ_{50}	67% Δ_{67}	90% Δ_{90}	2	5	10	25	100	500
11	0,90	0,20	0,30	0,50	0,80	0,90	1,00	1,13	1,34	1,59
12	0,95	0,20	0,25	0,45	0,75	0,90	1,00	1,14	1,33	1,56
13	0,60	0,15	0,25	0,40	0,74	0,90	1,00	1,15	1,34	1,55
21	1,20	0,20	0,35	0,55	0,74	0,88	1,00	1,18	1,47	1,90
22	1,50	0,15	0,20	0,35	0,74	0,90	1,00	1,12	1,27	1,37
23	0,70	0,20	0,35	0,55	0,77	0,89	1,00	1,15	1,44	1,82

6. Cálculo del coeficiente de escorrentía

En el caso de que $P_{dc} > P_0$ el coeficiente de escorrentía se calcula como indica la Ec.12.

$$C = \frac{\left(\frac{P_{dc}}{P_0} - 1\right) \cdot \left(\frac{P_{dc}}{P_0} + 23\right)}{\left(\frac{P_{dc}}{P_0} + 11\right)^2} \quad (12)$$

Siendo: P_0 = Umbral de escorrentía (mm).

P_{dc} = Precipitación diaria corregida (mm).

C = Coeficiente de escorrentía.

En el caso en el cual $P_{dc} < P_0$, el coeficiente de escorrentía es cero. La razón es que, si la precipitación no llega al valor del umbral de escorrentía, no escurre nada (Sánchez San Román, F.J., 2016).

7. Cálculo del coeficiente de uniformidad temporal

El coeficiente de uniformidad temporal representa el coeficiente de la distribución en el tiempo de la precipitación. En cuencas de superficies grandes, es usual que la intensidad de precipitación sea heterogénea en función del tiempo de concentración (Ec.13) (Sánchez San Román, F.J., 2016).

$$K_t = 1 + \frac{t_c^{1.25}}{t_c^{1.25} + 14} = 1.39 \quad (13)$$

Siendo: K_t = Coeficiente de uniformidad temporal.

t_c = Tiempo de concentración en horas.

8. Cálculo del caudal de diseño

Aplicando el Método Racional, el caudal de diseño se calcula como indica la Ec.14.

$$Q = \frac{C \cdot I_t \cdot A \cdot K_t}{3.6} \quad (14)$$

Obteniendo el caudal en $\frac{m^3}{s}$ (Sánchez San Román, F.J., 2016).

Por la escasez de datos de entrada para calcular el caudal de diseño por este método, se descarta y se aplica otra metodología.

7.1.1.2. Cálculo del caudal de diseño con el coeficiente de escorrentía

Como aproximación más exacta con los datos que se han podido extraer de la presa de implantación de la instalación de Nikki, se ha decidido calcular el caudal de diseño de la turbina, a partir del uso del hidrograma de la cuenca de aportación y del coeficiente de escorrentía.

El coeficiente de escorrentía interpreta la porción de agua del total de precipitaciones que realmente produce escorrentía superficial cuando se ha saturado totalmente el suelo. Su valor es función de las propiedades del suelo que condicionan la infiltración de agua a través de él. Existe una gran cantidad de métodos diferentes para su cálculo, pero todos ellos se basan en la experimentación. La determinación de su valor se lleva a cabo utilizando ecuaciones empíricas o tablas. Las más empleadas son las tablas de Raws, la de Molchanov y la de Prevert, por su lado, entre las ecuaciones destacan la ecuación de Nadal y la fórmula de Keler. En este estudio se utiliza el Método de Raws. Utilizando las imágenes aéreas del terreno se observan cultivos y un relieve ondulado, por ello, se toma como coeficiente de escorrentía: $C = 0.6$ obtenido de la Tabla 9 (Ibáñez Asensio, S., 2012).

Tabla 9: Método de Raws (Ibáñez Asensio, S., 2012).

Tipo de terreno	C
Bosque. Relieve ondulado	0.18
Bosque. Relieve quebrado	0.21
Pasto. Relieve ondulado	0.36
Pasto. Relieve quebrado	0.42
Cultivos. Relieve ondulado	0.60
Cultivos. Relieve quebrado	0.72

Para conocer el caudal que fluye a través del azud se procede a utilizar los datos de los que disponemos: el hietograma medio de Nikki que representa un año, el coeficiente de escorrentía y la cuenca aportante, por medio de la Ec.15.

$$Q = \text{precipitaciones} \cdot C_{ap} \cdot C$$

(15)

Siendo: $C_{ap} = 133.66 \text{ km}^2$

$C = 0.60$

Utilizando los datos que (Weather Spark, 2020) proporciona, se construye en Microsoft Excel una tabla de datos con las precipitaciones de lluvia promedio por cada semana del año y el cálculo del caudal de cada una de ellas como se muestra en la Fig. 25 y se adjunta en el Anexo 1. De tal manera que, en el futuro, si se pueden llevar a cabo mediciones en el terreno, se puede obtener el hietograma empírico. Además, se puede editar para ser aplicable a otros emplazamientos del mundo, variando los datos de precipitaciones y el valor del coeficiente de escorrentía. El hietograma con los datos disponibles se muestra en la Fig. 26 y el hidrograma obtenido: Fig. 27.

Superficie de aportación (km ²)		133,66			
Coeficiente de escorrentía		0,6			
Meses	Días	Semanas	Precipitación de lluvia promedio	Caudal (m ³ /semana)	Caudal (m ³ /s)
Enero	1-7	1	0	0	0,000
	8-14	2	0	0	0,000
	15-21	3	1	80196	0,133
Febrero	22-28	4	1,5	120294	0,199
	29-4	5	2	160392	0,265
	5-11	6	4	320784	0,530
Marzo	12-18	7	5	400980	0,663
	19-25	8	6	481176	0,796
	26-4	9	8	641568	1,061
Abril	5-11	10	11	882156	1,459
	12-18	11	15	1202940	1,989
	19-25	12	17	1363332	2,254
Mayo	26-1	13	24	1924704	3,182
	2-8	14	30	2405880	3,978
	9-15	15	35	2806860	4,641
Junio	16-22	16	46	3689016	6,100
	23-29	17	53	4250388	7,028
	30-6	18	59	4731564	7,823
Julio	7-13	19	68	5453328	9,017
	14-20	20	71	5693916	9,415
	21-27	21	79	6335484	10,475
Agosto	28-3	22	84	6736464	11,138
	4-10	23	90	7217640	11,934
	11-17	24	95	7618620	12,597
Septiembre	18-24	25	101	8099796	13,393
	25-1	26	120	9623520	15,912

Figura 25: Muestra de la tabla Excel para el cálculo del caudal por semanas (Weather Spark).

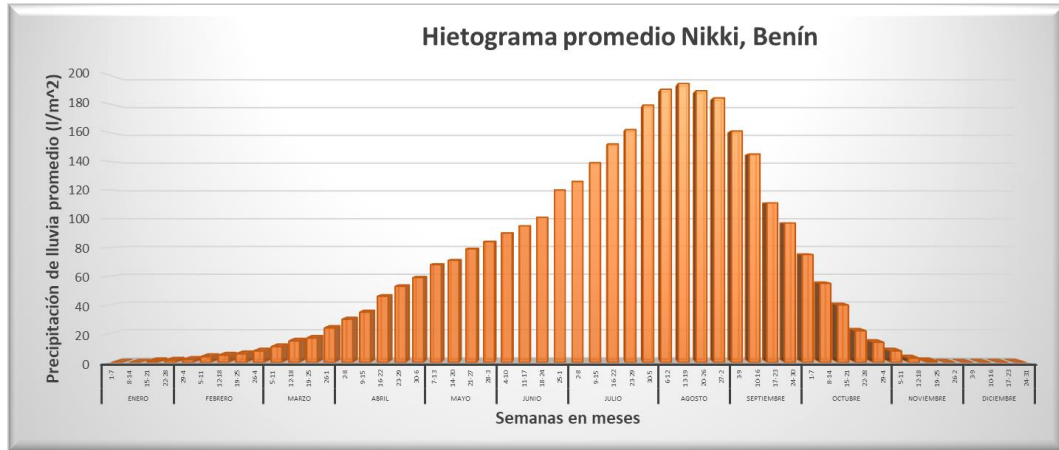


Figura 26: Hietograma promedio de Nikki (Weather Spark).

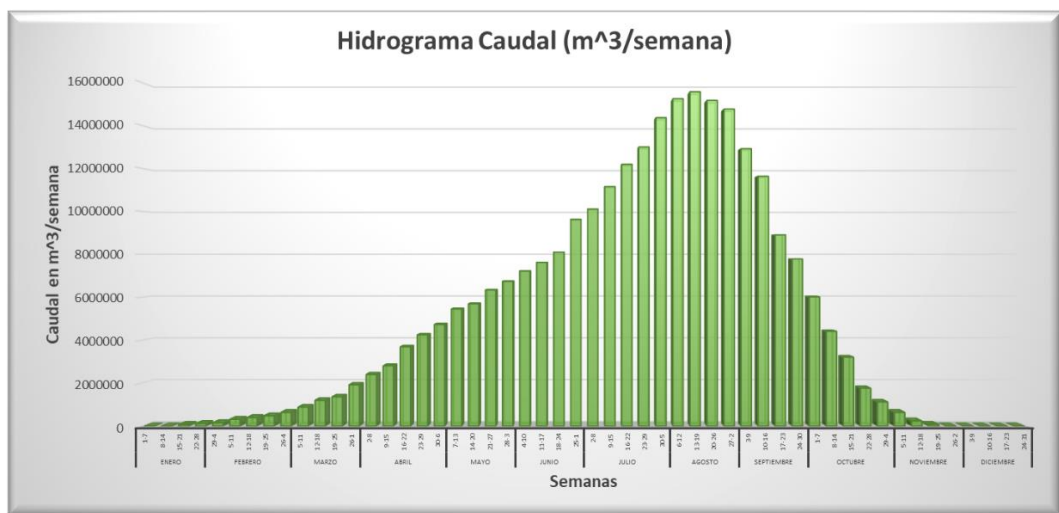


Figura 27: Hidrograma de Nikki en un año promedio.

Se toma como caudal diseño de partida un valor de $Q = 0.13 \frac{m^3}{s}$ porque el valor del caudal de las semanas más secas del caño en Nikki es de $0.133 \frac{m^3}{s}$ excluyendo las 7 semanas de caudal nulo que ocurren en enero y diciembre. Gracias al embalse de agua disponible, la turbina podrá funcionar todo el año.

7.1.2. Determinación del salto neto

Otra dimensión esencial en el diseño de minicentrales hidroeléctricas es el salto. Teniendo en cuenta las restricciones que ponen la viabilidad económica y la huella en el medio ambiente, debe ser el máximo posible en función de la topografía del terreno.

Términos importantes:

- Salto bruto (H_b): Altura medida entre la toma de agua de la presa y el punto de descarga del caudal turbinado al río.
- Salto útil (H_u): Desnivel existente entre la superficie libre del agua en la cámara de carga y el nivel de drenaje en la turbina.
- Salto neto (H_n): Es la diferencia entre el salto útil (H_u) y las pérdidas de carga a lo largo de todas las tuberías. Indica la energía máxima que se puede convertir en trabajo en el eje de la turbina.
- Pérdidas de carga (H_p): Son las pérdidas por fricción del agua contra las paredes del canal (especialmente en la tubería de presión), más las pérdidas causadas por turbulencia cuando el flujo de agua cambia de trayectoria o al pasar por una rejilla o una válvula, etc. Se miden como pérdidas de presión (o altura de salto) y se calculan mediante fórmulas derivadas de la dinámica de fluidos.

En la Fig. 28 se muestra un esquema sobre los diferentes conceptos explicados relativos al salto.

Se puede utilizar el plano del terreno de estudio para estimar, en una primera aproximación, el salto bruto. Aunque, para una determinación más adecuada y precisa, convendría realizar un levantamiento topográfico en el área. De la misma manera, se puede suponer que las pérdidas de carga son aproximadamente del 5% al 10% del salto bruto (Castro, A., 2006).

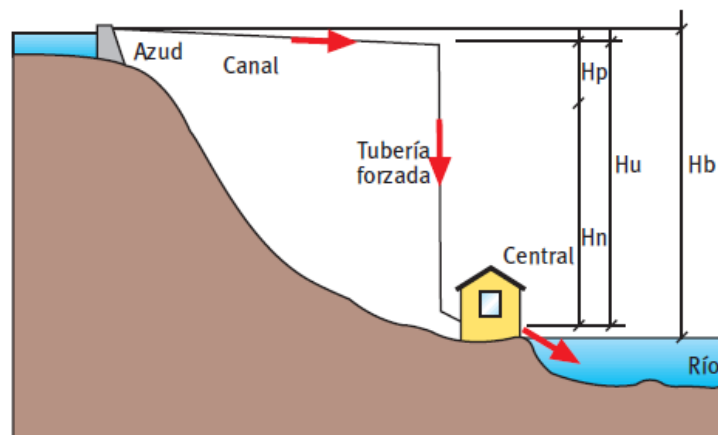


Figura 28: Esquema general de un salto de agua (Castro, A., 2006).

La altura bruta existente en el azud de estudio que se muestra en las Fig. 29 a Fig. 31 se estima que es de aproximadamente 4m.

El objetivo es utilizar el máximo salto, dentro del desnivel disponible en el azud, para obtener la mayor cantidad de energía sin construir un tornillo de diámetro excesivo, de tal manera que su fabricación e implantación sea lo más sencilla posible. A mayores, utilizar un alto valor de desnivel, permite que el caudal de diseño escogido sea lo suficientemente pequeño como para que la turbina sea operativa durante todo el año, a pesar de que en Benín existe una estación seca y otra húmeda. Sin embargo, las limitaciones en la fabricación, en la potencia del generador y las dimensiones del tornillo, también se tendrán en cuenta en el diseño final de la turbina.



Figura 29: Fotografía 1 del azud de Nikki.



Figura 30: Fotografía 2 del azud de Nikki.



Figura 31: Fotografía 3 del azud de Nikki sin caudal.

7.2. DETERMINACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL TORNILLO

7.2.1. Parámetros internos y parámetros externos

La geometría del tornillo de Arquímedes está determinada por unos parámetros externos y por otros internos. Los primeros de ellos están condicionados por la localización del tornillo y por la cantidad de agua que se requiere que sea movida. Los parámetros internos, sin embargo, son independientes de todo ello y pueden ser escogidos para maximizar el funcionamiento del tornillo, diseñando un tornillo óptimo (Rorres C., 2000). Los parámetros principales se muestran en la Fig. 32.

Los parámetros externos son:

- D_o : diámetro exterior del cilindro del tornillo (m).
- L : longitud total del tornillo (m).
- K : pendiente del tornillo (adimensional).

Los parámetros internos son:

- D_i : diámetro interior del cilindro del tornillo (m). ($0 \leq R_i \leq R_o$)
- τ : paso o periodo de un filo (m). ($0 \leq \tau \leq R_o \cdot 2\pi/K$)
- N : Número de álabes (adimensional).

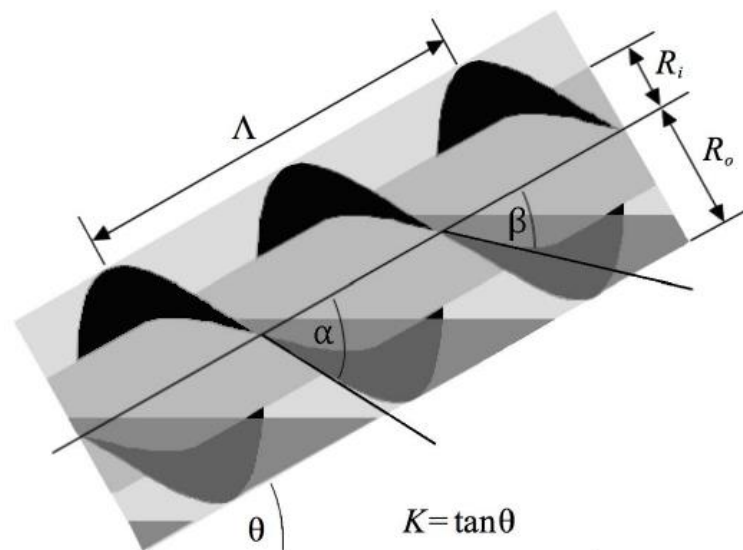


Figura 32: Vista de perfil de una sección de un Tornillo de Arquímedes de 2 álabes. (Rorres C., 2000).

Para conocer los valores de los parámetros externos, se necesitan especificar dos datos de entrada, que son condicionados por las peculiaridades del emplazamiento y del flujo hídrico a utilizar. Estos son:

- Caudal máximo de diseño: $Q = 0.13 \frac{m^3}{s}$
- Altura neta del salto que tendrá como valor máximo: $H_n = 4m$

A partir del valor del caudal máximo de diseño y de la altura neta, se definen los parámetros exteriores. La elección de ellos es derivada de la información empírica del funcionamiento del sistema. A partir de la tabla experimental que se muestra en la Fig.33, entrando con el valor del caudal de diseño, se conoce un primer valor recomendado de diámetro exterior del tornillo. También aparece tabulado el valor del ángulo θ , el ángulo de inclinación del tornillo (Fernández Piegari, M., 2010).

Turbine diameter $\varnothing D [mm]$	Nominal flow $Q [l/s]$	
	22°	30°
720	130	105
880	225	180
1 050	335	285
1 280	550	425
1 550	875	700
1 650	1 000	800
2 000	1 500	1 250
2 300	2 000	1 700
2 500	2 500	2 100
2 700	3 000	2 500
2 850	3 500	2 850
3 000	4 000	3 200
3 300	5 000	4 000

Figura 33: Valores del diámetro exterior y del ángulo de inclinación en función del caudal de diseño (Fernández Piegari, M., 2010)

Sin embargo, se dispone de información empírica (Tabla 10) suficiente como para poder tomar como ángulo de inclinación del tornillo, la pendiente aproximada del azud, en caso de que se decida instalar la turbina directamente sobre el azud que ya existe en Nikki. La pendiente se calcula en la Ec.16.

Tabla 10: Datos sobre el azud de Nikki

Ancho	20m
Largo	15m
Altura Neta	4m
Ángulo de inclinación	22.4°

$$\theta = 22^\circ$$

$$Pte = K = \tan \theta = 0.4$$

(16)

El ángulo de inclinación debe estar determinado en base a la inclinación del emplazamiento. Un ángulo de 22° puede considerarse adecuado ya que la mayoría de las plantas generadoras con tornillo de Arquímedes actuales están instaladas con una pendiente similar, a menos que haya la necesidad de una inclinación más pronunciada. También el ángulo de 22° cumple con el resultado al utilizar la tabla que propone la bibliografía, que es también el que utiliza la empresa alemana Andritz Atro en sus tornillos (Andritz Atro, 2012). Y al ser un valor que se encuentra entre 20° y 30° , cumple con la consideración que hace (Yoosef Doost A., Lubitz W., 2020), que explica que el ángulo θ no debe superar los 30° porque la producción energética del tornillo disminuiría muy notablemente, ni conviene que sea menor a los 20° porque la longitud del tornillo sería excesiva.

Para conocer los valores óptimos del diámetro interior y del paso, se analiza el diseño del tornillo para que maximice la cantidad de agua vertida al depósito inferior en una revolución del tornillo. El agua se queda retenida en las divisiones que se crean entre los álabes. Cuando el tornillo rota, dichas áreas descienden, haciendo bajar el agua que en ellas se encuentra. El tornillo recoge el agua en su zona superior, donde se forman cubos de agua y se vacía en el nivel inferior de la presa. Maximizar el volumen de agua transferida al nivel inferior en cada vuelta del tornillo, es la base del diseño óptimo (Fernández Piegari, M., 2010), (Rorres C., 2000).

Para que el agua se quede atrapada en el tornillo, es necesario que la curva sinusoidal definida por el borde exterior del álabe se incline hacia abajo cuando cruza el eje del tornillo. En términos de ángulos, eso se cumple cuando $\theta \leq \alpha$ (α es el ángulo de inclinación de los álabes con respecto a la circunferencia exterior Fig.32) o, lo que es equivalente, $\tan \theta \leq \tan \alpha$. Como hemos definido que $\tan \theta = K$; y como la curva sinusoidal tiene como periodo a τ y a R_o como amplitud: $\tan \alpha = R_o \cdot 2\pi/\tau$.

La condición $\tan \theta \leq \tan \alpha$ es de este modo $K \leq R_o \cdot 2\pi/\tau$, que despejando el paso: $\tau \leq 2\pi \cdot R_o/K$.

$\tau \leq 2\pi \cdot R_o/K$: es la condición del paso que se tiene en cuenta en la definición de los parámetros exteriores (Rorres C., 2000).

El problema de dimensionar los parámetros internos se resuelve haciendo un análisis de optimización del diseño del tornillo. Se comienza definiendo los parámetros adimensionales que aparecen en la Tabla 11 con sus ecuaciones de cálculo: Ec.17 a Ec.19.

Tabla 11: Parámetros adimensionales internos (Rorres C., 2000).

Símbolo	Nombre	Fórmula	Entorno
ν	Proporción de volumen	$\nu = \frac{\text{volumen de agua de un ciclo de tornillo}}{\text{volumen total de un ciclo de tornillo}} = \frac{V_T}{\pi R_o^2 \tau}$ (17)	$(0 \leq \nu \leq 1)$
ρ	Proporción de radios	$\rho = \frac{R_i}{R_o}$ (18)	$(0 \leq \rho \leq 1)$
λ	Proporción del paso	$\lambda = \frac{K\tau}{2\pi R_o}$ (19)	$(0 \leq \lambda \leq 1)$

El análisis adimensional muestra que ν depende únicamente de N , ρ , y de λ . Por tanto, se puede escribir $\nu(N, \rho, \lambda)$. De las tres igualdades de la Tabla 11 se obtiene la expresión Ec.20 para calcular V_T que es el volumen de agua en un ciclo del tornillo:

$$V_T = \left(\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot R_o^3}{K} \right) \lambda \nu(N, \rho, \lambda)$$

(20)

Por lo tanto, conociendo los valores de N , R_o y K , el problema de maximizar el volumen de agua en un ciclo del tornillo en función de R_i y de τ se reduce en maximizar $\lambda \nu(N, \rho, \lambda)$ con respecto a ρ , λ , que deben estar comprendidos entre $[0,1]$.

Se puede ver en las Fig. 34 y Fig.35 que la función $\lambda \nu(N, \rho, \lambda)$ solamente presenta un máximo dentro del cuadrado unitario. Para diferentes valores del número de álabes (N) se calculó el valor de ese máximo usando la función de MatLab “fmin”, que implementa la búsqueda de Nelder-Mead (Villegas Arango C., 2016).

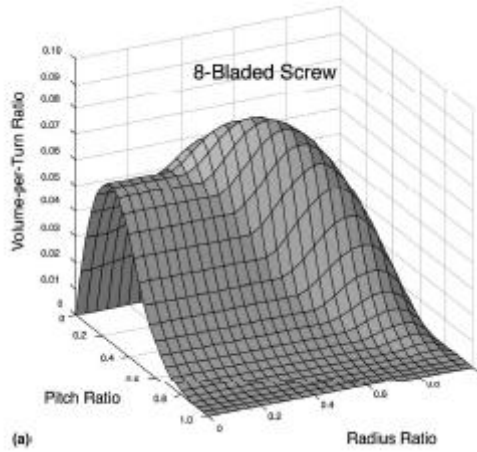


Figura 34: Vista 1 del volumen por rotación
(Villegas Arango C., 2016).

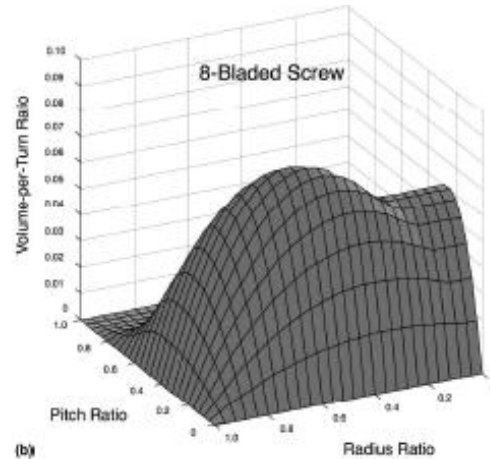


Figura 35: Vista 2 del volumen por rotación
(Villegas Arango C., 2016).

Lo más sencillo de aplicar y que es lo que se ha utilizado para construir la tabla de Microsoft Excel del Anexo 2 es la tabla de la Fig. 36. La tabla anterior proporciona los valores óptimos (representados con un *) de las relaciones de la pendiente y de los radios en función del número de álabes, estando tabulados para tornillos de entre 1 y 25, junto con los correspondientes valores óptimos de las relaciones de volumen de agua desplazado por giro y de volumen. La última de las filas proporciona el valor límite de estas variables cuando el número de álabes se aproxima a infinito (Rorres C., 2000).

Con el aumento de la cantidad de álabes, la región de tornillo ocupada por agua disminuye (Villegas Arango C., 2016).

Number of blades N (1)	Optimal radius ratio ρ^* (2)	Optimal pitch ratio λ^* (3)	Optimal volume-per-turn ratio $\lambda^* \nu(N, \rho^*, \lambda^*)$ (4)	Optimal volume ratio $\nu(N, \rho^*, \lambda^*)$ (5)
1	0.5358	0.1285	0.0361	0.2811
2	0.5369	0.1863	0.0512	0.2747
3	0.5357	0.2217	0.0598	0.2697
4	0.5353	0.2456	0.0655	0.2667
5	0.5352	0.2630	0.0696	0.2647
6	0.5353	0.2763	0.0727	0.2631
7	0.5354	0.2869	0.0752	0.2619
8	0.5354	0.2957	0.0771	0.2609
9	0.5356	0.3029	0.0788	0.2601
10	0.5356	0.3092	0.0802	0.2592
11	0.5358	0.3145	0.0813	0.2586
12	0.5360	0.3193	0.0824	0.2580
13	0.5360	0.3234	0.0833	0.2574
14	0.5360	0.3270	0.0841	0.2571
15	0.5364	0.3303	0.0848	0.2567
16	0.5362	0.3333	0.0854	0.2562
17	0.5362	0.3364	0.0860	0.2556
18	0.5368	0.3380	0.0865	0.2559
19	0.5364	0.3404	0.0870	0.2555
20	0.5365	0.3426	0.0874	0.2551
21	0.5370	0.3440	0.0878	0.2553
22	0.5365	0.3465	0.0882	0.2544
23	0.5369	0.3481	0.0885	0.2543
24	0.5367	0.3500	0.0888	0.2538
25	0.5371	0.3507	0.0891	0.2542
.
.
.
∞	0.5394	0.3953	0.0977	0.2471

Figura 36: Tabla de relaciones de parámetros óptimos del tornillo de Arquímedes, en función del número de álabes (Rorres C., 2000).

Las Fig. 37 y Fig.38 muestran la representación gráfica de los datos de la tabla de valores óptimos de la Fig.36. Destaca el hecho de que la relación de radios óptima solamente se mueve entre los valores 0.5352 y 0.5394, por lo que, aproximando a dos decimales, la relación de radios óptima es de 0.54 para cualquier número de álabes (Villegas Arango C., 2016).

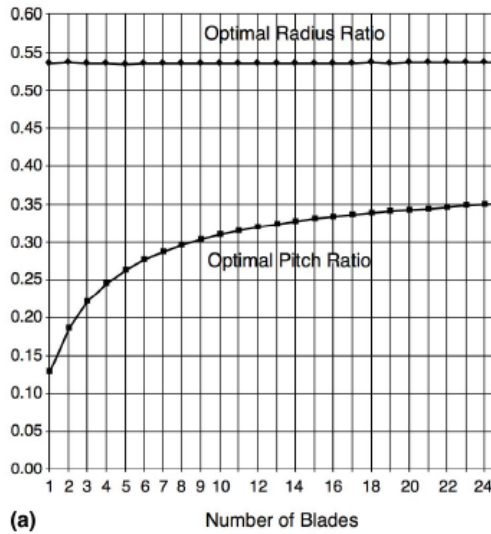


Figura 37: Representación gráfica de los datos de la tabla de valores óptimos de ρ y de λ (Rorres C., 2000).

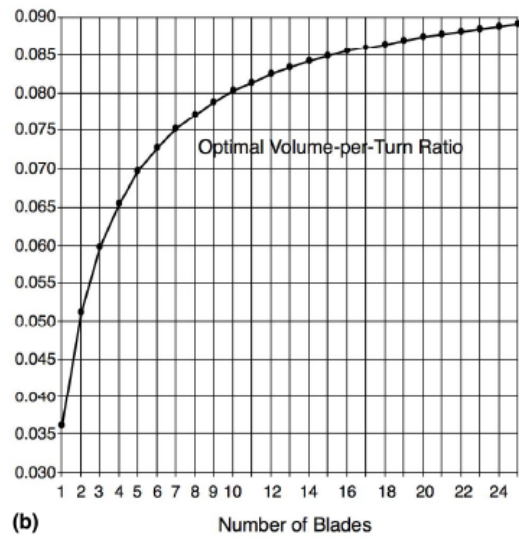


Figura 38: Representación gráfica de los datos de la tabla de valores óptimos de ν (Rorres C., 2000).

En la práctica, un generador de tornillo de Arquímedes suele usar de 1 a 5 álabes. Un mayor número permite al tornillo retener una mayor cantidad de volumen de agua y produce potencia de valor más constante, sin embargo, las pérdidas por fricción son mayores y los costes de material y la dificultad en la construcción del tornillo aumentan notablemente. Existen tablas experimentales y analíticas que para una velocidad angular y un caudal de diseño especificados, te indican el número de álabes más favorable. Como la prioridad en este diseño es la facilidad de la fabricación, el número de álabes escogido es de 2.

$$N = 2$$

Con este número de álabes, se obtiene:

- $\rho^* = 0.5369$
- $\lambda^* = 0.1863$

Al fijar el valor del diámetro (D_o) o del radio exterior (R_o), los valores del radio (R_i) y del diámetro interiores (D_i), son inmediatos. Así como el valor del paso a partir de la Ec.21 y Ec.22. (Rorres C., 2000).

$$R_i = \rho^* \cdot R_o \tag{21}$$

$$\tau^* = \frac{\lambda \cdot 2\pi \cdot R_o}{K}$$

(22)

Los valores de los ángulos de inclinación de los álabes con respecto a la circunferencia interior y exterior del tornillo se calculan, ante la falta de estudios de estos ángulos para turbinas, con sus definiciones para tornillos de Arquímedes (Ec.23 y Ec.24) (Rorres C., 2000).

$$\tan \alpha = \frac{R_o \cdot 2\pi}{\tau}$$

(23)

$$\tan \beta = \frac{R_i \cdot 2\pi}{\tau}$$

(24)

La longitud total del tornillo de Arquímedes depende de forma directa de la altura del salto que se quiera utilizar, que debe ser igual o menor que la altura neta del emplazamiento. Es una magnitud muy determinante a la hora de escoger las dimensiones del tornillo ya que condiciona sustancialmente la fabricación y la instalación de la turbina. La forma de calcular la longitud del tornillo es aplicando una simple relación trigonométrica utilizando el ángulo de inclinación como muestra la Fig. 32. (Ec.25).

$$L = \frac{H}{\sin \theta}$$

(25)

Se suele realizar una comprobación de la longitud del tornillo para evitar que no esté bien proporcionado. El cociente entre la longitud total del tornillo (L) y el diámetro exterior del mismo (D_o) debe ser mayor a 1.25 (Rorres C., 2000).

7.2.2. Descarga del tornillo. Caudales.

Las diferencias principales entre los motores de tornillo de Arquímedes y las turbinas son: la dirección del transporte de agua, las condiciones de la toma, y las de salida del agua.

El caudal de diseño se divide en los siguientes cinco componentes a su paso por el tornillo, se muestran en la Fig. 39.

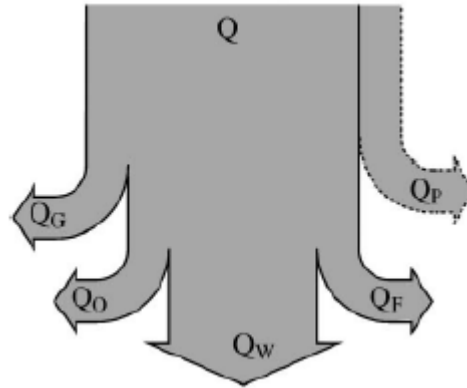


Figura 39: Balance de caudales (MSc Charisiadis C., 2015).

- Q_w : Caudal que genera la rotación del tornillo.
- Q_G : Caudal de fugas perdido por la holgura entre los álabes y la carcasa del tornillo.
- Q_O : Caudal de pérdidas debido al llenado excesivo de los cubos, es decir, cuando se llenan por encima del punto F de la Fig.40.
- Q_F : Caudal de pérdidas debido a la fricción del agua que se adhiere a los álabes.
- Q_P : Caudal de pérdidas que se da si no hay placas conductoras en el diseño (MSc Charisiadis C., 2015).

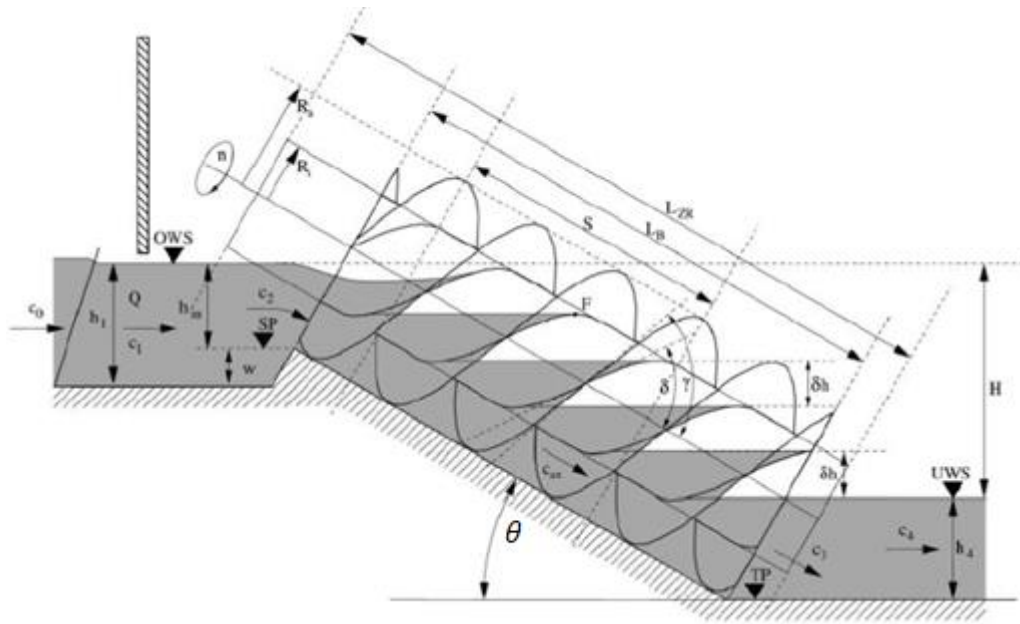


Figura 40: Sección transversal de un tornillo de Arquímedes usado para una planta hidroeléctrica (MSc Charisiadis C., 2015).

El caudal de pérdidas Q_p se puede despreciar si se usan placas conductoras como las que se muestran en la Fig. 41. El caudal de pérdidas por fricción Q_f es despreciable siempre porque sus efectos son mucho menores con respecto al resto. Por lo tanto, el balance de los caudales se tiene la Ec.26. (MSc Charisiadis C., 2015):

$$Q_{diseño} = Q_w + Q_G + Q_o \quad (26)$$

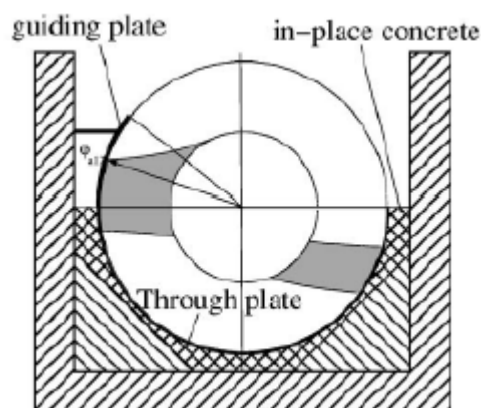


Figura 41: Placas guía (MSc Charisiadis C., 2015).

Los tres componentes, se calculan a continuación.

El volumen de agua en cada cubo se mantiene fijo según el cubo desciende porque las pérdidas de caudal Q_G, Q_O de cada cubo están equilibradas con el flujo que entra en cada cubo desde el cubo que se encuentra superior a él en el conducto. El caudal Q_w que genera el momento torsor de la turbina es la parte del caudal total Q que llena cada cubo hasta el punto de llenado óptimo F , entonces, cada cubo tiene un volumen igual a V_u . La energía hidráulica de los dos caudales de pérdidas se pierde en forma de turbulencia. Solamente la energía hidráulica del volumen de agua V_u , de cada cubo, puede transformarse en energía rotacional del tornillo (Ec.27) (MSc Charisiadis C., 2015).

$$Q_w = \frac{2\pi^2 \cdot R_o^3}{\tan \theta} \cdot \lambda v \cdot \frac{n}{60}$$

(27)

Siendo n la velocidad de rotación del tornillo en min^{-1} . Basándose en la experiencia y en la experimentación, se demostró que la velocidad de rotación debe ser como máximo (Ec.28):

$$n \leq \frac{50}{(2 \cdot R_o)^{2/3}} (min^{-1})$$

(28)

La mayoría de los fabricantes europeos recomiendan esa velocidad de rotación (MSc Charisiadis C., 2015).

Gracias a la expresión de Weisbach de 1855 (Ec.29), se puede calcular el volumen de agua que fluye a través del tornillo en cada vuelta en m^3 .

$$Q_w = \frac{n}{60} \cdot V_u \rightarrow V_u = \frac{60 \cdot Q_w}{n}$$

(29)

Para el cálculo del caudal de pérdidas Q_G , por la holgura entre los álabes y la carcasa debido a una diferencia de alturas entre los cubos (Ec.30)_(*Rorres C., 2000*), se utiliza la Ec.31 (*MSc Charisiadis C., 2015*).

$$\delta h = \frac{\tau}{N} \cdot \sin \theta$$

(30)

$$Q_G = \mu_A \cdot s_{SP} \cdot R_O \cdot \left(1 + \frac{s_{SP}}{2R_O}\right) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\tau}{(2\pi \cdot R_O)^2}\right)^2} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \alpha_3 + \alpha_4 + \frac{2}{3} \cdot \alpha_5\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \delta h}$$

(31)

Los términos de la Ec.31 son:

- s_{SP} : La máxima holgura entre la carcasa y los álabes. Depende de la flexión del tornillo que al rotar sobre sí mismo es función de su peso, del grosor de los materiales y de la longitud entre los cojinetes. El máximo valor de esta holgura se suele estimar a partir de la ecuación empírica Ec.32 (*MSc Charisiadis C., 2015*).

$$s_{SP} = 0.0045 \cdot \sqrt{2 \cdot R_O}$$

(32)

- μ_A : Coeficiente de reducción de flujo. Se encuentra entre los valores de [0.65,1]. Su valor depende de la forma del filo de los álabes. En este diseño se le da el valor de $\mu_A = 1$ para diseñar en base al caso más desfavorable (*MSc Charisiadis C., 2015*).
- $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$: Ángulos que se muestran en la Fig. 42 y son aquellos que determinan la corriente de pérdidas Q_G determinado por la superficie de agua del tornillo (*Nuernbergk D., 2013*).

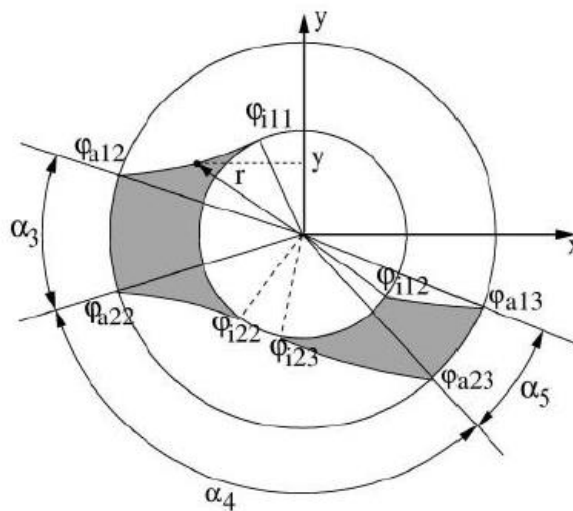


Figura 42: Definición de los ángulos $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ (Nuernbergk D., 2013).

Los valores en radianes de los ángulos de la corriente de pérdidas son los que se exponen en la Tabla 12.

Tabla 12: Valores numéricos de los ángulos $\alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ (Nuernbergk D., 2013).

Símbolo	Valor (rad)
α_3	$\frac{7\pi}{36}$
α_4	$\frac{29\pi}{45}$
α_5	$\frac{13\pi}{90}$

La Ec.31 muestra que el caudal de pérdidas no depende de la velocidad de rotación n . Sin embargo, las pérdidas mecánicas por fricción disminuyen según la velocidad de rotación n se reduce. Por lo tanto, el caudal de pérdidas determina la eficiencia alcanzable por el tornillo.

El caudal de pérdidas debido al llenado excesivo de los cubos es Q_0 . Como el diseño que se desarrolla pone como condición el llenado óptimo del tornillo, es decir, sin superar el nivel del punto F de la Fig. 40, $Q_0 = 0$.

El resultado es que la Ec.26 del balance de caudales se reduce a la Ec.33.

$$Q_{diseño} = Q_w + Q_G \tag{33}$$

El caudal de diseño resultante debe ser menor al caudal de diseño máximo que se calculó anteriormente (Ec.34). En el programa de Microsoft Excel que se adjunta en el Anexo 2 se comprueba si el resultado del caudal de diseño es válido comparándolo con el máximo (MSc Charisiadis C., 2015).

$$Q_{diseño} \leq Q = 0.13 \frac{m^3}{s}$$

(34)

7.2.3. Cálculo de la altura h_{in}

La turbina del tornillo de Arquímedes tiene la ventajosa propiedad de que puede trabajar con un flujo de hasta un 120% del llenado óptimo sin sufrir una pérdida significativa de eficiencia. Aun así, se diseña para no tener pérdidas por llenado excesivo y para ello, se requiere el cálculo del parámetro h_{in} , que se representa en la Fig. 40. Se asume que el agua entrante accede al tornillo en forma de canal rectangular, cuya anchura coincide con el valor del diámetro exterior del tornillo, es decir, $2R_O$. La altura del agua entrante coincide con el valor del radio exterior, es decir, con R_O . La condición del valor la altura es la de satisfacer el reconocido hecho de que para minimizar la fricción de un flujo de agua en un canal rectangular abierto, la altura del agua debe ser la mitad de la anchura del canal (MSc Charisiadis C., 2015).

Primeramente, se necesita calcular el valor del volumen total adimensional con la Ec.35. v_t es una extensión del volumen adimensional v de la Tabla 11 y se relaciona con él como muestra la Ec.36. Cuando se llena el tornillo de forma óptima, $Q_O = 0$ y la Ec.36 se reduce a la Ec.37 (MSc Charisiadis C., 2015).

$$v_t = \frac{Q_{diseño}}{\pi \cdot R_O^2 \cdot c_{ax}}$$

(35)

$$v_t = v_u + \frac{Q_G}{\pi \cdot R_O^2 \cdot c_{ax}} + \frac{Q_O}{\pi \cdot R_O^2 \cdot c_{ax}}$$

(36)

$$v_t = v_u + \frac{Q_G}{\pi \cdot R_O^2 \cdot c_{ax}}$$

(37)

En la Ec.35 aparece el término c_{ax} que es la velocidad de transporte axial, y se define como Ec.38 en m/s :

$$c_{ax} = \tau \cdot \frac{n}{60} \quad (38)$$

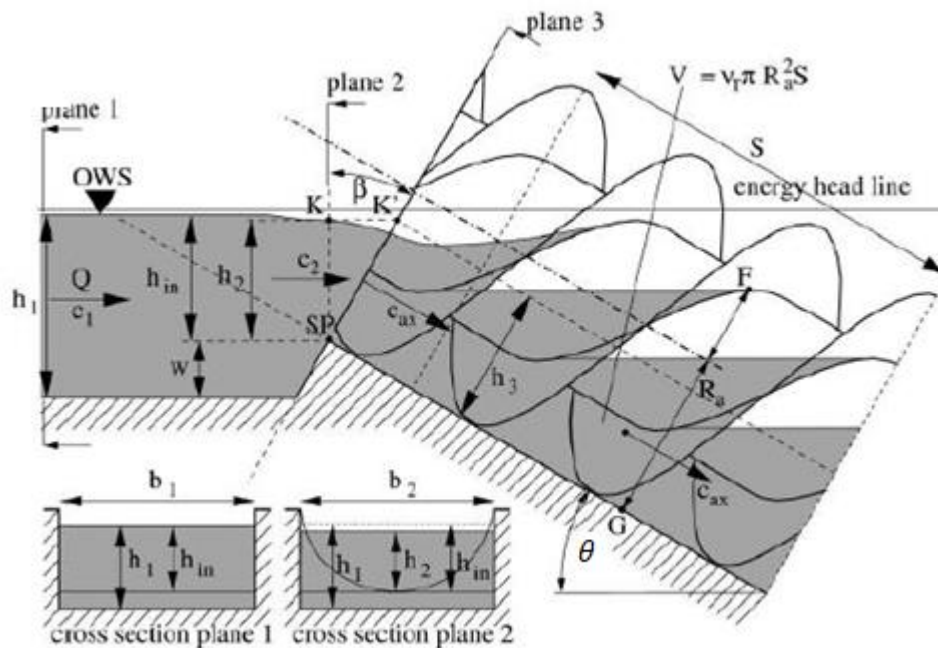


Figura 43: Sección transversal de la entrada de un tornillo de Arquímedes (Nuernbergk D., 2013).

La Fig.43 muestra el perfil del nivel de fluido cuando el agua entra al tornillo desde un canal con un caudal de $Q_{diseño}$ y una altura h_1 que es la suma de h_{in} y w , que depende de la obra civil realizada, por lo que es un valor que se puede decidir (MSc Charisiadis C., 2015).

El agua accede al tornillo atravesando el Plano 2 que muestra la Fig.43. El Plano 2 es perpendicular al flujo de agua que tiene una altura h_2 . La altura h_2 difiere ligeramente del valor de la altura de entrada h_{in} . Para determinar el valor de h_{in} para un flujo concreto, primeramente, se necesita desarrollar un modelo analítico de h_2 . Cabe destacar que el nivel del agua describe lo que se conoce como un perfil *drop-down* al atravesar el Plano 2 debido a un incremento de la velocidad del flujo en el plano mencionado debido al movimiento descendente de los cubos de agua (MSc Charisiadis C., 2015).

Desafortunadamente, no existe una solución única para resolver las alturas de un perfil *drop-down*, debido a que cada álabe que mueve el agua modifica el

perfil. La aproximación que se aplica es la de un flujo constante de altura h_3 y de velocidad axial de c_{ax} , obtenida de la Ec.38.

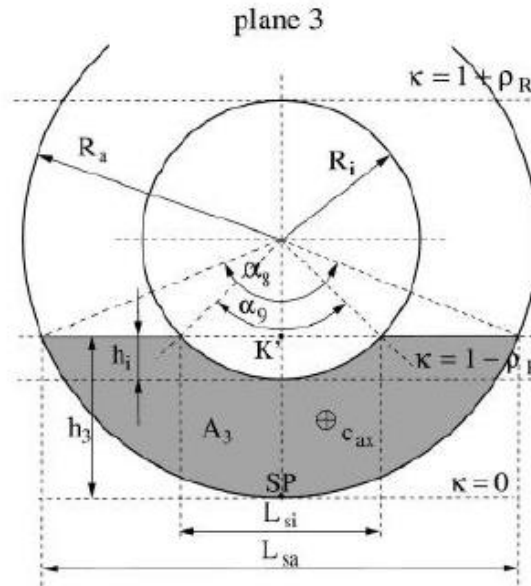


Figura 44: Sección de corte por el plano 3 de la Fig.43 (Nuernbergk D., 2013).

Siendo A_3 el área promedio de agua de la sección transversal del tornillo (Fig.44), el volumen total adimensional se calcula como Ec.39 y se obtiene A_3 en función de él.

$$v_t = \frac{A_3}{\pi \cdot R_0^2} \rightarrow A_3 = v_t \cdot \pi \cdot R_0^2 \quad (39)$$

Para obtener el valor de la altura h_3 , se aprovecha la dependencia que tiene con los parámetros adimensionales de v_t y de ρ . Existen distintas formas de calcular esta altura, o bien a partir de ecuaciones o utilizando gráficos. Sea cual sea el método utilizado, es preciso definir el parámetro adimensional de la altura k (Ec.40).

$$k = \frac{h_3}{R_0} \quad (40)$$

El método utilizado en el programa de Microsoft Excel desarrollado en este trabajo en el Anexo 2 es a partir de la tabla de la Fig.45. Dicha tabla muestra los resultados de cálculo para diferentes ratios de radio (ρ). Al obtener k a partir

de v_t y de ρ , se puede calcular el valor de h_3 a partir de la Ec.40 (MSc Charisiadis C., 2015).

Los valores típicamente utilizados por los fabricantes son de $\rho = 0.3$; $\rho = 0.5$ (MSc Charisiadis C., 2015).

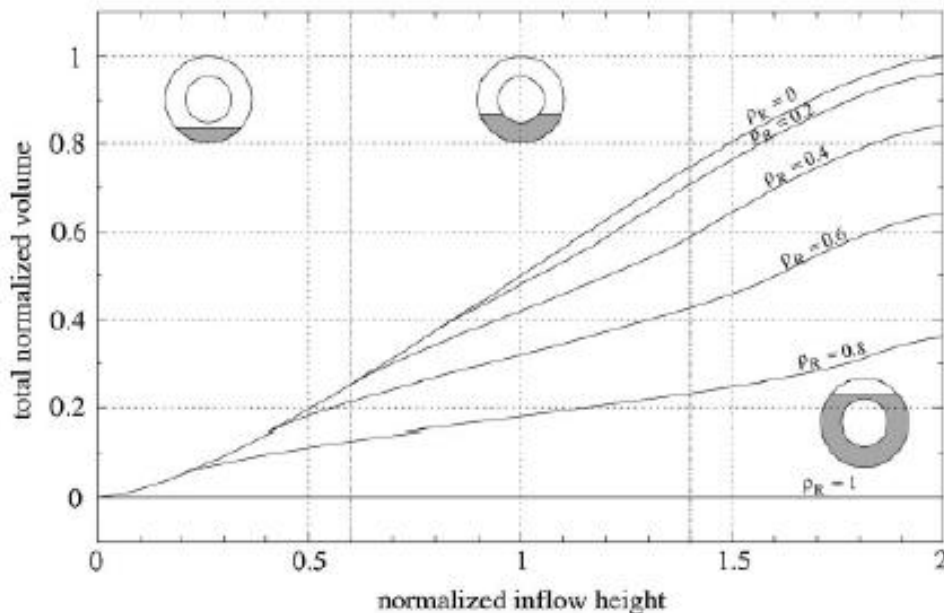


Figura 45: Resultados del cálculo de k para diferentes valores de v_t vs. ρ (Nuernbergk D., Rorres C., 2013).

Se utiliza la aproximación de que la altura h_2 es la proyección de la h_3 en la dirección vertical, por lo que a partir de la Fig.40, se obtiene la Ec.41.

$$h_2 = h_3 \cdot \cos \theta$$

(41)

Entonces, para el cálculo de la altura de entrada h_{in} , se aplica la ecuación de Bernoulli entre los Planos 1 y 2 (Ec.42), que se muestran en la Fig.40 (MSc Charisiadis C., 2015).

$$h_1 + \frac{c_1^2}{2g} = w + h_2 + \frac{c_2^2}{2g} \cdot (1 + \zeta)$$

(42)

Siendo: ζ = factor de pérdidas hidráulicas.

c_1 = velocidad del flujo en el Plano 1.

c_2 = velocidad del flujo en el Plano 2.

Para calcular las velocidades c_1 y c_2 es preciso realizar dos suposiciones:

- $h_1 = R_0$
- $b_1 = b_2 = 2 \cdot R_0$

Siendo b_1 y b_2 las anchuras de los canales mostrados en la Fig.43 y h_1 la altura del canal en el Plano 1.

Con las definiciones de los caudales que atraviesan cada uno de los Planos 1 y 2 (Ec.43 y Ec.45) se obtiene la relación entre velocidades y alturas Ec.44 (MSc Charisiadis C., 2015).

$$\begin{array}{l}
 Q_{diseño} = c_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \\
 (43)
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} Q_{diseño} = c_1 \cdot b_1 \cdot h_1 \\ (43) \end{array}} \right\}
 \begin{array}{l}
 c_1 \cdot h_1 = c_2 \cdot h_2 \\
 (44)
 \end{array}$$

El resultado es que la altura inicial para un caudal de diseño $Q_{diseño}$ (Ec.46).

$$h_{in} = h_1 - w = h_2 + \frac{1}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{Q_{diseño}}{h_2 \cdot b_2} \right)^2 \cdot \left[1 + \zeta - \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 \right]$$

(46)

El único término desconocido de la Ec.46 es el factor de pérdidas hidráulicas ζ . Su valor puede ser estimado aplicando Borda-Carnot con la pérdida de altura que sufre el flujo cuando el agua entra del Plano 2, como un canal rectangular, al Plano 3, a la entrada circular inclinada del tornillo (Fig. 43). Dicha relación de Borda- Carnot se puede escribir como la Ec.47 (MSc Charisiadis C., 2015).

$$\zeta = \left(\frac{A_3}{A_2 - 1} \right)^2$$

(47)

En la Ec.47 se utilizan las definiciones de las áreas A_3 y A_2 . A_3 tiene un valor conocido, obtenido en la Ec.39 y A_2 se define como la Ec.48.

$$A_2 = k \cdot R_0 \cdot b_2 \cdot \cos \theta$$

(48)

Resolviendo la Ec.47, se calcula el valor de la altura inicial h_{in} con la Ec.46 y se puede despejar el valor de w . w es un parámetro que se refiere a la obra civil de la turbina, se muestra a qué se refiere en la Fig.44.

7.2.4. Limitaciones por el generador

Generalmente, tras realizar los cálculos de la geometría del tornillo de Arquímedes que se han desarrollado hasta este punto, procedería escoger un generador apropiado para los resultados obtenidos. Como se explicará en el Apartado 9, en este trabajo se emplea un alternador de coche como generador de la instalación por ser accesibles en el terreno y a menor precio que los generadores diseñados para estos fines.

En este trabajo, las características del alternador son restricciones para el diseño y se deben tener en cuenta.

7.2.4.1. Limitación de la velocidad de rotación

Según aumenta la velocidad de rotación a la que gira el rotor del alternador, aumenta la corriente y por tanto la potencia que genera. Como se muestra en la Fig.46, existen curvas empíricas que relacionan estas magnitudes.

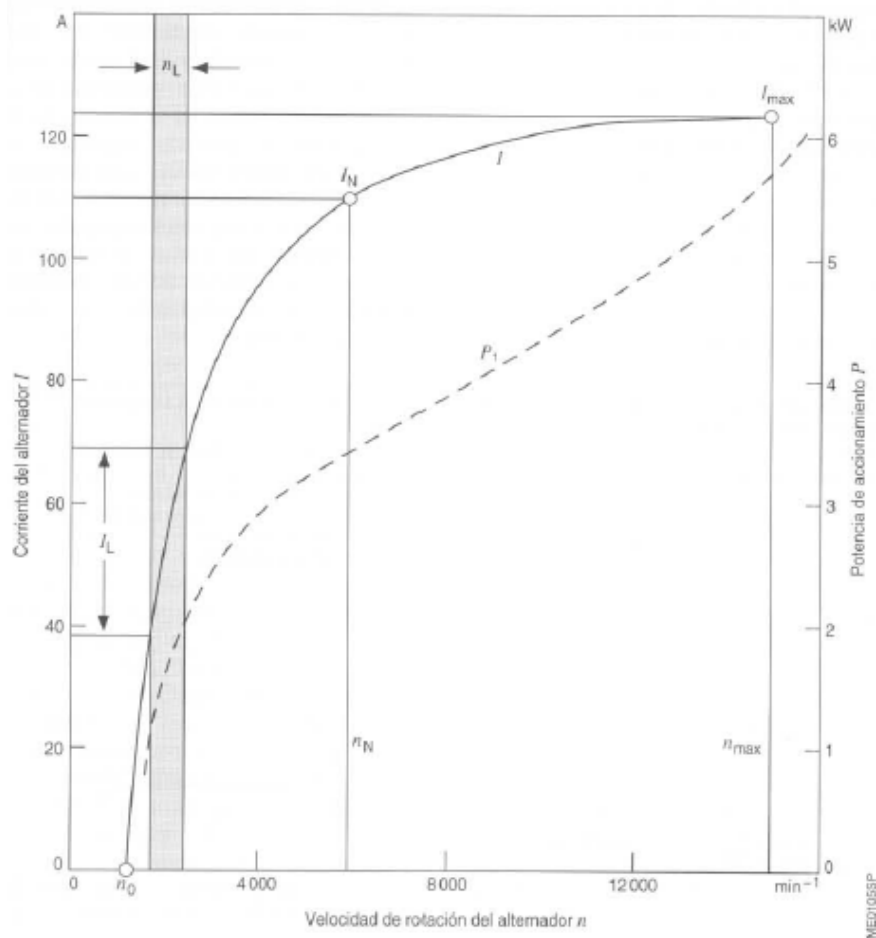


Figura 46: Curva de velocidad del alternador frente a la corriente y a la potencia (Bürger K.G. Dr. Ing., 2000).

Como se ha calculado en la Ec.28, la velocidad de rotación de la turbina es inversamente proporcional al radio exterior. Para un radio exterior de 0.3m la velocidad de rotación es 70 r.p.m. Es un ejemplo que muestra el orden de magnitud de la velocidad de rotación de la turbina. En las curvas experimentales como la de la Fig. 46, no se especifican los valores mínimos a los que el alternador genera energía. Se consultaron varios expertos para conocer a qué velocidad mínima el alternador es capaz de funcionar de forma eficiente y qué potencia genera. Se ha determinado que la velocidad de rotación mínima a la que el alternador produce potencia es 1000 r.p.m. y produce aproximadamente 1.8 kW.

Para conseguir que el rotor del alternador gire a 1000 r.p.m. se ha diseñado un mecanismo de transmisión de dos ruedas y una correa. Se ha decidido prescindir de un sistema de engranajes por la complicación que su fabricación conlleva. La relación que se debe cumplir queda reflejada en la Ec.49.

$$R_{turbina} = \frac{\omega_{alternador}}{n} \cdot R_{alternador} \quad (49)$$

Siendo: $R_{turbina}$: Radio de la rueda que se acoplaría al eje de giro de la turbina.

$\omega_{alternador}$: Velocidad de rotación mínima del alternador. $\omega_{alternador} = 1000 \text{ r.p.m.}$

n : Velocidad de rotación de la turbina.

$R_{alternador}$: Radio del alternador para poder acoplar la correa directamente a su eje sin necesidad de fabricar una segunda rueda de transmisión. Su valor medido directamente es de $R_{alternador} = 0.03 \text{ m.}$

7.2.4.2. Limitación de potencia

Los alternadores de coche convencionales suelen tener 12V de tensión y la corriente de los alternadores puede variar desde los 70A hasta los 180A. La Fig.47 es un fragmento del catálogo de alternadores de Bosch de 2015 para algunos modelos de marcas de coche (Bosch, 2015).

	Marca / Motor	Voltaje	Amperes	AÑO De Hasta	Alternador	Regulador	Rectificador	Rotor	Estator	Rodamiento Rígido de Bola	Notas
A	A5 2.0 TFSI Coupe	12	140 A	2008 2013	0124525226	F00M144197	F00M133259				
	A5 2.0 TFSI Sportback	12	140 A	2009	0124525226	F00M144197	F00M133259				
	A5 3.0 TFSI Coupe quattro	12	150 A	2014 2015	0125711124	0272220807					Sólo como reemplazo de equipo Bosch
	A5 3.0 TFSI Sportback quattro	12	150 A	2014 2015	0125711124	0272220807					Sólo como reemplazo de equipo Bosch
	A6 2.8 FSI	12	180 A	2006 2008	0121715122	F00M346138					
	A6 2.8 FSI	12	180 A	2008 2009	0121715150	F00M346139					
	A6 2.8 FSI	12	180 A	2009 2011	0121715178						
	A6 2.8 FSI	12	180 A	2009 2011	0121715178						
	A6 2.8 FSI Avant	12	180 A	2009 2011	0121715178						
	A6 2.8 FSI Avant	12	180 A	2009 2011	0121715178						
	A6 3.0 TFSI quattro	12	180 A	2009	0121715150	F00M346139					
	A6 3.0 TFSI quattro	12	180 A	2009	0121715178						
	A6 3.2 FSI	12	180 A	2008	0121715150	F00M346139					
	A6 3.2 FSI quattro	12	180 A	2005 2008	0121715122	F00M346138					
	Q3 2.0 TDI quattro	12	140 A	2011 2015	0124525542	F00M144197	F00M133259				
	Q5 2.0 TFSI quattro	12	140 A	2008 2012	0124525226	F00M144197	F00M133259				
	Q5 2.0 TFSI quattro	12	150 A	2012 2015	0125711044						Sólo como reemplazo de equipo Bosch
	Q5 3.0 TDI quattro	12	150 A	2014 2015	0125711149	0272220807					Sólo como reemplazo de equipo Bosch
	Q5 3.0 TFSI quattro	12	150 A	2014	0125711124	0272220807					
	Q7 3.0 TDI	12	180 A	2008 2008	0121715151	F00M346139					Sólo como reemplazo de equipo Bosch
S3 1.8 quattro	12	90 A	2001 2003	0124325003	F00M445303	F00M123244					
S3 2.0 TFSI quattro	12	140 A	2008 2013	0124525525	F00M445300	F00M133259		F00M130147			
S3 2.0 TFSI quattro	12	140 A	2008 2013	0124525525	F00M445300	F00M133259		F00M130147			
S4 3.0 TFSI quattro	12	140 A	2009 2010	0124525226	F00M144197	F00M133259					
S4 3.0 TFSI quattro	12	150 A	2014 2015	0125711124	0272220807					Sólo como reemplazo de equipo Bosch	

Figura 47: Muestra del catálogo de alternadores de coche Bosch (Bosch, 2015).

Teniendo en cuenta la limitación de velocidad de rotación del alternador, la potencia máxima que produce el alternador se encuentra en los 1.8 kW. Para que el alternador sea efectivo como generador en la instalación, se diseña la turbina teniendo en cuenta que no supere los 1.8 kW. La potencia se calcula a partir de la Ec.1 y se compara en el programa de Microsoft Excel del Anexo 2 con el valor de 1.8 kW asegurándose de que no se supera.

7.3. RESULTADO DE DISEÑO

En la Tabla 13 se muestran los valores finales del diseño de la turbina para el azud de Nikki. Estos parámetros se han obtenido utilizando el programa de Microsoft Excel del Anexo 2.

En primer lugar, a pesar de disponer de 4m de salto, se aprovechan 1.5m. Como la longitud total del tornillo está directamente relacionada con el salto (Ec.25), para evitar una magnitud con la que sea complicado trabajar, se sacrifican metros de salto. El resultado es una longitud total de $L=4.39\text{m}$.

De la misma manera, se escoge un diámetro exterior de $D_o = 0.55\text{m}$, porque permite utilizar un caudal de diseño menor al disponible y es un valor práctico para que el tornillo sea manejable, logrando aun así más de 1 kW de potencia.

Por último, el número de alabes escogido es de $N=2$, como ya se ha explicado en el capítulo 7.2.1. Cuanto mayor número de álabes forman el tornillo, más compleja se vuelve su fabricación, pero la diferencia de generación de potencia que se obtiene al utilizar 2 álabes en lugar de 1 es muy notable y permite que las dimensiones de la turbina sean menores y por tanto, más prácticas.

Es importante resaltar que todas las decisiones que se toman para el diseño de la turbina se interrelacionan y afectan al resto de parámetros. Es por ello, por lo que la utilización del programa del Anexo 2 es sustancialmente útil, porque permite conocer los efectos de cambiar los valores de forma instantánea.

Tabla 13: Diseño óptimo final de la turbina de tornillo de Arquímedes

	Denominación	Magnitud	Valor
Datos del emplazamiento	Altura neta máxima	$H_{\text{neta máx}} \text{ (m)}$	4
	Caudal de diseño máximo	$Q_{\text{máx diseño}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$	0.13
Parámetros adimensionales a partir del número de álabes	Número de álabes	N	2
	Proporción de radios óptima	$\rho *$	0.5369
	Proporción del paso óptima	$\lambda *$	0.1863
	Proporción de volumen por vuelta óptimo	$\lambda * \nu$	0.0512
	Proporción de volumen óptimo	ν	0.2747
Valores de los radios y diámetros	Diámetro exterior	$D_o \text{ (m)}$	0.550
	Radio exterior	$R_o \text{ (m)}$	0.275
	Radio interior	$R_i \text{ (m)}$	0.148
	Diámetro interior	$D_i \text{ (m)}$	0.295
Pendiente	Ángulo de inclinación	$\theta (^{\circ})$	20
	Pendiente	$K = \tan(\theta)$	0.364
Paso	Paso	$\tau \text{ (m)}$	0.884
Caudal útil	Velocidad de rotación	$n \text{ (r.p.m.)}$	74.484
	Caudal de generación de rotación	$Q_w \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$	0.072
	Caudal de generación de rotación	$Q_w \left(\frac{1}{\text{s}} \right)$	76.64
	Volumen por vuelta	$V_u \text{ (m}^3\text{)}$	0.06
Caudal de diseño	Máxima holgura	$s_{SP} \text{ (m)}$	0.00334
	Diferencia de altura entre cubos	δh	0.15125
	Ángulo de la corriente de pérdidas	α_3	0.61087
	Ángulo de la corriente de pérdidas	α_4	2.02458

	Ángulo de la corriente de pérdidas	α_5	0.45379
	Caudal de fugas por holgura	$Q_G \left(\frac{m^3}{s} \right)$	0.00495
	Caudal de diseño	$Q_{diseño} \left(\frac{m^3}{s} \right)$	0.07664
Potencia producida	Salto	Salto (m)	1.5
	Potencia	$W_{turbina} (W)$	1051.71
Parámetros para el cálculo de h_{in}	Velocidad de transporte axial	$C_{ax} \left(\frac{m}{s} \right)$	1.09792
	Volumen adimensional total	v_t	0.29
	Área promedio	$A_3 (m^2)$	0.0698
	Parámetro adimensional de la altura	k	0.75
Aplicación de la Ec. Bernouilli para el cálculo de h_{in} y w	Altura auxiliar	$h_3 (m)$	0.206
	Altura auxiliar	$h_2 (m)$	0.194
	Altura auxiliar	$h_1 (m)$	0.275
	Anchura del canal en Plano 1	$b_1 (m)$	0.550
	Anchura del canal en Plano 2	$b_2 (m)$	0.550
	Área promedio	$A_2 (m^2)$	0.05173
	Factor de pérdidas hidráulicas	ζ	0.00542
	Altura inicial	$h_{in} (m)$	0.21
	Escalón obra civil	$w (m)$	0.07
Ángulos de inclinación de los álabes	Ángulo álabe con circunferencia exterior	$\alpha (^{\circ})$	62.89
	Ángulo álabe con circunferencia interior	$\beta (^{\circ})$	46.37
Longitud total del tornillo	Longitud total del tornillo	$L (m)$	4.39
Radios de las ruedas de transmisión	Radio rueda alternador	$R_{alternador} (m)$	0.03
	Radio rueda turbina	$R_{turbina} (m)$	0.40

8. PREDISEÑO DE LA CENTRAL

8.1. OBRA CIVIL

En este proyecto solo se indica una noción de obra civil a llevar a cabo para la instalación de la central.

El azud de Nikki es uno de los únicos puntos de agua de la comuna junto con los pozos. Es por ello, por lo que se utiliza para diversos fines por parte de su comunidad. El embalse es utilizado por corporativas de agricultores, como, por ejemplo, por la cooperativa Gah Maro, que utiliza sus aguas para el riego a través de bombeo (Fig.48).



Figura 48: Fotografías de los cultivos de la cooperativa Gah Maro

También se realizan cultivos de piscifactoría en las aguas del embalse, concretamente de la especie tilapia. Además, es un punto de bebida para el ganado y a nivel doméstico, la comunidad lava su ropa en el azud, se bañan y toman agua de consumo personal y doméstico.

Se han barajado tres opciones como emplazamiento de la turbina en el azud de Nikki:

- La primera opción consiste en realizar la obra civil en el dique de tierras que se encuentra en la margen izquierda del azud. Se ha decidido descartar esta solución por ser mucho más compleja, ya que sería necesario realizar una obra completa desde los movimientos de tierras. Además, el contacto de tierra con hormigón es susceptible de provocar fallas si no se trata debidamente y con los materiales precisos.

- La segunda opción, se basa en el aprovechamiento del azud que ya está construido realizando rebajes en los labios del murete y del inicio del dique inclinado.

Instalar la turbina de Tornillo de Arquímedes aprovechando la construcción ya existente del azud, evitaría desviar agua de él, lo cual es importante debido a la cantidad de usos que se le da.

Con este diseño de instalación en el azud, se aprovecha que ya una zona del dique del aliviadero se encuentra demolida o dañada, lo que conlleva un ahorro en demolición y a su vez, se puede aprovechar la intervención para reparar dicha zona. En la fotografía de la Fig.49, se ilustra lo descrito. Se le aportaría relleno de material construyendo la cama o zapata corrida de hormigón que sirve de apoyo a la caja que aloja el tornillo de Arquímedes.



Figura 49: Fotografía del aliviadero del azud

La forma de instalar la turbina partiría de demoler parte del labio del murete del aliviadero que se muestra en la Fig.50, con una dimensión de aproximadamente 0.65m en horizontal y de 1.10m en vertical. En ese recorte, se encajaría el cajón de sección rectangular que conduciría el caudal, hasta el inicio del tornillo de Arquímedes, cuyo diámetro exterior es de 0.55m. En un primer tramo, el cajón conduciría al caudal en horizontal, en llano, que corresponde con el primer tramo del azud que muestra la Fig.50.

Sería necesario instalar una rejilla al inicio del cajón en el contacto con la pared del embalse, que retuviera todo tipo de plantas, algas y otros flotantes.



Figura 50: Fotografía del murete del aliviadero que se necesitaría demoler parcialmente.

Para favorecer el funcionamiento de la turbina, se construye una continuación del cajón guía en el dique del aliviadero. La Fig. 51 es un esquema de mediciones en metros sobre una fotografía del azud. La altura del dique del aliviadero es de aproximadamente 3m y la altura del tornillo de Arquímedes es de 1.5m. De esta manera, el agua llega con algo más de velocidad gracias a la caída de 1.5m de altura y 20° de inclinación antes de entrar en el tornillo. La intención es de instalar el tornillo lo más inferior posible, haciéndolo que apoye en su parte más baja, inmediatamente antes de los dientes del final del aliviadero. El plano inclinado tiene una longitud de 10m aproximadamente (Fig.51), incluyendo los dientes. El tornillo tiene una longitud total de 4.4m. Evitando los dientes, se dispondría aproximadamente de 4m de dique inclinado donde se encajaría la continuación del cajón que conduciría el agua desde el tramo horizontal. Con la Fig.52 se ilustra esta primera solución.

El azud, presenta un segundo labio que se encuentra en el inicio inclinado del dique, y se puede observar en la Fig.51. Al igual que al labio del murete, se le demolería una parte, de longitud horizontal igual a la de toda la caja, 0.65m. Este labio es de sección cuadrada de 0.3m de lado.



Figura 51: Esquema de medidas en metros del azud de Nikki.



Figura 52: Esquema ilustrativo de la segunda solución planteada.

- La tercera solución considerada, también parte del aprovechamiento del azud construido y se ilustra con el esquema de la Fig.53. La diferencia con la segunda solución recae en que, en lugar de llevar a cabo unas pequeñas demoliciones de los dos labios, se levantaría ligeramente el murete primero del dique (Fig.50).

El emplazamiento del tornillo consistiría en apoyar en el murete ya existente del labio de vertido, el cajón. Ese punto sería el de mayor altura del tornillo y se colocaría inclinado hasta apoyar con el tramo horizontal del azud, que se observa en la Fig.54. Para conseguir esta configuración, se necesitaría levantar el murete existente en la actualidad, aproximadamente 0.5m.

Esta posibilidad tendría como ventaja trabajar en la zona llana en lugar de en la zona inclinada y no necesitaría llevarse a cabo la operación de demolición.

Esta solución se descarta porque al levantar el murete, le quitamos al embalse un poco de resguardo y por tanto de seguridad.

El azud de estudio tiene construido el aliviadero de mortero, de material pétreo. Sin embargo, el resto del dique es de materiales sueltos. Para evitar el sobre vertido, en caso de avenida extrema, se descarta esta solución.



Figura 53: Esquema ilustrativo de la tercera solución planteada.



Figura 54: Fotografía del tramo horizontal del azud.

Para cualquiera de las dos propuestas que conllevan el aprovechamiento de la construcción del azud, por seguridad, debido a la concentración de gente que se reúne en el azud, la carcasa de la turbina estará cerrada por la zona superior, siendo un cilindro completo.

Como conclusión, la obra civil propuesta es la representada en la Fig.52 y la explicada como segunda opción. Partiendo del esquema de la Fig.52, se propone la instalación de una tubería que abrace la superficie del azud hasta llegar a la entrada del tornillo de Arquímedes. Dicha tubería contaría con dos válvulas, una al inicio y otra en la desembocadura y ejercería el efecto pistón, permitiendo que la turbina funcionara durante todo el año. En lugar de una rejilla, sería necesaria una malla que únicamente dejara pasar el agua.

En las Ec.50, se hace un primer cálculo del valor del diámetro necesario para la tubería, para el caudal de diseño de la turbina de $Q = 0.13 \frac{m^3}{s}$.

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h$$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 1.1} = 4.65 \frac{m}{s}$$

$$Q = \frac{v \cdot \pi \cdot d^2}{4} \rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{v \cdot \pi}} \cong 0.2m$$

(50)

Por último, se ha pensado que, para evitar fallos en caso de subidas altas del embalse en época de lluvias, el tornillo se elevaría a través de unas patas, para permitir al caudal excedente, fluir por debajo de él. El tornillo no tendría problemas por estar hundido, sin embargo, el alternador se elevaría con respecto a la carcasa por medio de un soporte, para evitar su contacto con agua.

8.2. INSTALACIÓN ELÉCTRICA

El sistema eléctrico de generación de una picocentral hidráulica consiste en cuatro elementos principales: un generador, un controlador eléctrico, un sistema de distribución y una carga eléctrica.

El par de rotación del rotor de la turbina hace girar el eje que a su vez provoca la rotación en el generador, directamente o mediante una transmisión mecánica. El generador transforma la energía mecánica en energía eléctrica. En instalaciones de micro o picocentrales, los generadores más utilizados son los motores de inducción y los generadores de imanes permanentes. La corriente eléctrica de salida suele ser monofásica de corriente alterna (AC).
(Patrick Ho-Yan B., 2012).

8.2.1. Alternador de coche como generador

El generador eléctrico en una turbina hidráulica es el dispositivo fundamental del sistema porque es la máquina que se ocupa de transformar la energía mecánica del giro del tornillo de Arquímedes en energía eléctrica. Como este proyecto tiene como objetivo la construcción de una turbina en la comuna de Nikki, se quiere evitar el elevado coste de la instalación y la dependencia con países extranjeros por la importación de elementos. Como posible solución, se plantea el uso de alternadores de vehículos, que se puedan encontrar en los desguaces de la comuna como generadores de la turbina, en concreto, alternadores de coche (Segura Rodríguez I., 2016).

El alternador es el dispositivo del circuito eléctrico de los automóviles que lo abastecen de energía eléctrica. Durante el funcionamiento del vehículo, el alternador carga su batería y abastece a los sistemas eléctricos que lo necesiten. Las partes del alternador se indican en la Fig.55 y se explican a continuación:

- Polea. El motor térmico de combustión produce una fuerza mecánica que origina el movimiento de la polea valiéndose de una correa. La polea y el eje del alternador se encuentran conectados y de esta manera, la polea se ocupa de hacer girar el rotor del interior del alternador. En los dispositivos más modernos, la polea también hace rotar al ventilador que se encuentra en el interior del alternador (Álvarez S., 2020).
- Rotor. Es el inductor, la parte giratoria del alternador. Está integrado por un electroimán al que llega corriente proveniente del regulador y por medio de unos anillos rozantes que se sitúan en el eje. El electroimán

provoca un campo magnético que hace que las bobinas del estátor produzcan corriente eléctrica (Mateos Aparicio J., 2020).

- Estátor: Es el inducido, la parte fija del alternador. Sobre el estátor está el bobinado trifásico que puede estar establecido en triángulo o en estrella.
- Regulador: Se ocupa de mantener en 14.5 V la tensión máxima de salida del alternador y de regular la cantidad de corriente que demanda la batería.
- Puente rectificador de diodos: Transforma la corriente alterna producida en el estátor en corriente continua (Jiménez J., 2020).

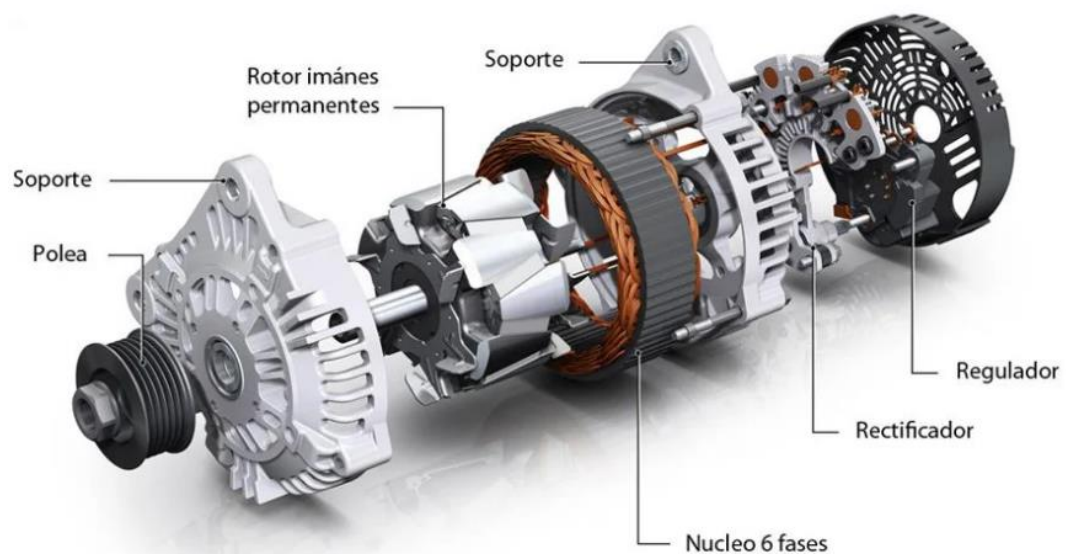


Figura 55: Partes de un alternador de coche (Aranguren A., 2017).

Al arrancar un automóvil, la batería manda corriente eléctrica a la bobina del rotor del alternador. Cuando el motor es arrancado el rotor empieza a girar y el alternador comienza a producir energía. Posteriormente, el motor ya estará en funcionamiento y entonces, el regulador se alimenta de la energía que el propio alternador produce (Aranguren A., 2017).

8.2.1.1. Principales fallos de alternador de coche

En Benín se pueden comprar alternadores de coche en tienda sin utilizar, pero son menos costosos económicamente y contribuyen a la economía circular y al desperdicio cero de la corriente Lean, el uso de alternadores desechados de desguace, provenientes de coches inutilizables. A continuación, se describen los principales fallos que puede sufrir un alternador debidos al deterioro de algunos de sus elementos. Algunos de ellos son fácilmente reparables y compensaría su uso como generador de la turbina.

- Uno de los fallos más frecuente es el de las escobillas. Las escobillas están permanentemente rozando con las partes móviles del alternador, por lo que es habitual su desgaste. Se comprueba el fallo al medir con un amperímetro y obtener saltos extraños. La solución más sencilla es su reemplazo, ya que son piezas baratas.
- Otro fallo que se puede dar es el de los diodos del rectificador. Los diodos del puente rectificador dejan de funcionar por el paso del tiempo. La consecuencia es que no dejan pasar la energía suficiente para solventar las necesidades eléctricas del automóvil y conservar la batería cargada. Con un multímetro se puede comprobar si poseen la resistencia necesaria. Si la potencia que transportan es superior a 1.5 kW, el alternador sería útil como generador de la turbina, sin necesidad de reparación.
- Si el problema se encuentra en el rotor, habrá unos niveles de tensión muy bajos o nulos. Este alternador, no resulta factible como generador para una turbina, y su reparación no sería provechosa.
- Si el fallo es provocado por el regulador de voltaje, la causa más probable es que se haya quemado como consecuencia del uso. La reparación consistiría en su sustitución y una posterior comprobación de que el alternador funciona con normalidad (Jiménez J., 2020).

8.2.2. Controlador eléctrico

Los controladores de carga electrónicos se utilizan como frenos eléctricos para regular la velocidad de rotación de la turbina al desviar la energía a los receptores de descarga conectados. Los receptores de descarga, que generalmente son grandes elementos resistivos, se utilizan para disipar los excesos de energía eléctrica. El uso de los controladores de carga electrónicos permite que se pueda prescindir de sistemas mecánicos de control de flujo, que suelen ser más costosos económicamente y menos fiables. Controladores electrónicos más sofisticados, pueden a mayores, realizar un mayor



acondicionamiento de la energía para garantizar valores constantes de voltaje y de corriente antes de su uso. Pueden regular, amplificar, convertir, y homogeneizar la señal eléctrica que sale del generador, reduciendo el riesgo de daños en dispositivos eléctricos o lesiones personales. La electricidad se distribuye a las cargas mediante cables. (Patrick Ho-Yan B., 2012).

8.2.3. Sistema de distribución y carga

Se plantean tres alternativas de sistemas de distribución. En este trabajo se presentan con la intención de que futuros estudios profundicen en cada uno de ellos.

- Inyección a la red eléctrica. En Benín se cuenta con una red eléctrica que suministra los hogares del país. Sin embargo, no llega a todos los lugares de su geografía. Afortunadamente, en la comuna de Nikki, sí se dispone de las líneas de distribución de la red eléctrica. Funcionan, al igual que las europeas, a 50Hz y 220V.

El alternador produce la energía a 12V y en corriente continua, por lo que se necesitaría un inversor de conexión a red de 12V. Los inversores más económicos para estos rangos de valores son los de instalaciones solares. Se podría adquirir directamente en Nikki o en ciudades cercanas porque los recursos solares y sus elementos, están bastante extendidos en Benín y los países colindantes.

El alternador necesita de una corriente de entrada para comenzar su funcionamiento, es por ello por lo que se necesitaría a mayores, una batería de 12V que ejercería de buffer y mantendría la estabilidad del equipo. Las baterías funcionan en corriente continua, por lo que se conectaría la batería con el alternador de forma directa y viceversa. El alternador sería el encargado de cargar la batería con la energía que produjera antes de suministrar a los hogares a través de la red eléctrica. Esta opción no se considera la más apropiada por no ser independiente. Si se utiliza la red estatal, se contribuiría a que la energía utilizada por los hogares que disfrutaran de conexión a red, fuera más limpia a nivel ambiental. Sin embargo, los hogares que se encuentran actualmente aislados, en Nikki y en otros lugares rurales, se mantendrían del mismo modo. Por ser este trabajo un prototipo para otras zonas rurales en vías



de desarrollo, esta solución no está alineada con los objetivos perseguidos.

- Utilización de baterías. El uso prioritario de la potencia generada con la turbina diseñada es el de la iluminación de las vías públicas, de los caminos y de los hogares durante la noche. El valor de la potencia generada es de 1051 W. Utilizando bombillas LED de bajo consumo (10W aprox.), que son accesibles en Nikki, se pueden alimentar alrededor de 100 bombillas, teniendo en cuenta que se producirán pérdidas. El alternador podría alimentar baterías durante el día, y a la caída del sol, esas baterías se podrían trasladar a los lugares estratégicos de la comuna para conectarlas con las luminarias de la zona.

Con esta alternativa se ahorra el inversor y la instalación de una red de cableado desde la central hidráulica. Se consiguen los propósitos del trabajo, pero requiere la adquisición de baterías y el trabajo de ciudadanos encargados de transportar y conectar las baterías dos veces al día.

- Instalación de una red eléctrica propia. Esta es la solución técnicamente más compleja, pero con resultados más efectivos. La central del azud de Nikki se convertiría en un generador de electricidad con todos sus elementos de control y seguridad. A mayores de la batería buffer que permite comenzar a producir al alternador, se necesitaría el controlador eléctrico, un inversor de aislada de fotovoltaica (por su accesibilidad y precio), entre otros elementos que se deberían estudiar con detenimiento. El cableado habría que instalarlo desde la central hasta los puntos de carga escogidos. Se necesitaría realizar un estudio de pérdidas de potencia por el transporte teniendo en cuenta las distancias, para así escoger si se transporta en corriente continua o en corriente alterna.

9. MODELADO POR ORDENADOR

Inicialmente, la propuesta era de utilizar las impresoras 3D que se encuentran en Cotonou, cerca de Nikki, que fueron adquiridas por OAN International y están disponibles para la fabricación de la turbina diseñada.

A continuación, se muestra el proceso de diseño por ordenador del tornillo de Arquímedes diseñado para el azud de Nikki, para la fabricación por impresión 3D. Se ha utilizado el software CAD para modelado 2D y 3D SolidWorks.

El procedimiento de modelado se ha llevado a cabo en dos partes, en la primera, se modela un paso del tornillo de Arquímedes con los parámetros calculados anteriormente en este trabajo. En la segunda parte se diseña el sistema modular con el cual se pretende estandarizar la fabricación del tornillo de Arquímedes.

9.1. MODELADO DE UN PASO

Para el modelado del tornillo se empieza por el croquis del eje interno, el cual tiene un diámetro de 295mm, como se muestra en la Fig.56. Para restringir completamente el croquis, se fija el centro de la circunferencia.

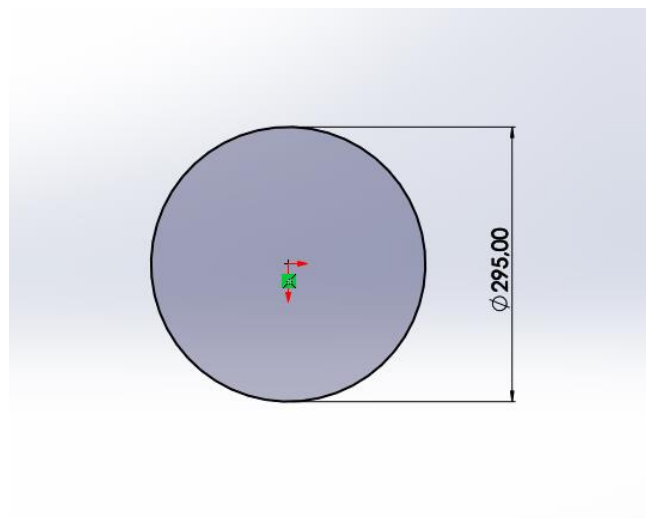


Figura 56: Croquis eje interior (Di)

A continuación, se extruye el eje, en este caso mide 884mm ya que el tornillo es modular y se está modelando uno de los cinco módulos que lo forman. Cada módulo corresponde a un paso del helicoidal que forman los álabes (Fig.57).

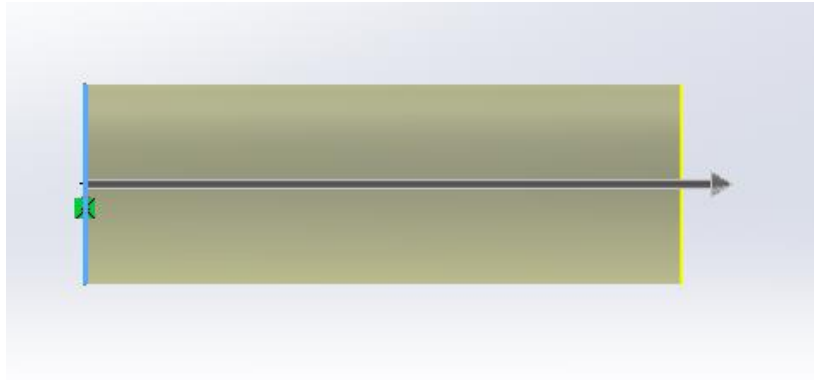


Figura 57: Extrusión eje interior

Una vez extruido el eje interior del tornillo, se crea un croquis que representará el diámetro exterior, D_0 , de 550mm, como se indica en la Fig.58.

Este croquis será utilizado posteriormente para anclar el croquis del perfil de los álabes, ayudando así a modificar el diseño en caso de necesitar un tornillo de Arquímedes de diferentes dimensiones en un futuro.

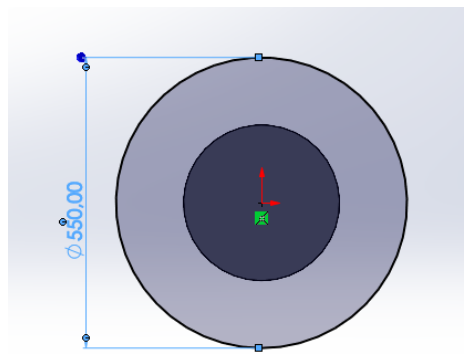


Figura 58: Croquis diámetro exterior (D_0)

Una vez modelado el eje interior del tornillo de Arquímedes y creado la referencia del diámetro exterior, se comienza a modelar los álabes. Lo primero que hay que modelar son los croquis de los helicoidales, los cuales serán base de los álabes.

En la Fig.59 y en la Fig.62 se muestran los croquis de los helicoidales, los cuales están anclados al croquis del eje interno. Tienen una longitud igual a la del eje interno (884mm) y un paso de 884mm por lo que tienen una única revolución.

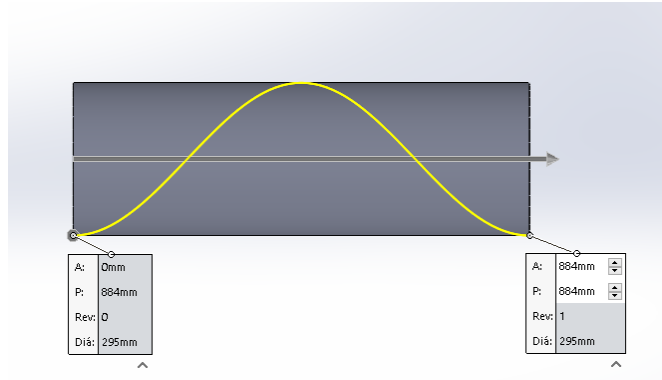


Figura 59: Croquis del helicoidal 1

Una vez modelados los helicoidales, se crea un nuevo croquis, (Fig.60 y Fig.63) el cual está anclado en su parte inferior al eje interno y en su parte superior al croquis del diámetro externo y con un ancho de 20mm.

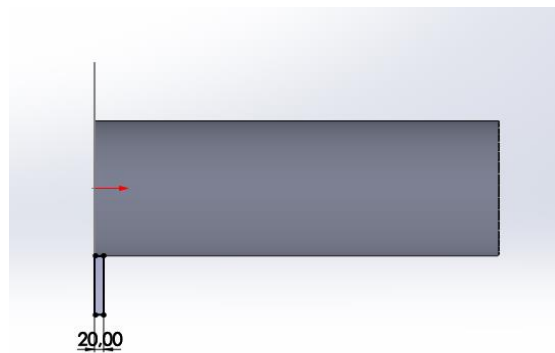


Figura 60: Croquis perfil del álabe

En la Fig.61 y 64, se observan los dos álabes ya modelados con un desfase de 180°.

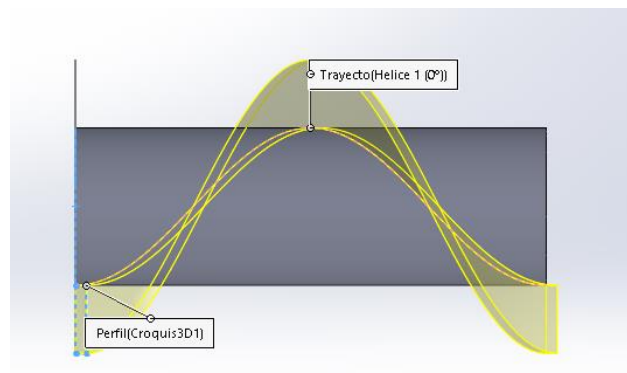


Figura 61: Extrusión álabe 1

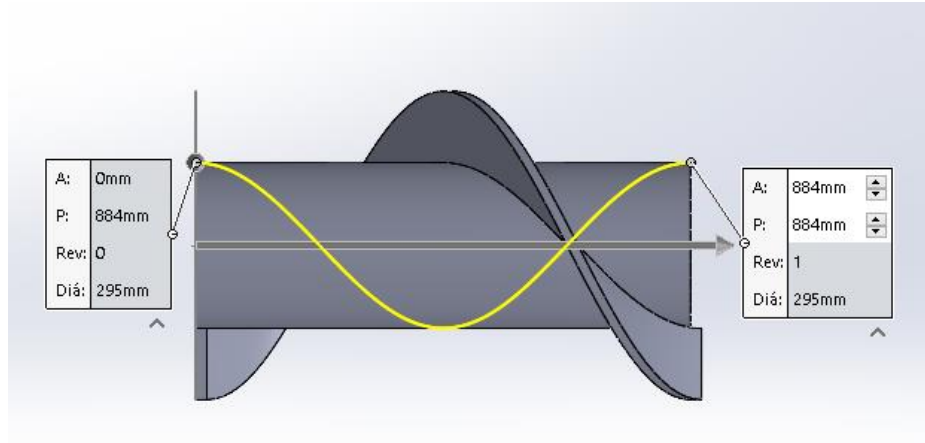


Figura 62 : Croquis helicoidal 2, desfasado 180° respecto al helicoidal 1

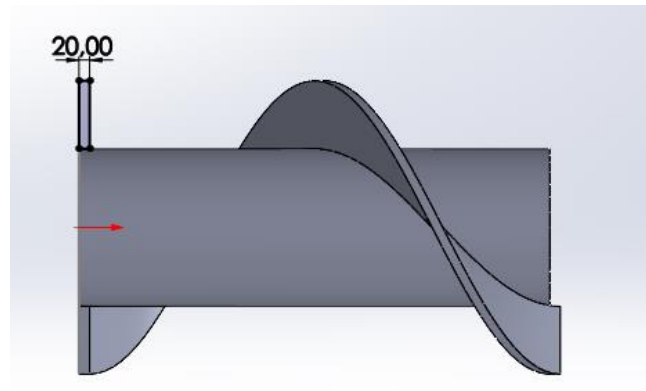


Figura 63: Croquis álabo 2

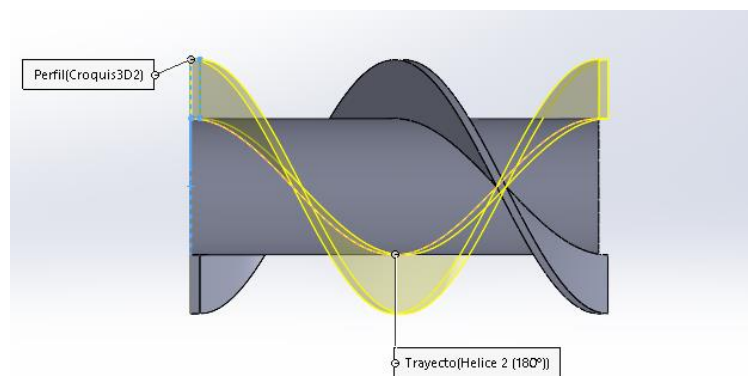


Figura 64: Extrusión álabo 2

9.2. DISEÑO DEL ACOPLAMIENTO MODULAR

Hasta este punto se ha modelado completamente un paso del tornillo de Arquímedes. Partiendo de dicho modelo, se diseña el acoplamiento modular.

El diseño modular se desarrolla para estandarizar la fabricación de un único paso del tornillo, además de lograr así una mayor facilidad tanto en la fabricación como en el transporte.

Después de valorar diferentes opciones, se decide que la más factible es realizar un sistema agujero-eje-pasador, debido a las tolerancias asociadas a los pasadores, que son más fácilmente asequibles que las de las chavetas, generalmente utilizadas para la transmisión de movimiento. Los extremos del tornillo se encontrarán apoyados, por lo que los pasadores únicamente mantienen unidos los módulos y transmiten el movimiento.

El sistema consiste en un eje de 80mm en un extremo del módulo y un agujero en el otro con un pequeño pasante en ambos para evitar el movimiento relativo con un pasador.

En la Fig.65 se muestra el croquis del eje, situado en uno de los extremos del eje interno del tornillo de Arquímedes.

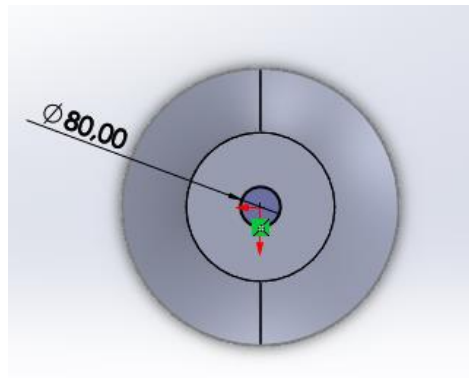


Figura 65: Croquis eje salida

A continuación, en la Fig.66 se muestra la extrusión del eje, la cual tiene una longitud de 200mm.

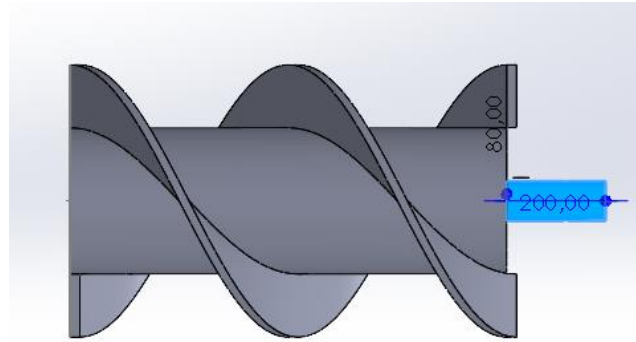


Figura 66: Extrusión eje salida

Este proceso realizado con el eje se repite para realizar un agujero en el otro extremo del mismo diámetro y de la misma longitud como se muestra en las Fig.67 y Fig.68.

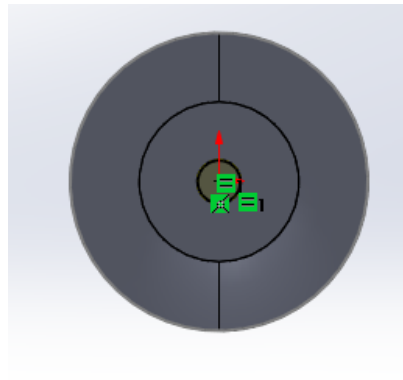


Figura 67: Croquis agujero salida

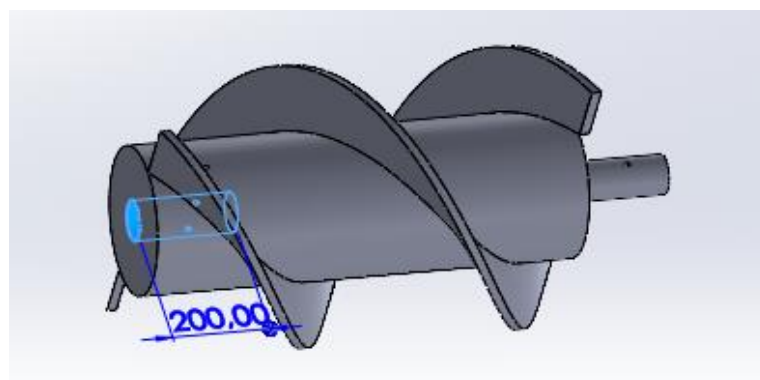


Figura 68: Corte agujero salida

En las Fig.69 y Fig.70 se muestran los croquis de los dos agujeros pasantes (uno en el macho y otro en la hembra) encargados de impedir el movimiento relativo entre un módulo y el siguiente.

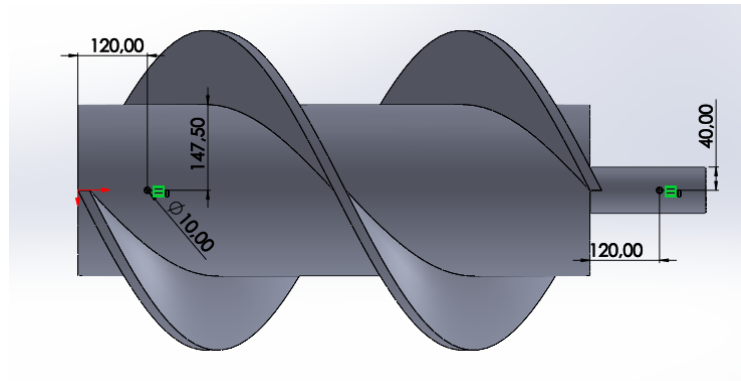


Figura 69: Croquis agujeros pasantes

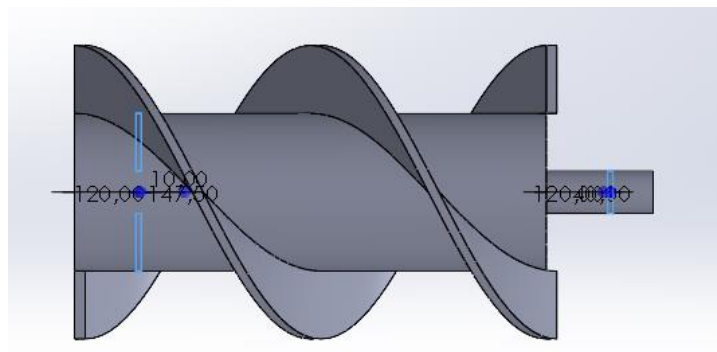


Figura 70: Corte agujeros pasantes

Por último, en la Fig. 71 se muestra una imagen del tornillo de Arquímedes modular final.

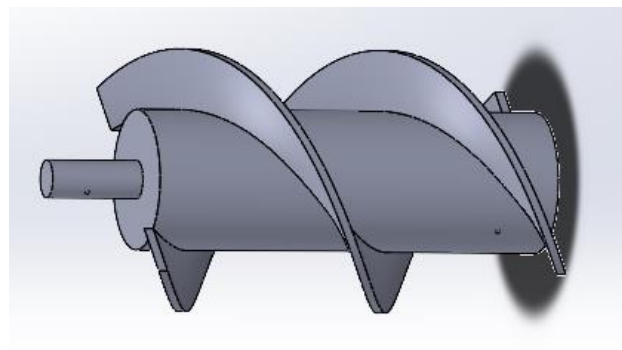


Figura 71: Modelo para impresión 3D

Sin embargo, debido a las dimensiones del tornillo de Arquímedes, la resistencia que se le busca y las dificultades encontradas en utilizar la impresión 3D para realizar un prototipo a escala, se decide utilizar soldadura para la fabricación.

Partiendo de un eje hueco machihembrado, se soldarían los álabes a su alrededor. La soldadura es un proceso de fabricación habitualmente desarrollado en Benín, por lo que no supone una dificultad para sus trabajadores. Inicialmente, se planteó la utilización de acero inoxidable, pero debido a la dificultad de realizar soldadura con este material, ya que requiere equipos especiales, se propone la fabricación de hierro. Se pueden encontrar tubos machihembrados de hierro, a los que los álabes se soldarían, y al finalizar, se le aplicaría pintura antioxidante.

El modelo mostrado en la Fig.71, no es adecuado para la fabricación en hierro, debido al elevado peso derivado de un eje macizo. Por ello, se propone para la fabricación en hierro, el modelo de la Fig.72.

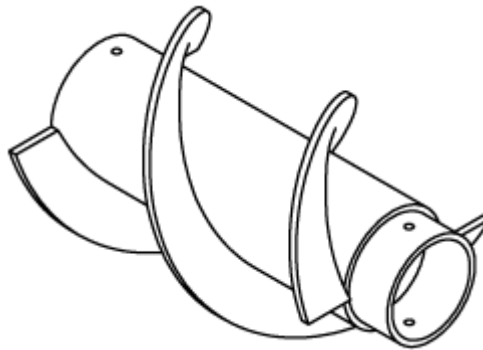


Figura 72: Modelo para fabricación en hierro

Las uniones entre módulos también se llevarían a cabo a partir de pasadores y, si fuera necesario, se contempla un reforzamiento utilizando puntos de soldadura.

10. PRESUPUESTO

10.1. COSTE DE MANO DE OBRA

Para la estimación de un presupuesto orientativo inicial, la mano de obra se ha calculado teniendo en cuenta las siguientes definiciones (*Departamento Presidencia del Gobierno., 1980*):

- Oficial de primera: “El que poseyendo conocimientos de algún oficio lo practica con tal grado de perfección que no sólo le permite llevar a cabo trabajos generales del mismo, si no aquellos otros que suponen especial empeño y delicadeza (*Departamento Presidencia del Gobierno., 1980*).
- Oficial de segunda: “El que sin llegar a la especialización exigida para los trabajos perfectos ejecuta los correspondientes a determinado oficio con la suficiente corrección y eficacia” (*Departamento Presidencia del Gobierno., 1980*).

Las Tabla 13 se ha elaborado en función de los precios indicados en el Boletín Oficial del Estado (*Departamento Presidencia del Gobierno., 1980*). Por otro lado, la Tabla 14, es una aproximación de los salarios de los empleados de Benín. Se ha tenido en cuenta que el promedio de los salarios es de una quinta parte con respecto a los de España.

Tabla 14: Salarios en España por categoría profesional

Salarios España		
Concepto	Of.1ª	Of.2ª
Salario base día	19,38	18,08
Plus día	24,67	23,00
Salario día	44,05	41,08
Salario hora	10,64	9,92

Tabla 15: Salarios en Benín por categoría profesional

Salarios Benín		
Concepto	Of.1ª	Of.2ª
Salario base día	3,88	3,62
Plus día	4,93	4,60
Salario día	8,81	8,22
Salario hora	2,13	1,98

La Tabla 15 refleja los salarios imputados por trabajo realizado en función de una estimación de horas trabajadas y de la categoría profesional a la que cada uno pertenece.

Cabe destacar, que la fabricación del tornillo de Arquímedes se realiza mediante puntos de soldadura que unen los álabes al eje.

En la Tabla 16, se muestra el coste de mano de obra directa.

Tabla 16: Mano de Obra Directa

Mano de Obra					
Concepto		Tipo de remuneración	Horas trabajadas	Salario hora (€/h)	Importe final (€)
Trabajo de ingeniería	Ingeniero	Es	300	20	6000
	Supervisor	Es	40	30	1200
	Trabajadores OAN	Es	20	20	400
Obra civil	Capataz Oficial de primera	Be	70	2,13	149,1
	2 técnicos Oficiales de segunda	Be	90	1,98x2	356.4
Soldadura	Soldador Oficial de primera	Be	100	1,98	198
Total (€)					8303.5

10.2. COSTE DE MATERIAL

La Tabla 17 representa una estimación de los precios de los materiales utilizados en la fabricación y ejecución del proyecto.

El hierro es el material empleado en la fabricación del tornillo de Arquímedes. A partir de las medidas reflejadas en el plano 4 (Anexo 3) del tornillo modular para soldadura, se ha calculado el volumen de un módulo de tornillo. Utilizando la densidad del hierro, se obtiene la masa necesaria para la fabricación de un módulo. El tornillo diseñado consta de cinco.

El precio del alternador de coche oscila en los comercios de Cotonou y de Nikki entre los 15000CFA y los 30000CFA, de 45€ a 90€. En la Tabla 17, se ha tomado el valor más probable.

La carcasa de la turbina es un cilindro completo, por seguridad, y como tal, se ha calculado su volumen, y su masa.

La cantidad de mortero necesaria estimada, se ha obtenido del cálculo del volumen necesario. Para ello, se ha tenido en cuenta un espesor de 4cm en cada cara de la caja. Ha sido estimado para cubrir las necesidades tanto de la caja del tramo horizontal como del tramo inclinado completo.

El resto de los precios han sido estimados por primeros cálculos y con base a los precios de la revista de construcción BricoMart 2021.

Tabla 17: Coste de material

Materiales				
Concepto	Precio unitario (€/u)	Unidad	Cantidad	Importe final (€)
Hierro	0.2	kg	103x5 módulos	103
Esmalte antioxidante	12.3	m ²	2.6	32
Alternador	70	Unidad	1	70
Batería de 12V	108	Unidad	4	432
Controlador eléctrico	20	Unidad	1	20
Cables distintos grosores	-	Unidad	-	25
Carcasa de HDPE	8	kg	0,15	1,2
Tubería R=0.2m; L=13m	4.8	m	13	62.4
Codo R=0.2m	6.5	Unidad	4	26
Válvulas de paso	6	Unidad	2	12
Uniones	-	Unidad	-	80
Malla D=0.7	1	Unidad	1	2
Mortero	0,078	kg	1560	121.68
Otros	-	-	-	70
Total				1057.28

10.3. RESULTADO DEL PRESUPUESTO

El valor final del presupuesto será el total del coste de mano de obra y del coste de materiales, como muestra la Ec.51. Se debe tener en cuenta que el resultado mostrado es orientativo y una primera aproximación.

$$8303.5€ + 1057.28€ = 9360.78€$$

(51)

11. CONCLUSIONES

El acceso seguro a la electricidad es una necesidad en el mundo actual que hoy en día no es cubierta en numerosos hogares del mundo. Las picocentrales hidráulicas permiten aprovechar los pequeños saltos de agua que se encuentran en las concentraciones de población, para generar una energía segura y limpia.

Con el programa desarrollado en Microsoft Excel es posible conocer los parámetros de diseño de la turbina de tornillo de Arquímedes óptima para las características del emplazamiento y las posibilidades de fabricación. También permite conocer la potencia generada.

Con la hoja de Microsoft Excel implementada para el cálculo de caudales, se presenta un modelo editable para conocer los caudales de aportación en lugares que no disponen de más información que las precipitaciones anuales y el tipo de relieve.

A propuesta de OAN International, se ha diseñado específicamente la turbina de tornillo de Arquímedes propicia para la comuna de Nikki, Benín. Se ha comprobado que las características de este tipo de turbinas son apropiadas para los recursos de países en vías de desarrollo.

El resultado ha sido el aprovechamiento de 1.5m de salto de agua proporcionando más de 1kW de potencia.

Este documento es punto de partida para futuros estudios sobre la instalación eléctrica y la obra civil en la central de Nikki. A mayores, una disminución del peso del tornillo es una mejora susceptible de estudio.

Se inician así, líneas de trabajo futuras dentro del desarrollo de picocentrales hidráulicas en zonas rurales aisladas.

12. BIBLIOGRAFÍA

- Agüera Soriano, J. (2009). *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*. IV edición revisada.
- Álvarez S., (2020). *¿Qué es el alternador del coche? ¿Para qué sirve?* Artículo del 14 de noviembre de 2020, Revista Diario Motor.
- Ambientum. (18 de diciembre de 2019). *Reducir el impacto ambiental de las centrales hidroeléctricas*. Recuperado el día 24 de abril de 2021 de <https://www.ambientum.com/ambientum/agua/reducir-impacto-ambiental-las-centrales-hidroelectricas.asp>
- Andritz Atro Wasserkraftschnecken, (2012). Catálogo.
- Aranguren A., (2017). *El alternador y su papel protagónico en el coche*. Artículo del 26 de noviembre de 2017, Revista Motor y Racing.
- Autorité de Régulation de l'Électricité. République du Bénin. (2018). *La production d'électricité sur le plan national* (<https://are.bj/laproduction/>)
- Bosch, (2015). *Alternadores, Marchas y componentes*. Catálogo de la marca Bosch.
- Bürger K.G. Dr. Ing., (2000). *Electricidad y electrónica del automóvil. Alternadores*. Manual técnico Bosch.
- Cadahía Paz, F. (2017). *Diseño de una microrred eléctrica aislada para su implantación en la comuna de Nikki*. [Trabajo de fin de grado, Escuela técnica superior de ingenieros de minas y energía]
- Castro, A. IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2006). *Minicentrales Hidroeléctricas*.
- Charisiadis, C. (2015). *A introductory presentation to the "Archimedean Screw" as a Low Head Hydropower Generator*. Leibniz Universität Hannover.
- Datos del Banco Mundial. (2018). *Acceso a la electricidad*. (<https://datos.bancomundial.org/indicador/>)
- DatosMundial.com. (2016). *Gestión de energía en Benín*. (<https://www.datosmundial.com/africa/benin/balance-energetico.php>)
- Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. (2020). *Guía de estudio de máquinas hidráulicas*. Universidad de Valladolid.
- Departamento Presidencia del Gobierno. (1980). *Relación y definición de categorías laborales básicas*. BOE-A-1980-22958.



EADIC Formación y Consultoría. (2015). *Obtención del umbral de escorrentía Po*. Recuperado el día 5 de abril de 2021 de:

<https://www.eadic.com/obtencion-del-umbral-de-escorrentia-po/>

Expansión Datosmacro.com. (2018). *Benín consumo de electricidad*. (<https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-consumo/benin>)

Fernández Díez, P. (1996). *Turbinas hidráulicas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria.

Fernández Piegari, M., (2010). *Abastecimiento sustentable de energía a regiones rurales aisladas. Análisis de generación de energía hidroeléctrica de paso utilizando un tornillo de Arquímedes*. Instituto tecnológico de Buenos Aires.

Guru Nanak. (2015). *Pico-Hydro-Plant for Small Scale Power Generation in Remote Villages*. Institute of Technology GNIT, India.

Ho-Yan, B. P. (2012). *Design of a pico hydro turbine for rural electrification in Cameroon*. University of Guelph, Canada.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., Gisbert Blanquer, J. M., (2011). *Métodos para la determinación del tiempo de concentración (tc) de una cuenca hidrográfica*. Departamento de Producción Vegetal. Universidad Politécnica de Valencia.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., Gisbert Blanquer, J. M., (2012). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía (c)*. Departamento de Producción Vegetal. Universidad Politécnica de Valencia.

IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2011). *Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020*.

IDEAM- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales del gobierno de Colombia., (2014). *Curvas Intensidad Duración Frecuencia- IDF*.

Jash Rehart. (2019). *Hydropower Screw. Ideal Solution for Micro Hydropower Station*. [Catálogo Jash Rehart]

Jiménez J., (2020). *¿Qué es el alternador, cuál es su vida útil y qué averías son frecuentes en este elemento?* RO-DES, Red Operativa de Desguaces Españoles.

Mateos Aparicio J., (2020). *Convierte la energía mecánica en energía eléctrica*. Artículo del 13 de octubre de 2020, Revista Online Autofácil.

Mesa Lozano M., (2017). *Electrificación de zonas rurales aisladas en África (Nikki)*. Universidad Politécnica de Madrid.



- Mesa Lozano, M. (2017). *Electrificación de zonas rurales aisladas en África (Nikki)*. [Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid]
- Ministere de la decentralisation et de la gouvernance Locale/ Commune de Nikki. (2017). *Plan de Développement Communal (PDC) (2017-2021)*.
- Ministerio de Fomento, (2016). *Norma 5.2-IC Drenaje superficial*. Boletín Oficial del Estado, 10 de marzo de 2016.
- MSc Charisiadis C., (2015). *An introductory presentation to the “Archimedean Screw” as a Low Head Hydropower Generator*. Leibniz Universität Hannover.
- Nuernbergk D., Rorres C., (2013). *Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation*. Artículo del Journal of Hydraulic Engineering.
- Objetivo Analiza Nikki International. (<https://www.oaninternational.org/>) Recuperado el día 14 de marzo de 2021.
- Patrick Ho-Yan B., (2012). *Design of a Low Head Pico Hydro Turbine for Rural Electrification in Cameroon*. University of Guelph.
- Rehart Power. (2014). *Reference Projects*. Recuperado el día 27 de abril de 2021 de <https://www.rehart-power.de/en/reference-projects/fish-migration-screw-type-fas/pilsing-fas.html>
- Rorres C., (2000). *The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw*. Artículo en Journal of Hydraulic Engineering. Drexel University.
- Sánchez San Román, F.J., (2016). *Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación- Escorrentía*. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca.
- Sánchez San Román, F.J., (2017). *Distribuciones estadísticas*. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca.
- Santos Giménez, B. (2017). *Núcleo Húmedo. Prototipo para la Comunidad de Nikki en Benín, África*. [Trabajo de fin de grado, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid]
- Segura Rodríguez I., (2016). *Optimización y estudio hidrodinámico de una microturbina hidráulica para el aprovechamiento energético de pequeños saltos de agua*. Universitat Jaume I.
- Sinfin Energy. (2019). *Fish-Friendly Comprometidos con el entorno*. Recuperado el día 27 de abril del 2021 de <http://www.sinfinenergy.com/fish-friendly/>



Société Béninoise d'Énergie Electrique. (2020). *Distribution d'Électricité*. (<https://www.sbee.bj/site/nos-activites/distribution-delectricite/>)

Spaans Babcock Hydro Power. (2021). *Archimedean Screw Turbine*. [Catálogo Spaans Babcock]

Vilar Ed. (2012). *Energías renovables en África Occidental. Estado, experiencias y tendencias*. Editorial: Casa de África.

Villegas Arango C., (2016). *Generación de energía mediante tornillos de Arquímedes en PCH como aprovechamiento a los caudales turbinados*.

Weather Spark, (2020). *El clima promedio en Nikki, Benín*. Recuperado en febrero de 2021 de: <https://es.weatherspark.com/>

White, Frank M. (2004). *Mecánica de fluidos*. University of Rhode Island. (5ªed.). España: Editorial Mc Graw Hill.

Williams, A., Porter, S. (2006). *Comparison of hydropower options for developing countries with regard to the environmental, social and economic aspects*. Nottingham Trent University/ Metronet Rail, UK.

Yoosef Doost A., Lubitz W., (2020). *Archimedes Screw Turbines: A Sustainable Development Solution for Green and Renewable Energy Generation- A Review of Potential and Design Procedures*. Sustainability Scientific Journal. School of Engineering, University of Guelph.

Zamora Parra, B., Viedma Robles, A. (2016). *Máquinas Hidráulicas Teoría y Problemas*. Universidad Politécnica de Cartagena. (1ªed.). España: Editorial: Rai ediciones.