



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

**Generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de
Arquímedes para satisfacer demanda eléctrica en viviendas
rurales del Perú**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Mecánico Electricista**

AUTORES:

Carrión Suyón, Gian Carlo Felipe ([ORCID:0000-0003-1983-5377](https://orcid.org/0000-0003-1983-5377))

Gonzáles Sánchez, José Antonio ([ORCID:0000-0002-7298-5537](https://orcid.org/0000-0002-7298-5537))

ASESOR:

Mg. Panta Carranza, Dante Omar ([ORCID:0000-0002-4731-263X](https://orcid.org/0000-0002-4731-263X))

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Modelamiento y simulación de sistemas electromecánicos

CHICLAYO – PERÚ

2021

Dedicatoria

Dedico el esfuerzo vertido en esta investigación al Ing. Carlos Carrión, mi padre, cuyo ejemplo me motivó a ser no sólo un buen profesional si no también un mejor ser humano, fue gracias a su respaldo incondicional que pude ver la meta cumplida. Y a Gladys, que, con la fuerza motriz más poderosa, el amor de madre, me impulsó a continuar cada vez que mis brazos caían.

GIAN CARLO FELIPE CARRIÓN SUYÓN.

Esta investigación se la dedico a mis padres a los Doctores José Gonzáles Horna y Marina Sánchez Vásquez, a mis hermanos Andrés y Joslin, quienes me otorgaron su apoyo incondicional a pesar de las adversidades y han estado a mi lado todo este tiempo para cumplir el sueño de ser mejor cada día.

JOSÉ ANTONIO GONZÁLES SÁNCHEZ.

Agradecimiento

Principalmente vayan las gracias al creador por brindarme su energía dinámica día a día. Un agradecimiento especial al Mgtr. Omar Panta y al Dr. Jorge Luján por su paciencia y consejos precisos.

GIAN CARLO FELIPE CARRIÓN SUYÓN.

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de aún seguir con vida e iluminar mi camino, a mis padres y hermanos por su amor, a la Universidad César Vallejo por los conocimientos brindados para mi capacitación profesional y la realización del desarrollo de este proyecto de investigación.

JOSÉ ANTONIO GONZÁLES SÁNCHEZ.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de tablas.....	v
Índice de figuras.....	vii
Resumen	ix
Abstract.....	x
I Introducción	1
II Marco teórico.....	4
III Metodología.....	11
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	11
3.2 Variables y operacionalización	11
3.3 Población, muestra y muestreo	11
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	12
3.5 Procedimientos.....	12
3.6 Método de análisis de datos	13
3.7 Aspectos Éticos.....	13
IV Resultados.....	15
4.1 Evaluar el potencial hidroeléctrico en las viviendas rurales del Perú para el funcionamiento correcto del tornillo de Arquímedes.....	15
4.2 Modelar el generador hidroeléctrico de bajo caudal para satisfacer la potencia que cubra la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú.	19
4.3 Realizar el presupuesto del generador hidroeléctrico de bajo caudal para estimar su factibilidad económica en viviendas rurales del Perú.	54
V Discusión.....	59
VI Conclusiones	64
VII Recomendaciones.....	66
Referencias.....	67
Anexos.....	73

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Características geométricas e hidráulicas de canal Garbanzal.</i>	16
Tabla 2. <i>Principales entradas y salidas.</i>	21
Tabla 3. <i>Matriz morfológica.</i>	21
Tabla 4. <i>Ventajas y desventajas de alternativas.</i>	22
Tabla 5. <i>Valor Técnico.</i>	23
Tabla 6. <i>Valor Económico.</i>	24
Tabla 7. <i>Cálculo del centroide del semicírculo.</i>	28
Tabla 8. <i>Centroides de acuerdo al porcentaje de contacto.</i>	29
Tabla 9. <i>Valores asumidos.</i>	33
Tabla 10. <i>Valores de diseño determinados.</i>	33
Tabla 11. <i>Cargas obtenidas para un paso (Px).</i>	35
Tabla 12. <i>Propiedades y valores asumidos para eje hueco.</i>	35
Tabla 13. <i>Valores de cargas a lo largo del tornillo.</i>	36
Tabla 14. <i>Reacciones en rodajes.</i>	38
Tabla 15. <i>Factores de seguridad.</i>	41
Tabla 16. <i>Fuerzas y momentos obtenidos del DFC y DMF</i>	41
Tabla 17. <i>Fuerzas y momentos calculados para la sección 2.</i>	42
Tabla 18. <i>Fuerzas y momentos calculados para las secciones 1 y 3.</i>	42
Tabla 19. <i>Factor de superficie en aceros.</i>	44
Tabla 20. <i>Factor de temperatura.</i>	44
Tabla 21. <i>Factor de confiabilidad.</i>	45
Tabla 22. <i>Factores de corrección para límite de fatiga.</i>	46
Tabla 23. <i>Momentos y esfuerzos calculados en los cambios de sección.</i>	46
Tabla 24. <i>Datos de entrada para selección de rodamientos.</i>	48
Tabla 25. <i>Resultados de rodamientos.</i>	48
Tabla 26. <i>Resultados de la chaveta.</i>	49
Tabla 27. <i>Valores de entrada y salida del multiplicador.</i>	50
Tabla 28. <i>Datos de motor seleccionado.</i>	50
Tabla 29. <i>Materiales a utilizar.</i>	54
Tabla 30. <i>Mano de obra.</i>	56
Tabla 31. <i>Soldadura, remache, pernos y tuercas.</i>	56
Tabla 32. <i>Material y montaje para conexión eléctrica.</i>	56

Tabla 33. *Presupuesto total*.57

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Rangos de implementación de turbinas.	7
<i>Figura 2.</i> Rendimiento medio del tornillo de Arquímedes.	8
<i>Figura 3.</i> Eficiencia de las turbinas con respecto al caudal de agua.....	8
<i>Figura 4.</i> Esquema de Tornillo de Arquímedes.	9
<i>Figura 5.</i> Organización de los procedimientos.....	13
<i>Figura 6.</i> Caserío Tumi de Oro.....	15
<i>Figura 7.</i> Expediente de mejora del servicio de agua en Caserío Tumi de Oro. ...	16
<i>Figura 8.</i> Parámetro de estiaje para el diseño de generador hidroeléctrico basado en tornillo de Arquímedes.	17
<i>Figura 9.</i> Plano de Corte A – A, de toma lateral del canal Garbanzal.....	18
<i>Figura 10.</i> Plano de Corte B – B, de toma lateral del canal Garbanzal.	18
<i>Figura 11.</i> Parámetros geométricos e hidráulicos - tomas laterales canal Garbanzal.	19
<i>Figura 12.</i> Caja negra para el diseño del generador hidroeléctrico	21
<i>Figura 13.</i> Evaluación técnica - económica.....	25
<i>Figura 14.</i> Esquema del tornillo de Arquímedes de 1 hilo.	26
<i>Figura 15.</i> Esquema de los ángulos de hélice.....	26
<i>Figura 16.</i> Cálculo del nivel de agua en la turbina para un 50% de contacto.....	28
<i>Figura 17.</i> Tornillo de Arquímedes de 1 hilo esquemático.	30
<i>Figura 18.</i> Vectores de velocidades del agua y tornillo.....	31
<i>Figura 19.</i> Propiedades de tapa y eje superior.	34
<i>Figura 20.</i> Propiedades de tapa y eje inferior.	35
<i>Figura 21.</i> Diagrama cuerpo libre en plano XY.....	36
<i>Figura 22.</i> Propiedades de tapa y eje superior	37
<i>Figura 23.</i> DFC XY.....	38
<i>Figura 24.</i> DMF XY.	39
<i>Figura 25.</i> DFC XZ.....	39
<i>Figura 26.</i> DMF XZ.....	39
<i>Figura 27.</i> Secciones observadas.	40
<i>Figura 28.</i> Factor de corrección de eje con hombro a flexión.	45
<i>Figura 29.</i> Radio de la muesca.	45
<i>Figura 30.</i> Esquema de la ubicación del tornillo respecto a la toma lateral.....	51

<i>Figura 31.</i> Caja de conexión impermeable.	52
<i>Figura 32.</i> Esquema de conexión.	53
<i>Figura 33.</i> Diagrama unifilar de vivienda rural.	54

Resumen

La investigación fue no experimental – descriptiva, tuvo como objetivo diseñar un generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en el tornillo de Arquímedes para satisfacer la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú; empezando con evaluar el potencial hidroeléctrico del caserío Tumi de Oro. Posteriormente se modeló el generador hidroeléctrico para poder satisfacer una potencia de 200 watts, magnitud mínima que requiere una vivienda rural según norma DGE. Basamos el proyecto en la norma VDI 2221, cálculos matemáticos y se realizó el diseño en el software Solidworks.

Concluimos el proyecto como viable porque la muestra aprovecha el potencial hidroeléctrico del canal de riego Garbanzal, situando el diseño en una toma lateral con caudal disponible de $0.2\text{m}^3/\text{s}$, velocidad de 0.59m/s y un espacio geométrico de 0.5m de ancho y 1.34m de alto. Asumiendo una inclinación de 30° y un salto de 0.9m , los cálculos demostraron que es posible satisfacer la demanda establecida como mínima por norma DGE. Finalmente, un presupuesto permitió evaluar la fabricación del generador en S/ 2529.85 y se planteó como un proyecto social que estima la factibilidad económica para una vivienda rural al compararla con otras tecnologías.

Palabras clave: Arquímedes, tornillo, generador, viviendas rurales, demanda eléctrica.

Abstract

The research was non-experimental - descriptive, its objective was to design a low flow hydroelectric generator based on the Archimedean screw to satisfy the electricity demand in rural homes in Peru; Starting with evaluating the hydroelectric potential of the Tumi de Oro village. Subsequently, the hydroelectric generator was modeled to be able to satisfy a power of 200 watts, the minimum magnitude that a rural house requires according to the DGE standard. We based the project on the VDI 2221 standard, mathematical calculations and the design was carried out in Solidworks software.

We concluded the project as viable because the sample takes advantage of the hydroelectric potential of the Garbanzal irrigation canal, placing the design in a lateral intake with an available flow of $0.2\text{m}^3 / \text{s}$, speed of $0.59\text{m} / \text{s}$ and a geometric space of 0.5m wide and 1.34 m high. Assuming an inclination of 30° and a jump of 0.9m , the calculations showed that it is possible to satisfy the demand established as a minimum by the DGE standard. Finally, a budget will evaluate the generation of the project in S / 2529.85 and it was proposed as a social one that estimates the economic feasibility for a rural house there with other technologies.

Keywords: Archimedes, screw, generator, rural houses, electricity demand.

I Introducción

A nivel mundial la generación hidroeléctrica representa el mayor porcentaje de energía renovable instalada, 43% según los datos de IRENA (2021). La Agencia Internacional de las Energías Renovables mencionó que para cumplir con el “Acuerdo de París”, es necesario que la capacidad mundial se duplique para el año 2050, siendo fundamental, además, renovar y crear centrales que posean más años de operatividad, pero surge el problema a nivel internacional de que los precios monómicos en los mercados, los trámites burocráticos y el apoyo de los estados genera un reto en proyectos de inversión eléctrica (López de Benito, 2021).

La generación de energía eléctrica en el Perú es una de las más limpias de América Latina debido a que cuentan con una generación del 50% gracias al aprovechamiento de las masas de agua a pequeña y gran escala, por lo que el director del MINEM, afirma que en el año 2030 se espera que al menos el 15% de la energía producida en el país sea de tipo renovable, siendo consideradores la autogeneración de empresas y la generación distribuidas claves para lograr el compromiso. Lo mencionado es lograble, ya que se cuenta con un elevado potencial hidro energético debido a la privilegiada hidrografía y la geografía del territorio nacional. Sin embargo, se estima que solo se está utilizando el 5% del potencial hidroeléctrico que posee el país, es decir, de 80,000 MW solo se aprovecha 4,000 MW, lo mencionado resulta contraproducente con los planes a largo alcance planteado por el estado, ya que existen posibilidades y oportunidades de generación eléctrica con este recurso disponible (OSINERGMIN, 2019).

Es de conocimiento que a nivel nacional el 92.8% de los peruanos contó con energía eléctrica proveniente de la red pública todos los días de la semana hasta el año 2019, sin embargo, el otro 7.2% aproximadamente no cuenta con este servicio en sus hogares, cifra que equivale a más de 2 millones de peruanos que siguen sin este servicio básico. A pesar de que, existe el Programa Masivo Fotovoltaico que lleva energía eléctrica a zonas alejadas del país, donde la geografía del lugar imposibilita la llegada de la red eléctrica convencional. Es necesario también contar con otros tipos de tecnologías que ayuden y que suministren este servicio de forma continua a estas poblaciones (INEI, 2020).

La producción de energía hidroeléctrica en general está orientada a grandes proyectos de ingeniería los cuales generan potencias elevadas en el rango de MW,

haciendo a un lado las oportunidades de generar energía a partir de recursos hídricos menores, por ejemplo, las mini o pequeñas centrales hidroeléctricas que producen energía para una localidad en específico o para autoconsumo en el mismo lugar de producción. Sin embargo, como plantea Santa Cruz, aún existen recursos hídricos que no son aprovechados como los canales de regadío los cuales muchas veces existen en localidades donde las líneas de transmisión eléctrica no llegan, en consecuencia, no cuentan con acceso a la electricidad (Santa-Cruz, 2018).

Actualmente, se vienen presentando diversas tecnologías para la generación de energía eléctrica, específicamente en comunidades rurales del Perú, siendo la generación térmica la más utilizada en zonas aisladas de la red, la cual es costosa debido al combustible que utiliza, a esto se le suma los gases de efecto invernadero, por ello se debe buscar fuentes de generación de energía renovable que eviten el incremento de la contaminación ambiental, tal es el caso de generadores de energía eléctrica que aprovechen los caudales de quebradas o canales de regadío. Realidad que se plasma en el caserío Tumi de Oro del distrito de Lambayeque, donde los pobladores mediante la ayuda de pequeños generadores de combustión interna, baterías, lámparas de queroseno y velas iluminan sus hogares, originando las desventajas mencionadas en el párrafo anterior; ello podría evitarse usando el potencial hidroeléctrico del canal de riego Garbanzal, haciendo uso de una tecnología generadora de electricidad que aproveche su recurso hídrico.

Según lo expuesto, la presente investigación se enmarca en la necesidad de fomentar el uso de fuentes de energías renovables para la generación de energía eléctrica, específicamente de quebradas, ríos o canales de regadío cercanos a viviendas rurales, por ello se plantea el problema de investigación: ¿Es posible diseñar un generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes para satisfacer la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú?

El objetivo general de la investigación es diseñar un generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en un tornillo de Arquímedes para satisfacer la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú. Para ello, se desarrolló los siguientes objetivos específicos: evaluar el potencial hidroeléctrico en las viviendas rurales del Perú para el funcionamiento correcto del tornillo de Arquímedes, modelar el generador hidroeléctrico de bajo caudal para satisfacer la potencia que cubra la

demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú y finalmente realizar el presupuesto del generador hidroeléctrico de bajo caudal para estimar su factibilidad económica en viviendas rurales del Perú.

Al analizar el problema con respecto a la electrificación de estas zonas rurales se determinó los siguientes principios: de manera teórica, ya que se realizó la búsqueda exhaustiva de información sobre los diferentes diseños realizados en el desarrollo de generadores hidroeléctricos de bajo caudal a partir del tornillo de Arquímedes a fin de generalizar los resultados obtenidos para nutrir de manera teórica diferentes proyectos de similar envergadura; también de manera práctica, ya que se presentó la oportunidad de resolver el problema relacionado a la inexistencia de energía eléctrica en viviendas rurales que son cercanas a canales de regadío, por ello la investigación tomó la realidad de un canal presente en el caserío Tumi de Oro de la región Lambayeque para situar el generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en el tornillo de Arquímedes; de manera metodológica, ya que para el desarrollo se basó en la norma VDI 2221 y el uso de teorías que fueron desarrolladas por otras investigaciones; y por último de manera tecnológica, ya que el modelamiento del generador hidroeléctrico basado en tornillo de Arquímedes se realizó haciendo uso de herramientas de diseño mecánico computacionales como es el caso del software SolidWorks.

II Marco teórico

En este capítulo se estudiarán los antecedentes del proyecto, los cuales están orientados a la generación de energía eléctrica usando una turbina de tornillo de Arquímedes (TTA), también se incluyen las teorías relacionadas al tema para un mejor estudio de la investigación.

Como primer antecedente se consideró la investigación de Weking y Sudarmojo (2019) la cual se desarrolló en la Universidad de Udayana en Indonesia, y tuvieron como objetivo diseñar el prototipo de una turbina de tornillo de Arquímedes para un estudiante de dicha universidad. Se inició con la técnica de análisis documental donde tomaron en consideración el diseño de los modelos de sistemas de micro centrales hidroeléctricas en su investigación; para luego medir el efecto de la pendiente de la cabeza de la tubería y el efecto de la presión del agua. De la tabla de resultados en cuanto a presión y ángulo de inclinación concluyeron que en un ángulo de 40° la ronda del generador más grande (rpm) es de 3765 (rpm) y la potencia más alta es de 10,91096 vatios. El par que resultó de la presión del agua es de 24 psi y 0,73 Nm y la eficiencia del 17.594%. El voltaje, la corriente y la potencia de salida que dieron como resultado el generador es de 83.58 voltios, 0,1932 amperios y 16,19 vatios.

En la siguiente investigación de Shahverdi et al. (2020) desarrollaron su investigación en el Departamento de Ingeniería en Ciencias del Agua de la Universidad Bu-Ali Sina, Irán. El cual tuvo como objetivo la optimización estructural de una AST para sustituir a las estructuras de control existentes en los canales de riego. Emplearon un modelo matemático de rendimiento de la AST para la optimización del rendimiento del tornillo en el entorno MATLAB 2013a. El modelo desarrollado se validó con datos experimentales. Se optimizaron diferentes parámetros estructurales para diseñar un AST apropiado para reemplazar en lugar de la gota de control-1 en el canal Aghili este en la provincia de Khuzestan (Irán), los resultados del modelo desarrollado mostraron una buena concordancia con los datos experimentales y que la mayor eficiencia se obtuvo en un 90,83% para una longitud de tornillo de 6 m, un ángulo de inclinación de 20° y un número de vuelo de 1 con el caudal de diseño. Concluyeron que su sistema propuesto puede utilizarse en lugar de las estructuras del canal sin que se produzcan cambios considerables en la hidráulica y el rendimiento del canal.

La simulación de la producción de energía eléctrica en una pequeña central hidroeléctrica de cabezal ultra bajo con tornillo de Arquímedes fue el objetivo del siguiente artículo realizado por Lavrič, Rihar y Fišer (2018) en la Universidad de Ljubljana, Eslovenia. Los resultados demuestran que la instalación de velocidad constante de la minicentral en el emplazamiento analizado en el lugar analizado habría producido entre 240 MWh y 355 MWh de energía eléctrica en 35 años, de 1980 a 2015. Concluyeron que la energía producida anualmente está en correlación inversa con el caudal medio anual.

Por otro lado, Bouvant et al. (2021) realizaron su investigación en la Universidad de Antioquía, Colombia donde buscaron analizar el rendimiento de una TTA y la forma de optimizarlo, evaluando los parámetros de diseño como el diámetro interior, exterior, la zancada de la pala, la longitud del tornillo, la inclinación. Aplicaron la metodología de superficie de respuesta y realizaron simulaciones de dinámica de fluidos, como resultado obtuvieron 0,1 para el cociente entre los diámetros, 360 mm para la longitud del eje, 73,94° la inclinación y 220 mm para la zancada de la pala. Los valores más altos del coeficiente de potencia fueron 0,5515 y 0,5137. Concluyeron que el rendimiento de la TTA depende de su forma del rotor, y que es importante para disminuir el costo de transformación de la energía obtenida a través de este tipo de sistemas hidro-cinéticos.

El artículo de Simmons et al. (2021) guarda mucha relación con el anterior, ya que aquí se varía el ángulo de 3 prototipos de TTA para encontrar cual es el sistema con diferentes ángulos de inclinación menos pronunciados que producían más potencia. Se inició la investigación con la utilización de la experimentación para desarrollar una visión inicial del efecto del ángulo de inclinación en la producción de potencia de la TTA. Luego compararon las simulaciones computacionales de dinámica de fluidos donde evaluaron la precisión de los datos experimentales. Como resultado indicaron que los ángulos de inclinación menos pronunciados se corresponden a tornillos más largos y, por tanto, con mayores costes de infraestructura civil. Los autores concluyeron, el ángulo de inclinación ideal para una instalación de TTA está entre $\beta=20^\circ$ y 25° .

Según Dedić-Jandrek y Nižetić (2019) donde su investigación se desarrolló en la Universidad de Split, Croacia; el objetivo es la investigación experimental y los problemas de diseño de una pequeña estación de prueba de energía hidroeléctrica

con TTA, en donde se examinaron experimentalmente los parámetros de variación del ángulo de inclinación, la relación de flujo de agua y la velocidad de rotación respecto a la potencia de salida, par y eficiencia de la turbina; como resultado, el rendimiento máximo de la TTA fue del 64%, con un ángulo de inclinación de 21°, y con un caudal de agua asociado de 10 l/s. La potencia del generador fue de unos 35 W. También se descubrió que para alcanzar la máxima potencia del generador (57 W), la TTA requiere un ángulo de inclinación de 30° y un caudal de agua de 12,81 l/s. Concluyeron que usando un generador en AC se encontró una potencia de salida máxima en comparación a un generador DC, el error de medición osciló entre 2,1% y el 40%.

En esta investigación de Simmons y Lubitz (2017) tuvieron que enfrentar la poca implementación de la tecnología de tornillo de Arquímedes en el mundo, desarrollando su investigación Universidad de Guelph, Canadá; el objetivo es estudiar el beneficio que supone la utilización del tornillo de Arquímedes para el desarrollo energético sostenible. En donde aplicó una revisión sistemática, como resultado, los generadores de tornillo de Arquímedes (ASG) funcionan como de pasada, tienen un impacto ambiental bajo y son un medio excepcionalmente eficiente de generar energía hidroeléctrica en sitios con una altura muy baja y un caudal moderado, concluyeron que las turbinas implementadas actualmente en regiones donde el recurso hídrico cuenta con baja altura indica que pueden ser usados para la electrificación rural.

Y por último, la siguiente investigación de Maulana, Syuhada y Almas (2018) en la Universidad Syiah Kuala, Indonesia; donde el problema radica en reducir el impacto de la crisis eléctrica en Aceh y otras áreas aisladas de Indonesia utilizando centrales hidroeléctricas a pequeña escala. Como objetivo determinaron el modelo más adecuado de turbina para la implementación para una zona específica en Indonesia; para ello realizaron el diseño mecánico y energético de 3 diferentes tipos de turbinas para luego hacer las pruebas experimentales mediante el software ANSYS CFD, como resultado determinaron que la turbina con mayor rendimiento era la de 10 palas. Del mismo modo concluyeron que cuanto menor era la distancia entre el canal y las palas de la turbina, los resultados eran más eficientes debido a la ausencia de corrientes desperdiciadas.

Las turbinas hidráulicas convierten la energía hidráulica a mecánica pueden ser motrices, generatrices reversibles o de grupos de transmisión o acoplamiento. Por su parte son un tipo de turbomáquina motora, debido a esto son consideradas como bombas rotodinámicas que trabajan invertidas. La bomba absorbe la energía mecánica y entrega fluido mientras que la turbina absorbe la energía del fluido y entrega energía mecánica. De acuerdo al diseño del rodete se clasifican en Kaplan, Pelton, Francis, Michell y Turgo; en la *Figura 1* se indican los rangos de trabajo de cada una de estas turbinas en donde se señala el tornillo de Arquímedes (Camayo, 2019).

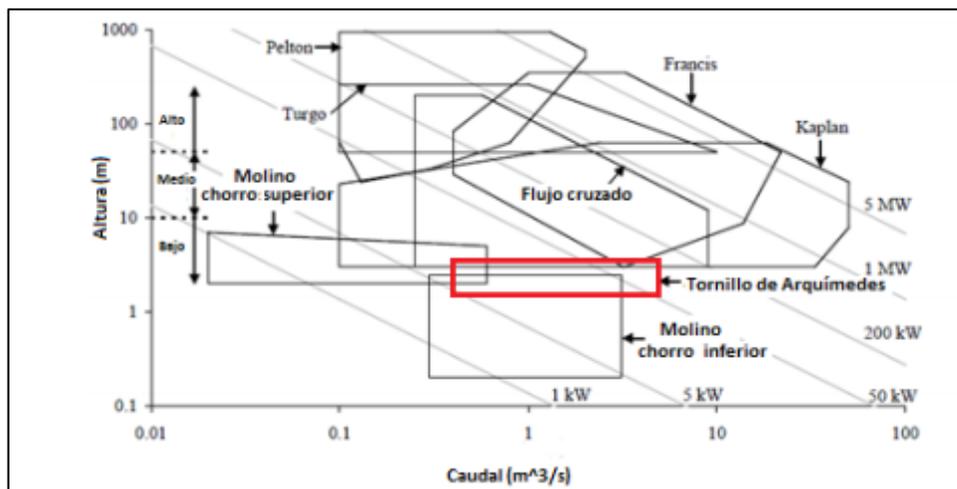


Figura 1. Rangos de implementación de turbinas.

Fuente: Tomado de Madrid y Toro, (2013).

El tornillo de Arquímedes, es una tecnología antigua, usada para subir agua a diferentes niveles. El sistema consta de un eje cilíndrico en donde se adhieren superficies helicoidales, cuando el agua ingresa por la parte superior permite que el tornillo gire. El rango de funcionamiento con respecto al caudal está entre los 0.1 m³/s y los 14 m³/s, mientras que con respecto a la caída de agua está entre 1 m y 10 m (Ortega y Valdivia, 2018).

Una de las ventajas de esta tecnología es el trabajo civil mínimo que requiere, ya que se adapta de forma sencilla al caudal del agua. El rendimiento de la turbina empieza a ser considerable cuando se supera el 20% del caudal de equipamiento tal como se indica en la *Figura 2*. Este comportamiento varía dependiendo de la tecnología que vaya a utilizarse, para el caso de la turbina de tornillo hidrodinámico se obtiene un rendimiento aproximadamente del 80% con un caudal de agua a partir

de 25% aproximadamente según indica el gráfico ubicado en la *Figura 3* (Lucio, 2019)

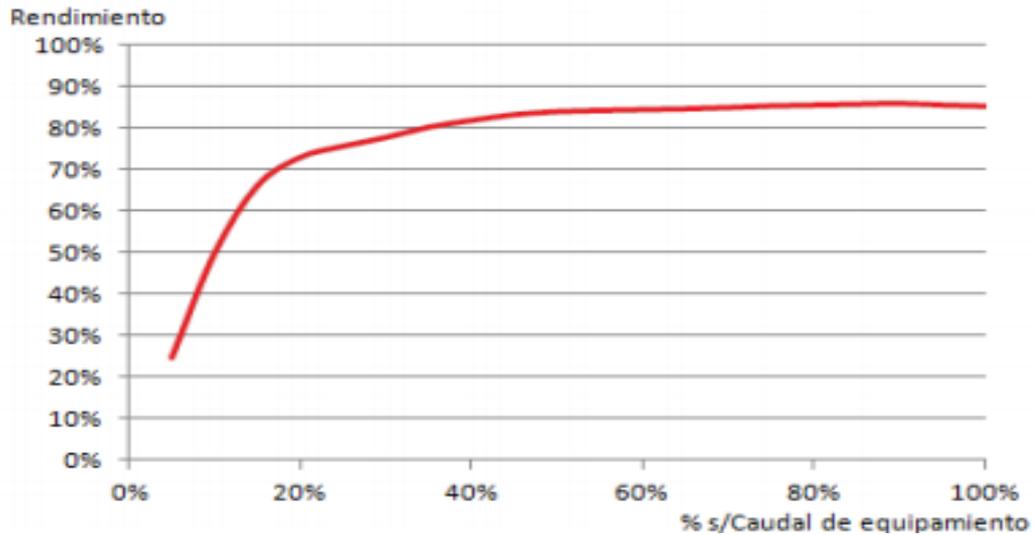


Figura 2. Rendimiento medio del tornillo de Arquímedes.

Fuente: Tomado de Segura, (2016)

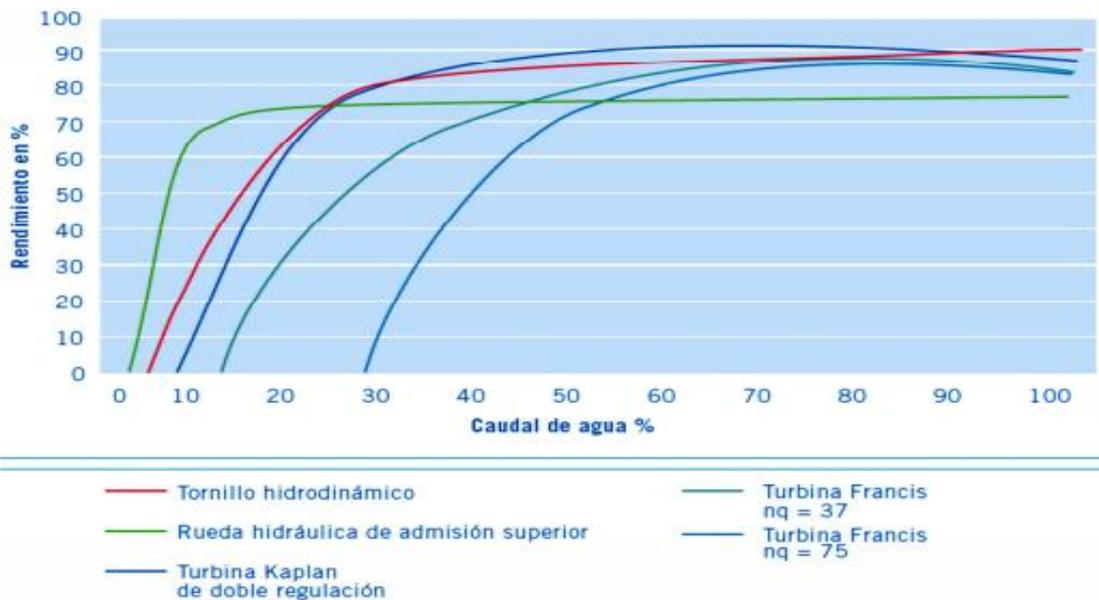


Figura 3. Eficiencia de las turbinas con respecto al caudal de agua.

Fuente: Tomado Mejia, (2011).

Por otro lado, los autores Ramos, Ramos y Sánchez (2020) definen como un dispositivo que genera energía eléctrica utilizando el principio de tornillo de Arquímedes, que está formado por una superficie cilíndrica y que en su contorno tiene instaladas las hélices en forma de espiral, y esta genera un giro con respecto al paso del agua al ingreso del tornillo, permitiendo que caiga el agua por la parte inferior de la turbina producto del giro helicoidal del mismo, obteniendo un giro

constante rotativo convirtiendo de esta manera la energía mecánica a eléctrica, la cual se dimensiona con respecto al caudal disponible, el salto y cálculos matemáticos.

Para los cálculos matemáticos del tornillo de Arquímedes se debe de considerar partiendo del esquema en la *Figura 4*.

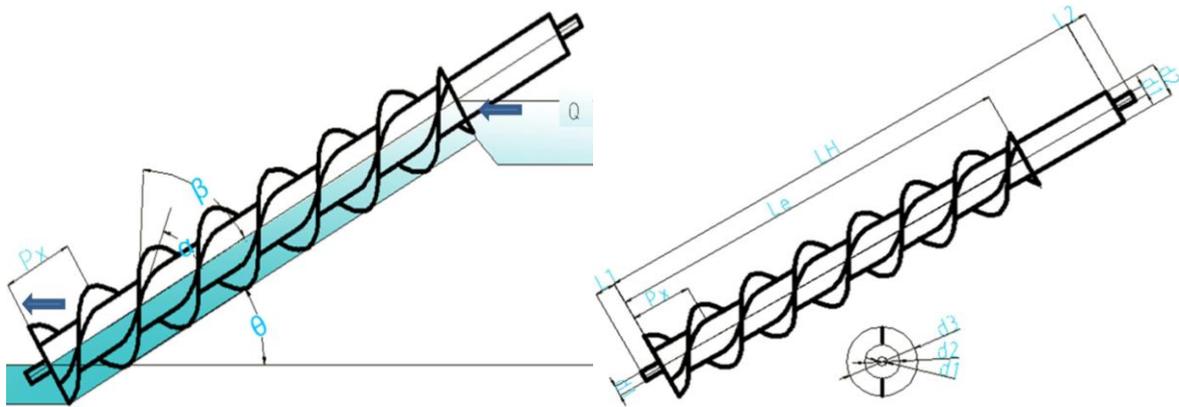


Figura 4. Esquema de Tornillo de Arquímedes.

Fuente: Tomado de Ramos, Ramos y Sánchez, (2020).

Donde:

- Q = caudal de entrada
- H = salto
- P_x = distancia entre hélices
- Nh = número de hilos
- L_h = longitud del eje hueco
- L_e = longitud de hélice
- d_1 = diámetro del eje sólido
- d_2 = diámetro del eje hueco
- d_3 = d. del exterior de tornillo
- α = ángulo interior de hélice
- β = ángulo exterior de hélice
- θ = inclinación del tornillo

Entonces, para calcular el parámetro de avance (P) se utiliza la siguiente fórmula:

$$P = P_x * N_h$$

$$\tan(\alpha) = \frac{\pi * \theta_2}{P} \quad ; \quad \tan(\beta) = \frac{\pi * \theta_3}{P}$$

La potencia teórica de la turbina de Arquímedes según los autores Ramos, Ramos y Sánchez (2020) es:

$$P_{teórica} = \rho * g * Q * H * (\tan(\alpha))^2$$

Siendo la tangente al cuadrado del ángulo exterior de la hélice la eficiencia del sistema.

Por otro lado, la demanda eléctrica es la razón a la que se consume electricidad en un lapso específico, denominado intervalo de demanda que generalmente es 15, 30 o 60 min, se mide en kW. Estos datos son utilizados posteriormente para la

elaboración de un perfil de carga, que sirve para conocer el comportamiento de la energía consumida por un usuario en un periodo de tiempo generalmente un día (Sector-Electricidad, 2017).

La demanda máxima eléctrica significa la máxima conjunción de cargas eléctricas en un instante del tiempo, es decir, la demanda máxima corresponde a una estimación instantánea, en unidades de potencia. No es igual encender una línea de cargas al mismo tiempo que hacerlo en forma escalonada (Ávalos, 2016).

Para el siguiente autor la demanda eléctrica es la intensidad de corriente, o potencia eléctrica, relativa a un intervalo de tiempo específico, que absorbe una determinada carga para funcionar, la cual es expresada en kW que requiere una vivienda rural para ser dotada de servicio público de electricidad y permitir el desarrollo económico y tecnológico de sus habitantes (Ninantay, 2019).

En el caso del tipo de carga empleado, OSINERGMIN (2012) establece los Sectores de Distribución Típicos, para las viviendas en zonas rurales es el sector típico 4 – Urbano Rural. Y conforme a la “Calificación Eléctrica para la Elaboración de Proyectos de Subsistemas de Distribución Secundaria” emitida por el Ministerio de Energía y Minas - MINEM (2004) en el cuadro N°1 de este documento se indica que a las agrupaciones de viviendas en zonas rurales les corresponde un suministro monofásico mínimo de 200 W, inciso “g” (Anexo 1).

III Metodología

3.1 Tipo y diseño de investigación

La investigación propuesta en este proyecto fue del tipo aplicada debido a que se diseñó el generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes utilizando conocimientos científicos encontrados en las bibliografías revisadas.

El nivel de investigación es descriptivo ya que se encarga de puntualizar las características del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes y de manera analítica se logró obtener la potencia teórica que producirá el diseño para satisfacer la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú.

Nuestra investigación en relación al diseño es no experimental pues la variable independiente no se manipula de manera previa para poder ver su resultado en la variable dependiente, se establece el análisis de la variable en el contexto original como las teorías relacionadas con el diseño de tornillos de Arquímedes para el análisis correspondiente en nuestra investigación la cual inicia con la búsqueda de los parámetros de diseño para que a partir de allí se inicie el modelamiento del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes en consideración a los cálculos matemáticos.

3.2 Variables y operacionalización

La variable independiente planteada en esta investigación fue “Generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes” (Anexo 2).

Se define como la máquina capaz de aprovechar la energía cinética y potencial del agua para generar energía eléctrica acoplándose mediante un generador.

La variable dependiente planteada fue Demanda eléctrica (Anexo 2).

Se define como la cantidad de energía que requiere uno o varios consumidores para hacer funcionar sus equipos eléctricos en un tiempo determinado.

3.3 Población, muestra y muestreo

La población son todas las viviendas rurales del Perú; mientras que la muestra fue el Caserío Tumi de Oro, Lambayeque. El muestreo fue del tipo no probabilístico, por conveniencia de los autores.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos que se emplearon para este proyecto fueron validados mediante una carta de presentación dirigida a 3 expertos ingenieros mecánicos y/o eléctricos colegiados (Anexo 3).

Análisis documental: se realizó una ficha de registro para la recolección de datos de caudales del Canal Garbanzal para realizar el diseño de la turbina de tornillo de Arquímedes (Anexo 4). Así también se hizo una ficha de registro para la recolección de datos de Calificación Eléctrica para vivienda rural, el cual nos permitió desarrollar nuestra variable dependiente (Anexo 5).

3.5 Procedimientos

Los pasos que se siguieron para la elaboración de la investigación son los siguientes:

Recolección de datos: se recolectaron los datos obtenidos gracias al análisis documental realizado, entre estos se encuentran los parámetros de diseño mínimos para la aplicación del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes obtenidos del expediente técnico de la obra: “MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO DEL CANAL GARBANZAL - SECTOR MAICILLO - MIRADOR ALTO - ENTRE UTM NORTE (9260587.89 - 9263733.62) Y ESTE (619570.01 - 618095.952), DISTRITO LAMBAYEQUE, PROVINCIA DE LAMBAYEQUE – LAMBAYEQUE” y los datos proporcionados por el Ministerio de Energía y Minas en la norma DGE: “CALIFICACIÓN ELÉCTRICA PARA LA ELABORACIÓN DE PROYECTOS DE SUBSISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA”.

Análisis de datos: en este paso se ordenaron y analizaron los datos recolectados en la sección anterior para un mejor análisis.

Diseñar el tornillo de Arquímedes: con los datos del potencial hidroeléctrico del caserío Tumi de Oro y datos obtenidos de tablas del MINEM donde se indica el consumo de viviendas rurales según la clasificación, se procedió a diseñar la turbina que genere la potencia que más se ajuste a sus requerimientos haciendo uso de la norma VDI 2221, cálculos matemáticos y modelamiento del diseño en el software Solidworks.

Realizar el presupuesto: se cotizó los precios de acuerdo con el mercado actual, con el fin de conseguir el presupuesto apropiado en consonancia con la realidad económica de los pobladores del caserío Tumi Oro – Lambayeque.

PROCEDIMIENTOS



Figura 5. Organización de los procedimientos.

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Método de análisis de datos

Luego de haber recolectado los datos con la técnica e instrumento indicados anteriormente se procedió a analizarlos. Los datos y resultados que se calcularon en esta investigación serán ordenados y analizados con la ayuda de tablas y gráficos para su fácil comprensión (estadística descriptiva). El software empleado para este análisis fue el Microsoft Excel ya que en este se puede aplicar estadística descriptiva, la cual es ideal para el desarrollo del proyecto.

3.7 Aspectos Éticos

Autonomía: La interpretación y discusión de los resultados obtenidos en el presente documento se elaboraron sin ningún tipo de sesgo o la interferencia de terceros que alteren la veracidad de la información.

Beneficencia: La investigación se presenta como fin beneficiar a población que carecen de energía eléctrica, tal es el caso de los pobladores que viven cercanas a canales de regadío, por ello el desarrollo de importancia.

No-maleficencia: Durante la recopilación de información y en la búsqueda de profesionales para una consultoría especializada se ha mantenido el valor de la empatía y el cuidado por el prójimo, rechazando categóricamente cualquier acto que atente contra la integridad.

Autenticidad: El presente trabajo ha realizado una búsqueda exhaustiva con relación a la variable y el problema de investigación, por lo que la solución que se presenta es propia de los investigadores y toda información extraída de otros documentos es debidamente citada en el capítulo de referencias.

IV Resultados

4.1 Evaluar el potencial hidroeléctrico en las viviendas rurales del Perú para el funcionamiento correcto del tornillo de Arquímedes.

Al evaluar el potencial hidroeléctrico de la muestra en el caserío de Tumi de Oro, ubicado en el departamento de Lambayeque entre el distrito de Lambayeque y el distrito de Mórrope, con coordenadas -6.665597707764698, -79.92545835291178. La siguiente *Figura 6*, mostró la ubicación del caserío en Google Maps.

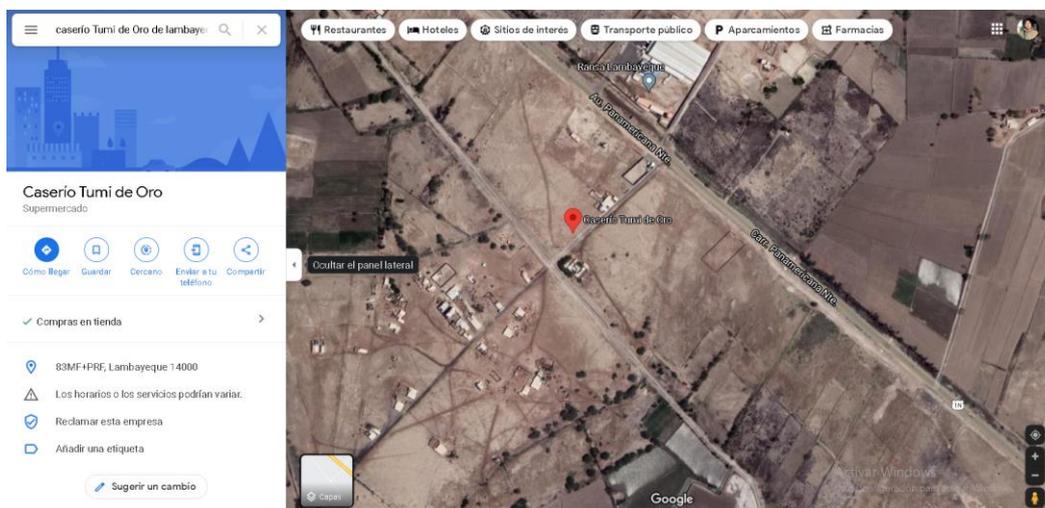


Figura 6. Caserío Tumi de Oro.

Fuente: Tomado de Google-Maps, (2021)

A pesar de que pasa la red eléctrica por la carretera Panamericana Norte, el caserío no cuenta con suministro eléctrico en su totalidad; además, las viviendas en el caserío Tumi de Oro están alejadas una de otras. Estas viviendas son calificadas como rurales y cuentan con el canal de riego Garbanzal del cual aprovechan su recurso hídrico en el tramo km 1+339.60 al km 1+612.00, dicho canal es una obra terminada del año 2018 el cual se presenta su expediente técnico “MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO DEL CANAL GARBANZAL - SECTOR MAICILLO - MIRADOR ALTO - ENTRE UTM NORTE (9260587.89 - 9263733.62) Y ESTE (619570.01 - 618095.952), DISTRITO LAMBAYEQUE, PROVINCIA DE LAMBAYEQUE – LAMBAYEQUE” como se muestra en la *Figura 7* en el portal Organismo Supervisor de las Contrataciones del Estado OSCE y del Sistema electrónico de Contrataciones del Estado (SE@CE, 2021).

Convocatoria

Información General

Momenclatura: LP-SM-2-2019-MPL/CS-1

N° Convocatoria: 1

Tipo Compra o Selección: Por la Entidad

Normativa Aplicable: Ley N° 30225 - Ley de Contrataciones del Estado

Versión SEACE: 3

Identificador Convocatoria: 470682

Información general de la Entidad

Entidad Conociente: MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE LAMBAYEQUE

Dirección Legal: AV. BOLIVAR N°400 (LAMBAYEQUE-LAMBAYEQUE-LAMBAYEQUE)

Página Web:

Teléfono de la Entidad:

Información general del procedimiento

Objeto de Contratación: Obra

Descripción del Objeto: EJECUCION DE LA OBRA "MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE AGUA EN CASERIO TUMI DE ORO"

Valor Estimado / Valor Referencial: 3,318,408.66 Soles

Monto del Derecho de Participación: GRATUITO

Monto del costo de Reproducción de las Bases: 193.80

Cronograma

Etapa	Fecha Inicio	Fecha Fin
Convocatoria	24/09/2018	24/09/2018
Registro de participantes (Electronical)	27/09/2018 00:01	22/10/2018 07:59
Formulación de consultas y observaciones (Presencial) A TRAVES DE PESA DE PARTES DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE LAMBAYEQUE AV.BOLIVAR N°400	27/09/2018 07:30	11/09/2018 15:30
Atribución de consultas y observaciones A TRAVES DEL SEACE	25/09/2018	25/09/2018
Integración de las Bases A TRAVES DEL SEACE	05/10/2018	05/10/2018
Presentación de ofertas: En Salas de Actor de la Municipalidad Provincial de Lambayeque, sito en Av. Bolívar N°400 Lambayeque.	22/10/2018 08:00	22/10/2018
Evaluación y calificación de ofertas: A TRAVES DEL SEACE	22/10/2018	22/10/2018
Otorgamiento de la Buena Pro A TRAVES DEL SEACE	22/10/2018 13:00	22/10/2018

Entidad Contratante

N° RUC	Entidad Contratante
20179192324	MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE LAMBAYEQUE

Figura 7. Expediente de mejora del servicio de agua en Caserío Tumi de Oro.

Fuente: Tomado del portal SE@CE, (2021)

Del expediente técnico de esta obra, en su carpeta 6: DISEÑO HIDRÁULICO Y ESTRUCTURAL se obtuvo la Tabla 1 de características geométricas e hidráulicas del canal Garbanzal, y que de acuerdo con la ubicación de la muestra el caserío Tumi de Oro – Lambayeque en el tramo km 1+339.60 al km 1+612.00, señala los parámetros de caudal de 1.2 m³/s, velocidad 0.59 m/s y el flujo es laminar.

Tabla 1. Características geométricas e hidráulicas de canal Garbanzal.

PROGRESIVA INICIAL	PROGRESIVA FINAL	Q (m ³ /s)	b (m)	S	y (m)	H (m)	B.L	V (m/s)	A (m ²)	T (m)	R (m)	p (m)	Régimen
0+000.00	0+229.5	1.7	1	0.00025	1.08	1.6	0.52	0.76	2.24	3.15	0.55	4.04	Laminar
0+229.5	0+873.49	1.2	0.8	0.00025	0.97	1.6	0.63	0.7	1.72	2.74	0.49	3.55	Laminar
0+873.49	1+339.60	1.2	0.8	0.00094	0.7	1.6	0.9	1.14	1.05	2.2	0.38	2.78	Laminar
1+339.60	1+612.00	1.2	0.8	0.00025	0.97	1.6	0.63	0.59	1.72	2.74	0.49	3.55	Laminar
1+612.00	3+878.00	0.6	0.6	0.00025	0.76	1.5	0.74	0.59	1.02	2.11	0.37	2.74	Laminar

Fuente: Tomado de expediente técnico en SE@CE, (2021).

La siguiente Figura 8 muestra el estiaje del canal Garbanzal, cabe resaltar que estos parámetros fueron medidos entre los años 2010-2013 por la Junta de Usuarios de Chancay - Lambayeque (2021), para estimar los caudales promedios mensuales suministrados de forma controlada y estas magnitudes seguían siendo válidas hasta la fecha de cierre de esta investigación.

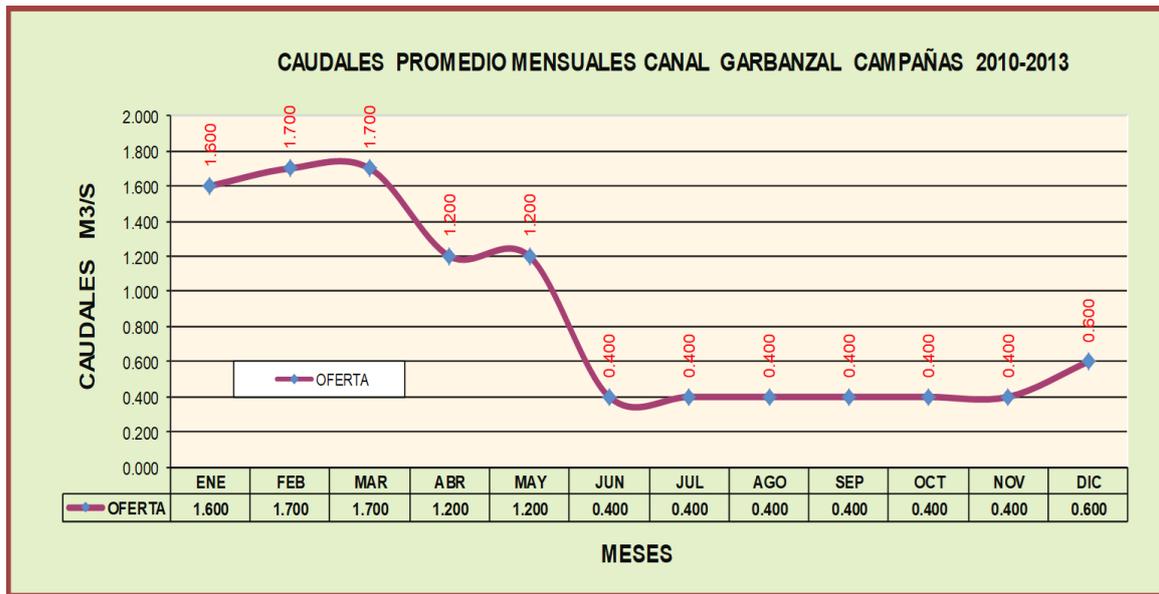


Figura 8. Parámetro de estiaje para el diseño de generador hidroeléctrico basado en tornillo de Arquímedes.

Fuente: Tomado de expediente técnico en SE@CE, (2021).

De lo anterior asumimos que el caudal mínimo del canal Garbanzal es de 0.4 m³/s. Por otro lado, el expediente técnico nos menciona que la obra incluyó la construcción de 37 tomas laterales y/o prediales, ubicadas en los márgenes izquierdo y derecho a lo largo del canal Garbanzal; así también, en los planos del expediente técnico se pudieron visualizar las dimensiones civiles de dichas tomas laterales rectangulares de 0.5m de ancho y con 1.34m de alto con respecto a la ubicación entre los tramos km 1+339.60 al km 1+612.00 que nos dio una percepción del espacio para poder implementar el generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes tal y como se muestra en la *Figura 9* y *Figura 10*.

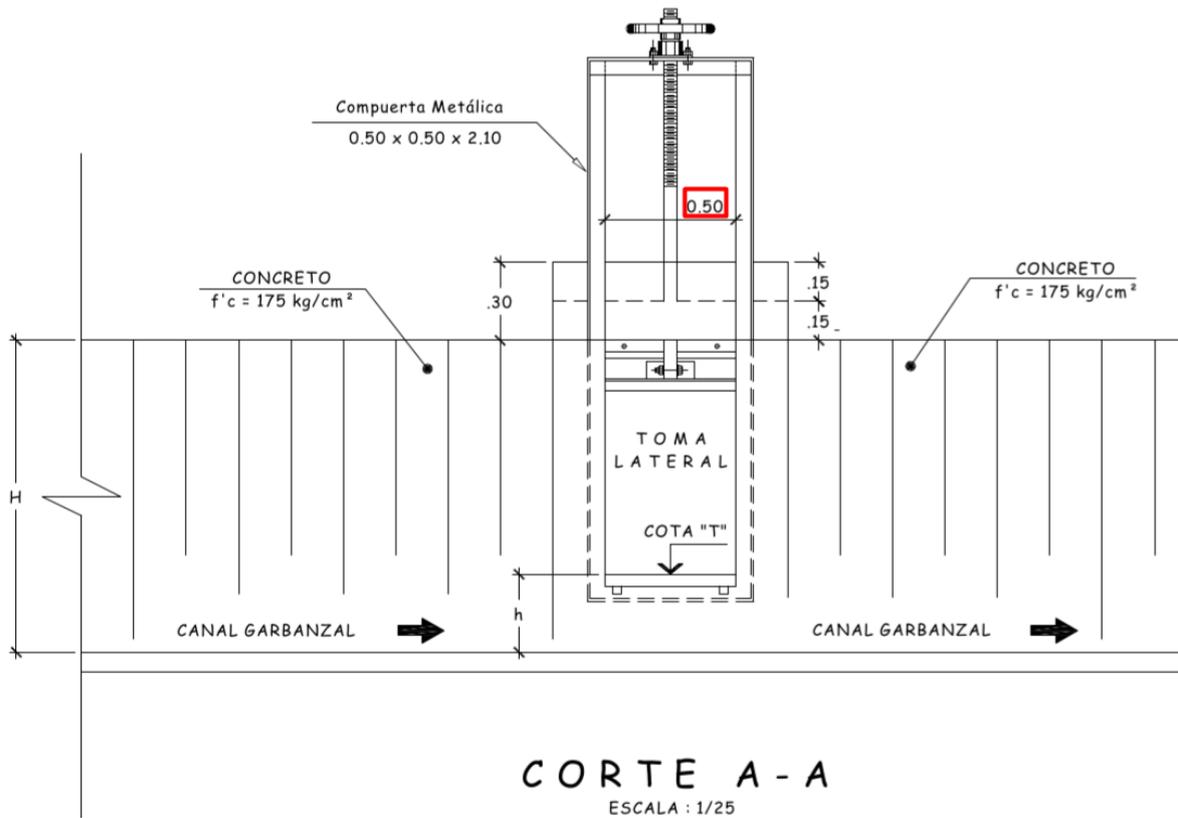


Figura 9. Plano de Corte A – A, de toma lateral del canal Garbanzal.

Fuente: Tomado de expediente técnico en SE@CE, (2021).

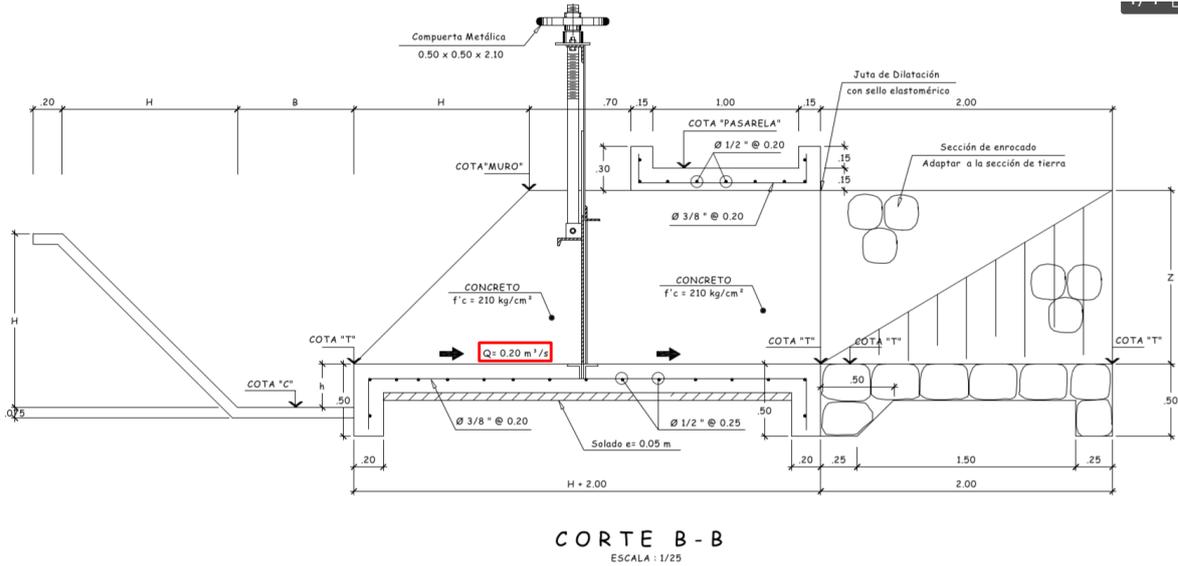


Figura 10. Plano de Corte B – B, de toma lateral del canal Garbanzal.

Fuente: Tomado de expediente técnico en SE@CE (2021).

El caudal máximo que recorre a través de estas tomas laterales rectangulares es de 0.2 m³/s como se aprecia en la *Figura 11*, a su vez esta magnitud pudo ser controlada mediante una compuerta metálica.

T O M A S L A T E R A L E S										
N°	KM	MARGEN	NOMBRE DE TOMA	CAUDAL M3/S	COTA "C"	COTA "T"	"h" (T - C)	COTA SUP MURO	COTA PASARELA	ALTURA "Z"
1	0+041.400	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	48.523	48.543	0.020	50.123	50.273	1.58
2	0+229.500	M.I.	TOMA LATERAL MAICILLO	0.500	48.476	48.476	0.000	50.076	50.226	1.60
3	0+352.500	M.I.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	48.446	48.913	0.467	49.946	50.096	1.03
4	0+580.800	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	48.387	48.540	0.153	49.887	50.037	1.35
5	0+623.000	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	48.378	48.572	0.194	49.878	50.028	1.31
6	0+777.600	M.I.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	48.339	48.813	0.474	49.839	49.989	1.03
7	0+904.400	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	48.313	48.870	0.557	49.813	49.963	0.94
8	0+904.400	M.D.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	48.313	48.742	0.429	49.813	49.963	1.07
9	1+559.700	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	48.048	48.211	0.163	49.548	49.698	1.34
10	1+577.000	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	48.044	48.676	0.632	49.544	49.694	0.87
11	1+612.000	M.I.	TOMA LATERAL GUAYABO	0.600	48.035	48.198	0.163	49.335	49.485	1.14
12	1+614.200	M.I.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	48.034	48.197	0.163	49.334	49.484	1.14
13	1+807.000	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.987	48.517	0.530	49.287	49.437	0.77
14	1+832.000	M.I.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	47.980	48.383	0.403	49.280	49.430	0.90
15	2+023.000	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.932	48.445	0.513	49.232	49.382	0.79
16	2+074.000	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.919	48.399	0.480	49.219	49.369	0.82
17	2+126.200	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.906	48.226	0.320	49.206	49.356	0.98
18	2+129.400	M.I.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	47.906	48.371	0.465	49.206	49.356	0.83
19	2+262.500	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.872	48.343	0.471	49.172	49.322	0.83
20	2+280.500	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	47.868	48.353	0.485	49.168	49.318	0.82
21	2+376.500	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.844	48.374	0.530	49.144	49.294	0.77
22	2+451.500	M.I.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	47.825	48.289	0.464	49.125	49.275	0.84
23	2+483.500	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.817	48.246	0.429	49.117	49.267	0.87
24	2+571.500	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	47.795	48.280	0.485	49.095	49.245	0.82
25	2+585.500	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.792	48.299	0.507	49.092	49.242	0.79
26	2+666.000	M.I.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	47.771	48.281	0.510	49.071	49.221	0.79
27	3+027.000	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	47.681	48.226	0.545	48.981	49.131	0.75
28	3+165.500	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	47.647	48.138	0.491	48.947	49.097	0.81
29	3+167.000	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.646	48.138	0.492	48.946	49.096	0.81
30	3+300.500	M.D.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	47.623	48.114	0.491	48.923	49.073	0.81
31	3+394.500	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	47.589	48.003	0.414	48.889	49.039	0.89
32	3+445.500	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.577	47.949	0.372	48.877	49.027	0.93
33	3+576.000	M.I.	TOMA PREDIAL CON RETENCIÓN	0.200	47.544	48.007	0.463	48.844	48.994	0.84
34	3+767.500	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	47.496	47.936	0.440	48.796	48.946	0.86
35	3+832.000	M.I.	TOMA PREDIAL	0.200	47.480	47.893	0.413	48.780	48.930	0.89
36	3+838.500	M.D.	TOMA PREDIAL	0.200	47.478	47.878	0.400	48.778	48.928	0.90
37	3+878.000	CENTRO	TOMA LATERAL MIRADOR	0.200	47.468	47.778	0.310	48.768	48.918	0.99

Figura 11. Parámetros geométricos e hidráulicos - tomas laterales canal Garbanzal.
Fuente: Tomado de expediente técnico en SE@CE, (2021).

4.2 Modelar el generador hidroeléctrico de bajo caudal para satisfacer la potencia que cubra la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú.

El modelamiento del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes le sucedió al resultado en el que se evaluó el potencial hidroeléctrico (cláusula anterior) con la finalidad de satisfacer la demanda eléctrica en las viviendas del Caserío Tumi de Oro - Lambayeque, en el cual se consideró realizar el diseño en una toma lateral del canal Garbanzal de acuerdo con sus características geométricas e hidráulicas, de tal manera que se utilice eficientemente el caudal al confinar el diseño en esta estructura civil y se obtenga un caudal estable puesto que el estiaje del canal Garbanzal es de 0.4 m³/s y el

caudal máximo que proporciona en todas sus tomas laterales al abrir su compuerta metálica es de 0.2 m³/s. Así también, para realizar el modelo se decidió emplear la norma VDI 2221 como metodología de diseño, ya que permitió realizar un conjunto de procesos y actividades de toma de decisiones que determinó la forma y así proponer la solución mediante cálculos matemáticos. Por último, se procedió a realizar el modelo en el software Solidworks.

4.2.1 Lista de requerimientos:

Para generar electricidad a partir del potencial hidro eléctrico del caserío Tumi de Oro se tuvo que considerar lo siguiente para el diseño:

POTENCIA	200W.
GEOMETRÍA	Las dimensiones de una toma lateral del Canal Garbanzal son 0.5 m de ancho, 2.5 m de largo, 1.34 m de alto.
SUMINISTRO HÍDRICO	0.2 m ³ /s.
MATERIAL	Ligero para estimar el mejor costo.
SEGURIDAD	Resistente para que trabaje continuamente.
FABRICACIÓN	Recursos disponibles en el mercado.
ERGONOMÍA	Fácil transporte.
MATENIMIENTO	Fácil, sencillo y rápido; además, para que el tiempo de su mantenimiento no sea excesivo solo se requiere de pocas herramientas.
MONTAJE	El diseño debe tener un práctico ensamble y fácil acceso a sus piezas.
OPERACIÓN	El diseño debe ser operada de forma autónoma.
PRESUPUESTO	El diseño debe ser tal que el poblador de la vivienda rural pueda adquirirlo sin afectar su solvencia económica.

4.2.2 Estructura de funciones.

Como sustento de lo anterior se definieron los requisitos que debe tener en cuenta el diseño. Por esta razón, la metodología VDI 2221 identificó la interrelación del diseño con el entorno usando la caja negra.

Caja Negra (Black-Box): es una manera de conceptualizar de forma simple el diseño, para lo cual se tomó en consideración las principales entradas y las salidas

del sistema. En cuanto a los parámetros principales se consideró a la materia, energía e información como se muestra en la *Figura 12* y la Tabla 2, el diseño fue representado por el generador hidroeléctrico basado en tornillo de Arquímedes con sus parámetros principales de entrada y salida.



Figura 12. Caja negra para el diseño del generador hidroeléctrico

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Principales entradas y salidas.

PARÁMETROS PRINCIPALES	
ENTRADA	SALIDA
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materia: Caudal ▪ Energía: Cinética, Potencial. ▪ Información: Potencia de salida de acuerdo con la calificación eléctrica de vivienda rural. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materia: Caudal ▪ Energía: 220V – 60 Hz. ▪ Información: Demanda eléctrica de vivienda rural satisfecha.

Fuente: Elaboración propia.

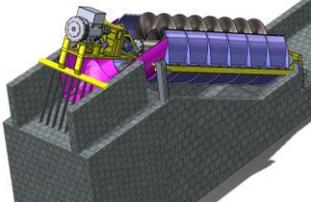
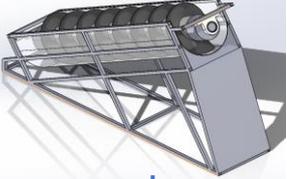
4.2.3 Conceptos de solución.

Matriz morfológica.

En la siguiente Tabla 3 corresponde a la matriz morfológica donde se mostró 3 alternativas de diseño que cumplen el mismo principio físico de generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes. Esta metodología para el diseño comparó las alternativas y así se obtuvo la mejor solución para satisfacer la demanda eléctrica de las viviendas rurales en el caserío Tumi de Oro.

Tabla 3. Matriz morfológica.

FUNCIONES	ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3

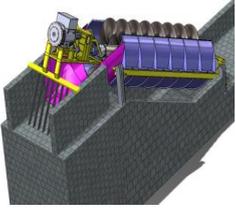
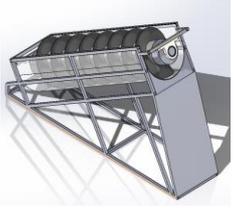
			
Ubicación	En el canal principal	Sobre canal principal	Derivación del canal
Material	PVC rígido	Polietileno	Metal.
Inclinación	Regulable	Fijo	Difícil de regular
Transporte	Fácil	Difícil	Con ayuda
Fabricación	Fácil	Difícil	Solo especialistas
Modificaciones en el canal	Ninguna	Parcial	Total
Instalación	Fácil	Difícil	Solo especialistas
Mantenimiento	Fácil	Difícil	Solo especialistas
Uso del Caudal	Total	Parcial	Ninguno

Fuente: Elaboración Propia.

Del cuadro morfológico se pudo resaltar las ventajas y desventajas que contrae cada alternativa tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de alternativas.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ALTERNATIVA 1 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Variación de ángulo de inclinación según la necesidad. ▪ Transportable a diferentes lugares. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevado costo de fabricación. ▪ Modificación parcial del canal para la instalación. ▪ Complejidad en su fabricación. ▪ Difícil mantenimiento

<p style="text-align: center;">ALTERNATIVA 2</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evita que desperdicios ingresen a la turbina. ▪ Mayor estabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevado costo de fabricación. ▪ Estructura pesada. ▪ Necesita una infra estructura civil. ▪ De fabricación compleja. ▪ Necesita expertos para su implementación. ▪ Necesita de expertos para el mantenimiento.
<p style="text-align: center;">ALTERNATIVA 3</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sencillo de transportar a diferentes lugares. ▪ Materiales disponibles. ▪ Fabricación sencilla. ▪ Fácil y rápida instalación. ▪ Bajos costos de fabricación. ▪ Fácil mantenimiento ▪ No necesita modificar la infraestructura del canal. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Presencia de corrosión del material en el soporte. ▪ No evita desperdicios que podrían ingresar a la turbina.

Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de soluciones obtenidas.

Para la selección óptima entre las tres alternativas del cuadro morfológico se realizó una evaluación según criterios económicos y técnicos mostradas en la Tabla 5 y Tabla 6 con la ayuda del programa Microsoft Excel, posteriormente se graficó los resultados para una mejor visualización de cómo se distribuyeron los datos. Para ambas tablas la magnitud “p” es el peso de la consideración a evaluar y “q” es la magnitud asignada que varía entre 0 a 4, donde 0 es pésima calificación y 4 es una óptima calificación.

Tabla 5. Valor Técnico.

VALOR TÉCNICO		IDEAL SOLUCIÓN		A1		A2		A3	
CRITERIOS DE EVALUACIÓN	p=10	q	p*q =40	q	p*q	Q	p*q	q	p*q
BAJO COSTO	3	4	12	1	3	1	3	4	12

FACIL FABRICACIÓN	2	4	8	2	4	1	2	3	6	
EFICIENCIA	2	4	8	3	6	4	8	3	6	
FÁCIL MONTAJE	0.8	4	3.2	1	0.8	1	0.8	3	2.4	
FÁCIL INSTALACIÓN	0.5	4	2	2	1	1	0.5	4	2	
FACIL USO	0.5	4	2	2	1	2	1	3	1.5	
SEGURIDAD	0.5	4	2	4	2	4	2	2	1	
FACIL MANTENIMIENTO	0.5	4	2	2	1	4	2	2	1	
ERGONÓMICO	0.2	4	0.8	1	0.2	1	0.2	4	0.8	
Máximo Puntaje					19		19.5		32.7	
Porcentaje Técnico					0.27		0.27		0.46	

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 5 podemos apreciar, que tuvo más relevancia la alternativa 3 de acuerdo a los criterios técnicos con un porcentaje de 46%.

Tabla 6. Valor Económico.

VALOR ECONÓMICO		IDEAL SOLUCIÓN		A1		A2		A3		
CRITERIOS DE EVALUACIÓN	p=10	q	p*q =40	q	p*q	q	p*q	q	p*q	
COSTO DE MATERIAL	3	4	12	1	3	1	3	4	12	
COSTO DE FABRICACIÓN	2.5	4	10	2	5	1	2.5	3	7.5	
COSTO DE INSTALACIÓN	1.5	4	6	1	1.5	1	1.5	4	6	
COSTO DE MANTENIMIENTO	1	4	4	2	2	1	1	3	3	
COSTO DE REPUESTOS	1	4	4	1	1	1	1	3	3	
COSTO DE OPERACIÓN	1	4	4	2	2	1	1	4	4	
Máximo Puntaje					14.5		10		35.5	
Porcentaje Económico					0.24		0.17		0.59	

Fuente: Elaboración propia.

Y, de la Tabla 6 destacó la alternativa 3 de acuerdo con los criterios económicos con un porcentaje del 59%.

Por lo tanto, en la *Figura 13* se plasmó los resultados de las tablas anteriores en un diagrama radial del software Microsoft Excel, y se visualizó como resultado de acuerdo a los criterios técnicos – económicos, la alternativa 3 como la óptima para la investigación.

Evaluación Técnica - Económica

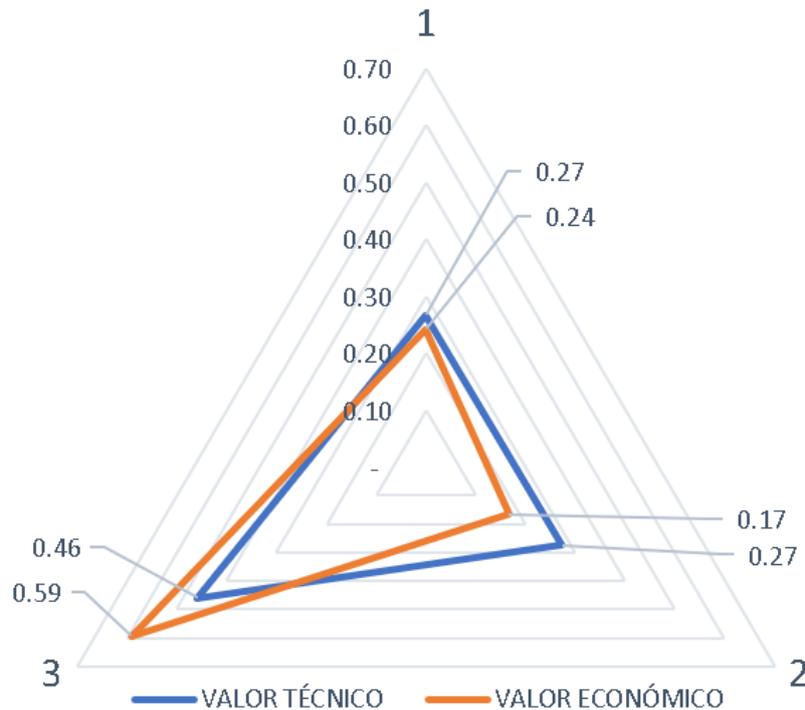


Figura 13. Evaluación técnica - económica.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Definición de la solución óptima.

Conforme al gráfico de evaluación técnico-económica, se visualizó con certeza que la óptima solución es la alternativa 3; obteniendo mejores ventajas en cuanto a costos, fabricación, mantenimiento e instalación. Dicha alternativa está compuesta por materiales de PCV rígido tanto su eje y sus hélices, así también para obtener una inclinación no se requirió de una infraestructura civil por ello se optó por una estructura metálica que ocupó el espacio de la toma lateral del canal Garbanzal y confinó el caudal, soldando una chapa metálica en la estructura para que el agua ingrese de forma constante como un vertedero en la parte principal del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes. Del mismo modo se seleccionó algunos componentes de acuerdo con cálculos teóricos como rodamientos, eje hueco, caja multiplicadora y generador. Por último, el diseño debe tener una potencia en su salida de 200W en alusión a la norma DGE: Calificación Eléctrica para la Elaboración de Proyectos de Subsistemas de Distribución Secundaria.

4.2.5 Cálculos matemáticos de tornillo de Arquímedes.

4.2.5.1 GEOMETRÍA DEL TORNILLO

En la *Figura 14* se observan las dimensiones principales del tornillo de Arquímedes y en la *Figura 15* los parámetros propios de la hélice: el ángulo exterior (α) y el ángulo interior (β).

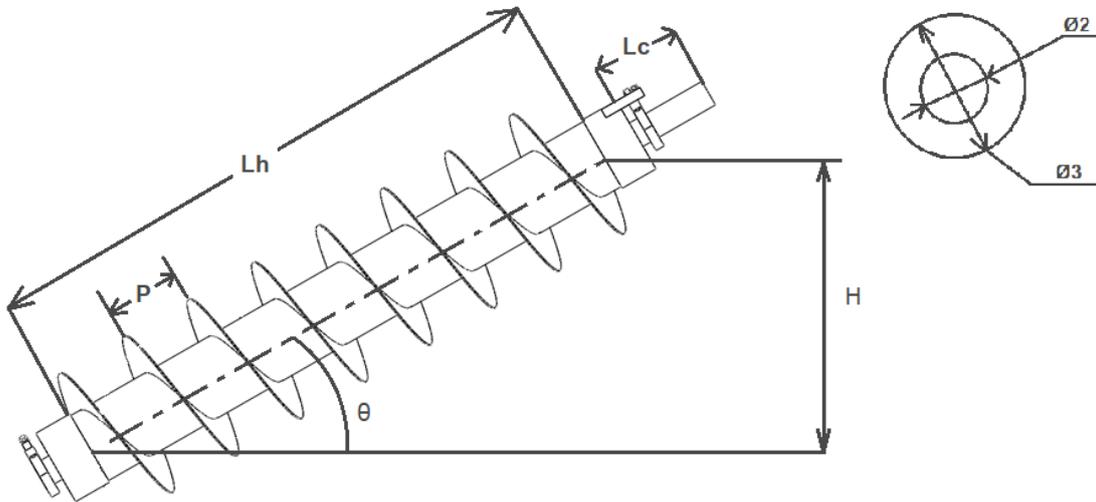


Figura 14. Esquema del tornillo de Arquímedes de 1 hilo.

Fuente: Elaboración propia.

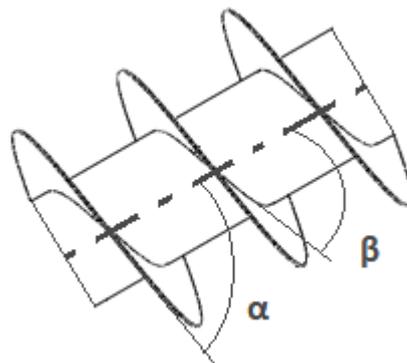


Figura 15. Esquema de los ángulos de hélice.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- Q es el caudal de agua.
- H es la altura del salto.
- P_x es el paso del tornillo.
- N_h es el número de hilos.
- L_h es la longitud de la hélice.
- L_c es la longitud complementaria del eje.
- \emptyset_1 es el diámetro de eje de los rodamientos.
- \emptyset_2 es el diámetro del eje.
- \emptyset_3 es el diámetro de hélice.

- α es el ángulo exterior de hélice.
- β es el ángulo interior de hélice.
- θ es el ángulo de inclinación del tornillo.

Los ángulos internos y externos de la hélice se pudieron relacionar debido a que la composición del tornillo lo permitió, esto conllevó a obtener el avance en la siguiente formula:

$$P = P_x \times N_h \quad (1)$$

A su vez se consideró el material de PVC rígido y el espesor de la hélice de 6 mm permitió que la fricción del agua sea casi cero; además, se tuvo en consideración la siguiente relación indicada por Rorres (2000) para el parámetro óptimo en la construcción de nuestro diseño.

$$\frac{\phi_2}{\phi_3} \approx 0,5 \quad (2)$$

De la relación de diámetros en la ecuación 2, podemos asumir que el tornillo de Arquímedes debe tener 1 hilo según el autor mencionado del párrafo anterior. Otro aspecto a tener en cuenta, según los autores Weking y Sudarmojo (2019) es que la velocidad rotacional y el torque tienen relación directa con la velocidad y la fuerza tangencial que se ejerce en el tornillo. También se calculó la longitud complementaria del eje que es la octava parte de la longitud de la hélice, en nuestro caso, esta longitud complementaria es el eje superior de mayor sección acoplado a las tapas finales del eje hueco, esta longitud permitió que el agua no impacte con los equipos que están ubicados en la parte superior (multiplicador y generador).

Los valores de la densidad del agua y de la gravedad son de 998,2 kg/m³ y 9,81 m/s² respectivamente, a su vez se pusieron condiciones estándares de presión de 1 atm y temperatura ambiente puesto que el lugar de estudio se ubica a nivel del mar. Para los autores Dellinger et al. (2018) y Khan et al. (2019) la inclinación óptima del tornillo de Arquímedes es de 30°, es por ello que se asumió este dato.

Para fines analíticos, se asumió que el área de contacto del agua con la turbina de tornillo de Arquímedes, equivale al 50% del área de la sección plana – circular de la hélice, lo anterior se puede asegurar porque la ficha de registro de caudales del Canal Garbanzal anexada indica un estiaje de 0.4 m³/s lo cual garantizó que nuestra toma lateral sea abastecida con un caudal máximo a compuerta abierta de 0.2 m³/s, y el cual puede ser regulado partiendo del caudal teórico calculado hasta nuestra necesidad sin desbordamientos.

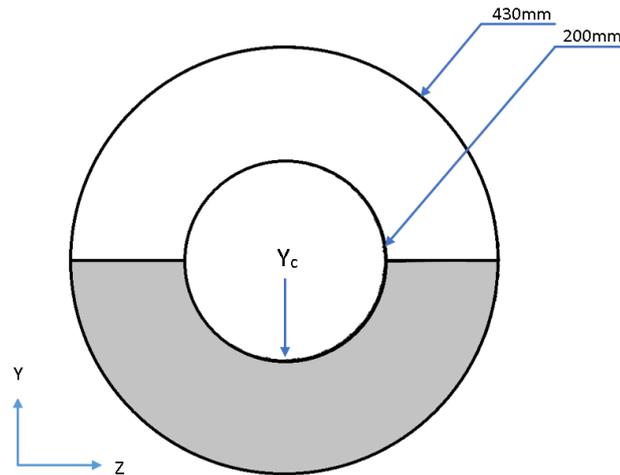


Figura 16. Cálculo del nivel de agua en la turbina para un 50% de contacto.

Fuente: Elaboración propia

Para determinar el área de contacto se usó la expresión 3, en función de los diámetros de la hélice y el eje:

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{4} \times \phi_3^2 - \frac{\pi}{4} \times \phi_2^2 \right) \quad (3)$$

Reduciendo la expresión anterior se aplicó la ecuación 2 y se obtuvo lo siguiente:

$$A = \frac{3\pi}{32} \phi_3^2 \quad (4)$$

Para determinar el centroide en el área de contacto del semicírculo, se determinó por la siguiente tabla:

Tabla 7. Cálculo del centroide del semicírculo.

Componente	Área (m ²)	y _c	Área*y _c
Semicírculo (R)	$\frac{\pi * R^2}{2}$	$\frac{4 * R}{3 * \pi}$	$\frac{2 * R^3}{3}$
Semicírculo (r)	$-\frac{\pi * r^2}{2}$	$\frac{4 * R}{3 * \pi}$	$-\frac{2 * r^3}{3}$
	$\sum \text{Área} = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{2}$		$\sum \text{Área} = \frac{2(R^3 - r^3)}{3}$

Fuente: Elaboración propia.

El centroide de los semicírculos ϕ_3 y ϕ_2 :

$$Y_c = \frac{4\phi_2}{3\pi} = \frac{4\phi_3}{6\pi}$$

El centroide del área de contacto se determinó con la sumatoria de las áreas multiplicada por los centroides y dividido por la sumatoria de las áreas, como expresa la siguiente fórmula:

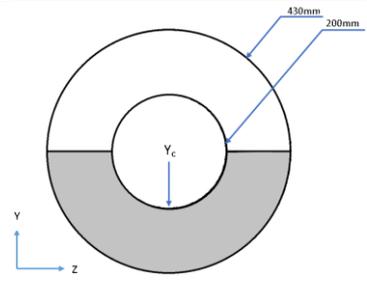
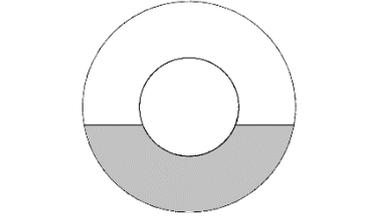
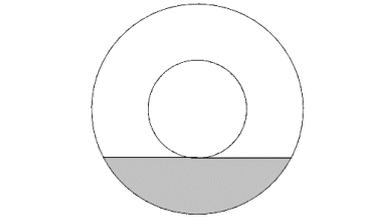
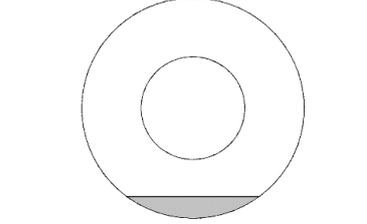
$$\sum Y_c = \frac{\sum \text{Área} \times Y_c}{\sum \text{Área}}$$

Esta ecuación se redujo aplicando la relación de diámetros de acuerdo a la ecuación 2:

$$\sum Y_c = 0,24755\phi_3 \quad (5)$$

La siguiente Tabla 8 demostró el centroide de acuerdo al porcentaje del área contacto del agua, en función del diámetro de la hélice:

Tabla 8. Centroides de acuerdo al porcentaje de contacto.

Área de contacto	Área	Porcentaje	y_c
	$A = \frac{3}{8}\pi R^2$	50%	$Y_c = 0,24755\phi_3$
	$A = \frac{3}{10}\pi R^2$	40%	$Y_c = 0.30185\phi_3$
	$A = \frac{9}{40}\pi R^2$	30%	$Y_c = 0.34535\phi_3$
	$A = \frac{3}{40}\pi R^2$	10%	$Y_c = 0.42355\phi_3$

Fuente: Elaboración propia.

La expresión para determinar el torque ejercido por el agua en el tornillo.

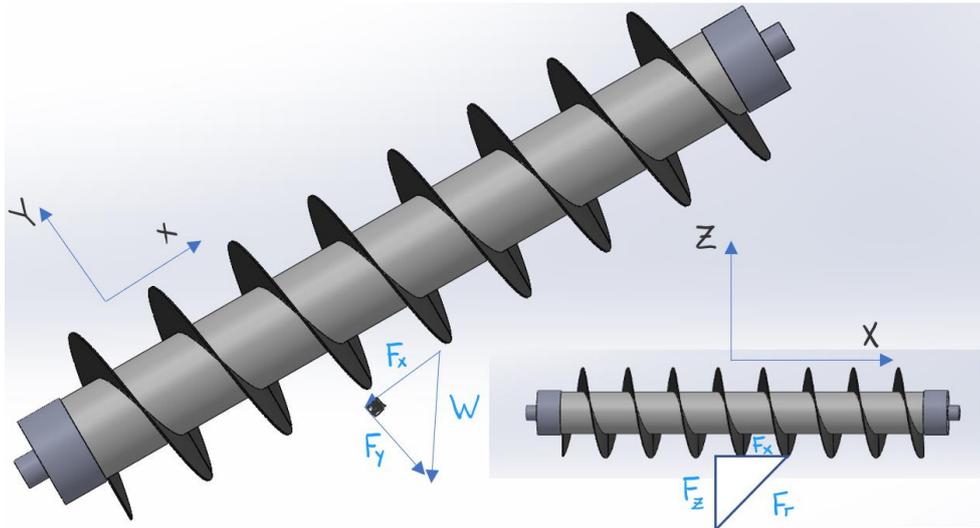


Figura 17. Tornillo de Arquímedes de 1 hilo esquemático.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

- F_x es la fuerza de empuje en dirección al eje X o axial al tornillo.
- F_y es la fuerza de empuje en dirección al eje Y o radial al tornillo.
- F_z es la fuerza de empuje en dirección al eje Z o tangencial al tornillo.
- F_r es la fuerza de empuje tangencial a la hélice.
- W es el peso del agua.
- A es el área de contacto del agua en el tornillo.
- ω es la velocidad angular.
- H es el salto.
- L_h es la longitud de la hélice.

Por relaciones trigonométricas resultaron las siguientes expresiones:

$$F_x = \rho \times g \times A \times P_x \times \sin \theta \quad (6)$$

$$F_z = \rho \times g \times A \times P_x \times \sin \theta \times \tan \alpha \quad (7)$$

$$T = F_z * Y_c = \rho \times g \times A \times L_h \times \sin \theta \times \tan \alpha \times Y_c \quad (8)$$

La velocidad de salida del agua y el ángulo α de inclinación de la hélice causan la rotación del tornillo.

$$\text{Velocidad del tornillo} = u = \omega * Y_c$$

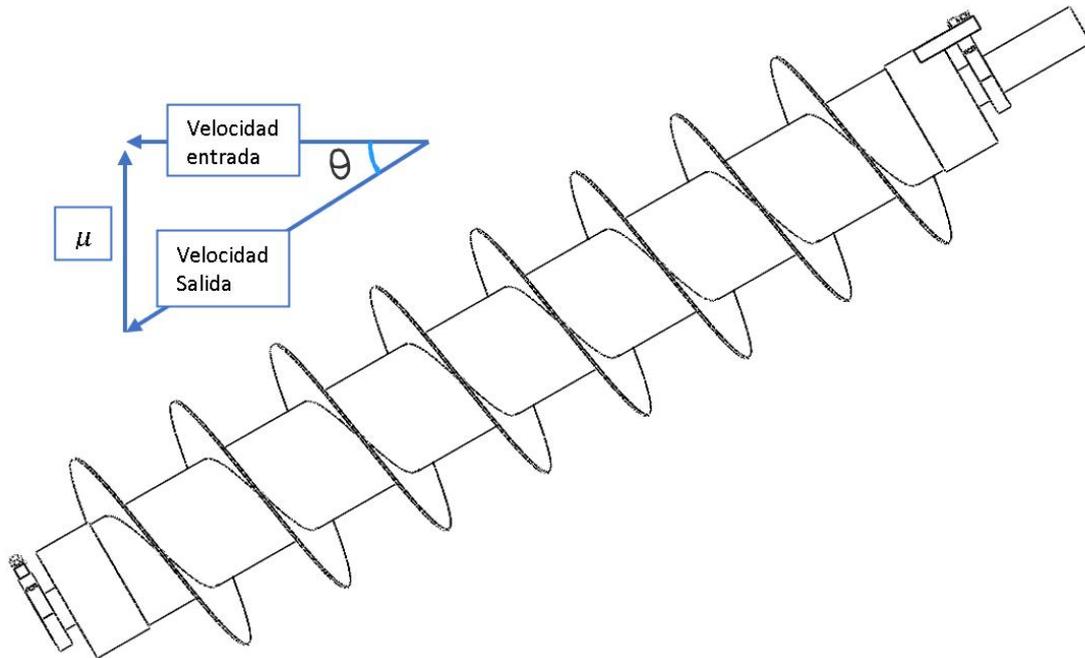


Figura 18. Vectores de velocidades del agua y tornillo.

Fuente: Elaboración propia.

$$\tan(\alpha) = u/Vel_{entrada}$$

$$u = Vel_{entrada} * \tan(\alpha) = \omega * Y_c$$

$$Vel_{entrada} = \frac{Q}{A}$$

$$\omega = \frac{Q \times \tan \alpha}{A \times Y_c} \quad (9)$$

La expresión para determinar la potencia teórica es:

$$P = T \times \omega \quad (10)$$

A su vez se dedujo que:

$$\sin \theta = \frac{H}{L_h} \quad (11)$$

Y reemplazando las expresiones 8, 9 y 11 en la expresión 10, se obtuvo la potencia expresada a continuación:

$$P = \rho \times H \times Q \times g \times (\tan(\alpha))^2 \quad (12)$$

Para determinar la eficiencia se tiene la siguiente expresión:

La potencia al 100% se da cuando $\alpha=45^\circ$ y cuando $\Theta=90^\circ$, por el motivo que estas magnitudes hicieron máximos las identidades trigonométricas. En ese caso la potencia se determinó con la siguiente expresión:

$$P_{100\%} = \rho \times H \times Q \times g$$

La eficiencia se determinó por:

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ teorica}{Potencia\ al\ 100\%} * 100\% \quad (13)$$

Si asumimos $\theta = 30^\circ$ y una eficiencia del tornillo del 80%

$$80\% = \frac{Potencia\ teorica}{Potencia\ al\ 100\%} * 100\% = \frac{\rho \times H \times Q \times g \times (\tan(\alpha))^2}{\rho \times H \times Q \times g} * 100\%$$

$$80\% = (\tan(\alpha))^2 * 1 \rightarrow \alpha \approx 42^\circ \quad (14)$$

Tomando como referencia a los autores Linsley y Franzini (1968) y Azevedo (1998), el caudal teórico máximo se halló con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2 * g} * L * h^{3/2}$$

Donde C_d es el coeficiente de descarga y su valor varía entre 0.55 a 0.65 por lo que se asumió un valor promedio de 0.6, g es la gravedad, L es el ancho del canal y h es la diferencia de alturas.

$$Q = 1.8 * L * h^{\frac{3}{2}}$$

En nuestro caso el ancho del flujo que ingresa a la turbina es ϕ_3 (diámetro de las hélices = 0.43m), el cual está acorde al ancho de la geometría de la toma lateral (0.5m) donde se situó el generador hidroeléctrico y la diferencia de alturas es $\frac{\phi_3}{2}$ (área de contacto es 50%). Por lo tanto, el caudal estará determinado por la siguiente expresión:

$$Q = 0.6364(\phi_3^{5/2}) \quad (15)$$

Se asumieron otros parámetros para el diseño, como el ángulo de inclinación que en las revistas científicas de los autores Dellinger et al. (2018) y Khan et al. (2019) se demuestra que un valor óptimo para diseñar el generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes es de 30° . En la toma lateral se cuenta con una altura de 1.34m y 0.5m de ancho, por ello, el tornillo se dimensiona de acuerdo con esta geometría, las hélices con un diámetro de 0.43m y el eje principal con 0.2m, la relación de estos diámetros es aproximadamente 0.5, y como indica el autor Rorres (2000) en su propia investigación, a esta relación le corresponde una turbina de un 1 hilo. Con respecto al salto se asumió 0.9m, medida que está dentro del límite de altura. Con las dimensiones anteriores se determinó la longitud de la hélice (ecuación 11). Finalmente, el caudal se determinó mediante la ecuación (15) que hace énfasis al ingreso del agua como un vertedero según los autores Linsley

y Franzini (1968) y Azevedo (1998). Todos estos parámetros se enlistan en la Tabla 9.

Datos de ingreso:

Tabla 9. *Valores asumidos.*

Ítem	Variable	Valor	Unidad
Salto	H	0.9	m
Angulo del tornillo	θ	30	°
Numero de hilos	N_h	1	Hilos
Diámetro de hélice	ϕ_3	0.43	m
Diámetro de eje	ϕ_2	0.2	m
Densidad de agua	ρ	998.2	kg/m^3
Gravedad	G	9.81	m/s^2

Fuente: Elaboración propia.

Haciendo uso de las ecuaciones anteriormente indicadas se procedió a obtener los resultados, tal como se muestra en la siguiente Tabla 10, que son los valores del diseño de la hélice y del tornillo de Arquímedes, posteriormente se determinaron los valores de diseño del multiplicador y del generador.

Tabla 10. *Valores de diseño determinados.*

Nombre	Variable	Unidad	Valor	Expresión usada
Eficiencia	η	-	0.80	13
Caudal	Q	m^3/s	0.077	15
Longitud de hélice	L_h	m	1.81	11
Longitud complementaria del eje	L_c	m	$0.125L_h$	-
Avance	P	m	0.2	1
Paso	P_x	m	0.2	1
Área de contacto	A	m^2	0.054	4
Centroide	Y_c	M	0.1064	5
Fuerza en X	F_x	N	52.879	6
Fuerza en Z	F_z	N	47.612	7
Torque	T	N.m	45.85	8

Velocidad angular	ω	rad/s	12.066	9
RPM	N	RPM	115.22	-
Potencia teórica	P_{teo}	W	553.23	12
Potencia de eje	P_{eje}	W	448.12	-
Eficiencia del multiplicador	N_m	-	0.95	Anexo 6
Eficiencia del generador	N_g	-	0.90	Anexo 8
Potencia del sistema	P	W	383.14	-

Fuente: Elaboración propia.

4.2.5.2 DISEÑO DE EJE PORTADOR DE LA HÉLICE Y EJES DE TRANSMISIÓN

Las magnitudes de momentos y fuerzas del agua fueron halladas y plasmadas en la Tabla 10. En este apartado se definieron las fuerzas y momentos sobre el eje.

Masa de la hélice:

$$W_h = \frac{\pi}{4} * (\phi_3^2 - \phi_2^2) * \frac{L_h}{P} * \rho_{polímero} * g * N * e \quad (16)$$

Masa del eje hueco

$$W_{e.hueco} = \frac{\pi}{4} * (\phi_2^2 - \phi_{interior}^2) * L_h * \rho_{polímero} * g \quad (17)$$

Las masas de las tapas de los extremos del eje hueco y sus respectivos ejes acoplados son:

$$W_{sup} = 10.684 \text{ kg}$$

$$W_{inf} = 5.398 \text{ kg}$$

Estos se obtuvieron del software Solid Works considerando el material acero ASTM A36, tal y como se aprecia en la *Figura 19* y *Figura 20*.

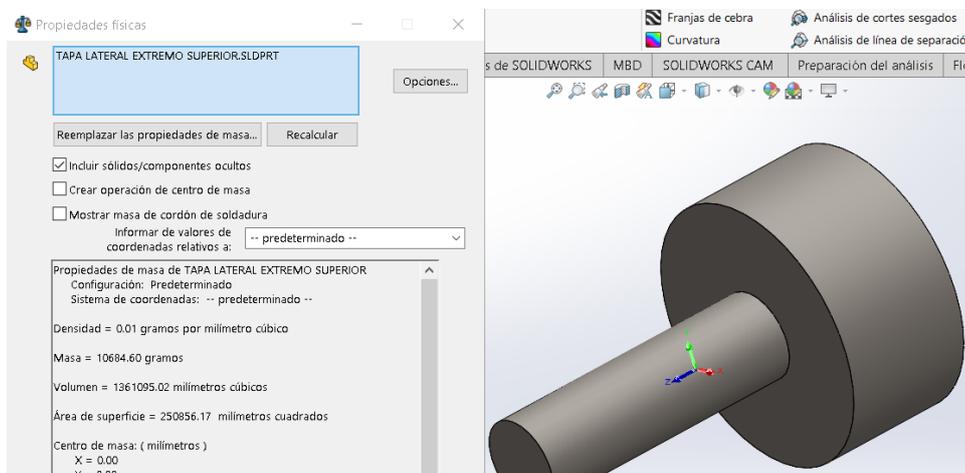


Figura 19. Propiedades de tapa y eje superior.

Fuente: Elaboración propia.

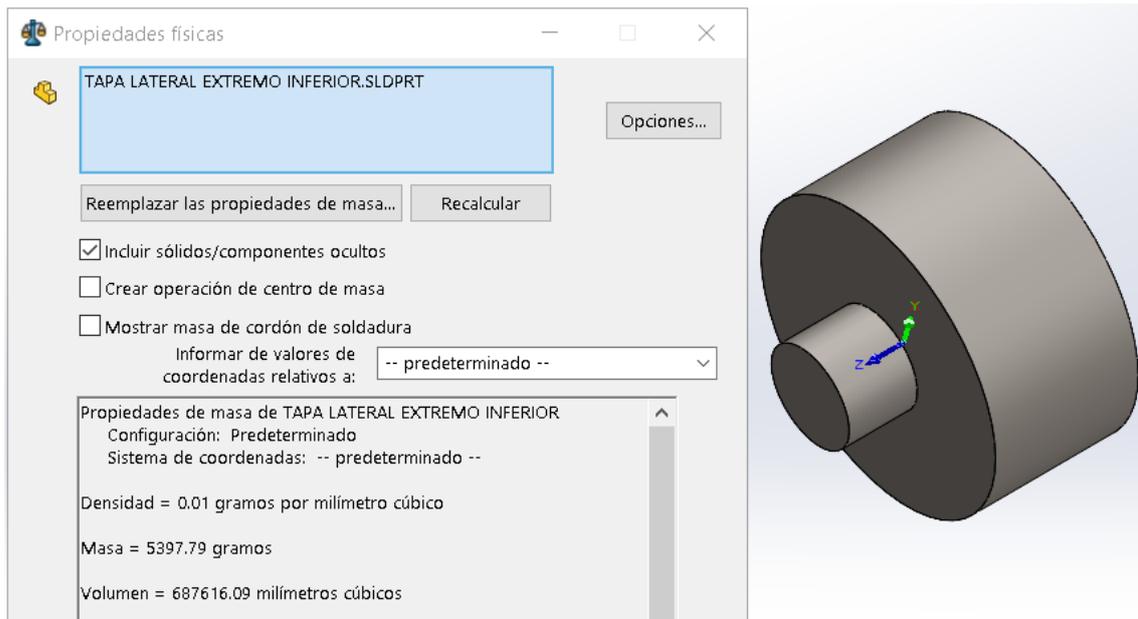


Figura 20. Propiedades de tapa y eje inferior.

Fuente: Elaboración propia.

De los valores hallados se determinó únicamente para el Paso.

Tabla 11. Cargas obtenidas para un paso (Px).

Carga	Variable	Valor	Unidad
Fuerza de empuje en x	F_x	52.87	N
Fuerza de empuje en y	F_y	91.57	N
Fuerza de empuje en z	F_z	47.61	N

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Propiedades y valores asumidos para eje hueco.

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Densidad del PVC rígido	$\rho_{PVC\ rígido}$	1300	kg/m ³
Diámetro interior del eje	$\Phi_{interior}$	0.1854	m
Longitud del eje superior	$L_{eje\ sup}$	0.225	m
Longitud del eje inferior	$L_{eje\ inf}$	0.05	m
Diámetro interior de rodamientos	$\Phi_{rod\ int}$	0.07	m

Fuente: Elaboración propia.

Las fuerzas de empuje se multiplican por L_h/P , tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 13. Valores de cargas a lo largo del tornillo.

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Fuerza de empuje en x en todo el tornillo	F_x	478.47	N
Fuerza de empuje en y en todo el tornillo	F_y	828.71	N
Fuerza de empuje en z en todo el tornillo	F_z	430.89	N
Masa de hélice	W_h	4.8	kg
Masa eje hueco	$W_{eje\ hueco}$	10.4	kg
Masa tapa + eje inferior	W_{inf}	0.7	kg
Masa tapa + eje superior	W_{sup}	1.4	kg

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de reacciones.

Se realizó el diagrama de cuerpo libre en los planos XZ y XY como se muestra en las siguientes figuras.

- **DCL XY.**

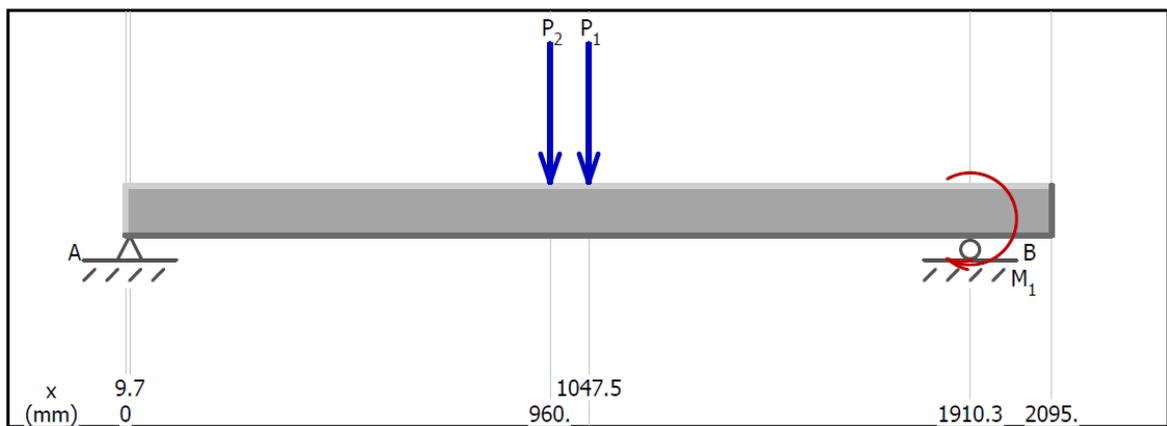


Figura 21. Diagrama cuerpo libre en plano XY.

Fuente: Elaboración propia.

P1 es la componente de la suma de los pesos del eje hueco y de los extremos que actúa perpendicularmente al tornillo de Arquímedes y P2 es la componente correspondiente del peso de la hélice (ver Figura 19, Figura 20 y Tabla 13) ambas son cargas distribuidas, representadas de manera puntual en su centro de masa.

- **DCL XZ**

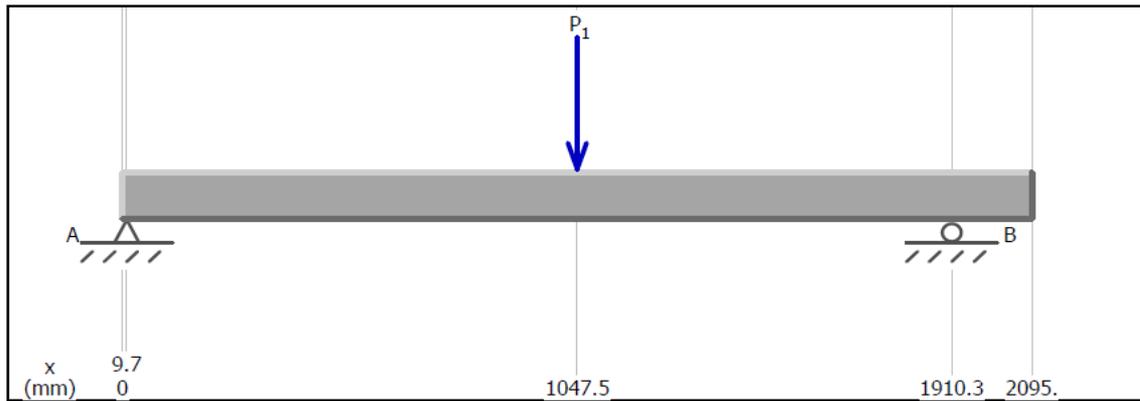


Figura 22. Propiedades de tapa y eje superior

Fuente: Elaboración propia.

En este caso, la carga P_1 representa a la componente de la fuerza de empuje del agua actuando de manera distribuida en el tornillo, pero representada de manera puntual en el centro de este. De la Figura 21 y Figura 22 se pudieron obtener las fuerzas equivalentes que interactúan en el diagrama de cuerpo libre.

Para seleccionar rodajes se debe tener en consideración que estos reciben cargas radiales y axiales. En el rodaje A se visualiza 3 reacciones A_x , A_y , A_z , y el rodamiento B solo radial B_z y B_y . Se aplicarán las condiciones de equilibrio para hallar las reacciones en los rodajes y el momento (M_t).

- Condiciones de equilibrio en X: del DCL XY podemos establecer las siguientes condiciones de equilibrio. Los pesos del eje, tapas extremas y hélice se descomponen por el seno del ángulo de inclinación $\theta = 30^\circ$ para usar las componentes que inciden en el eje de tornillo de manera perpendicular.

$$\sum Fx = 0 = A_x - Fx - (W_h + W_{\text{eje hueco}} + W_{\text{inf}} + W_{\text{sup}}) * g * \text{sen}(\theta) \quad (18)$$

- Condiciones de equilibrio en Y:

$$\sum Fy = 0 = A_y + B_y - Fy - (W_h + W_{\text{eje hueco}} + W_{\text{inf}} + W_{\text{sup}}) * g * \text{cos}(\theta)$$

$$A_y + B_y = 975.68 \quad (19)$$

- Condiciones de equilibrio en Z:

$$\sum Fz = 0 = -A_z - F_z + B_z$$

$$B_z - A_z = 430.87 \quad (20)$$

- Sumatoria de Momentos:

$$\sum M = \sum (r \times F) = 0 \quad \cup +$$

Para X:

$$\sum M_x = 0 = -F_z * 106.4 + M_t$$

$$M_t = F_z * 106.4 \quad (21)$$

Para Y, con respecto al punto A:

$$\sum M_y = 0 = -F_z * 950.31 + B_z * 1900.62 \quad (22)$$

Para Z, con respecto al punto A:

$$\sum M_z = 0 = (F_y + (W_h * g * \cos(\theta))) * 950.31 + W_{\text{eje hueco}} * g * \cos(\theta) * 2085.31 - B_y * 1900.62 \quad (23)$$

Aplicando las expresiones de 20 a 25 el sistema quedó resuelto como se muestra la siguiente tabla.

Tabla 14. Reacciones en rodajes.

Reacción	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
Axial en rodaje A	A_x	563.33	N	18
Radial-y en rodaje A	A_y	443.99	N	19
Radial-Z en rodaje A	A_z	215.43	N	20
Radial-y en rodaje B	B_y	531.69	N	23
Radial-z en rodaje B	B_z	215.44	N	22
Momento torsor	M_t	45844.57	N.mm	21

Fuente: Elaboración propia.

Diagrama de momentos y fuerzas

En las siguientes figuras, se visualizan los diagramas de fuerzas y momentos que permitieron analizar la ubicación donde se produce mayor esfuerzo en el árbol.

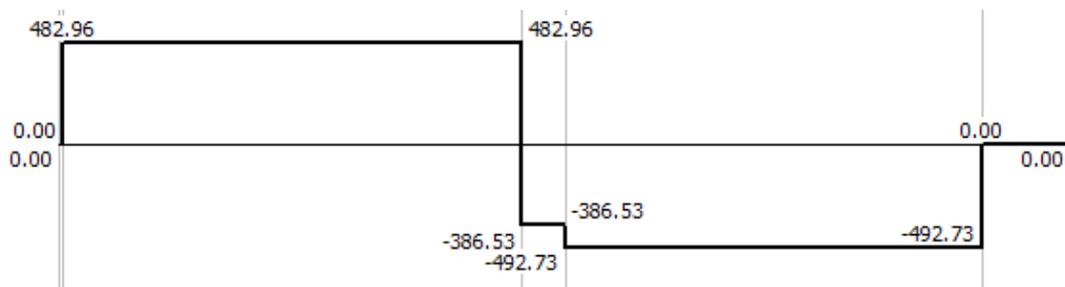


Figura 23. DFC XY.

Fuente: Elaboración propia.

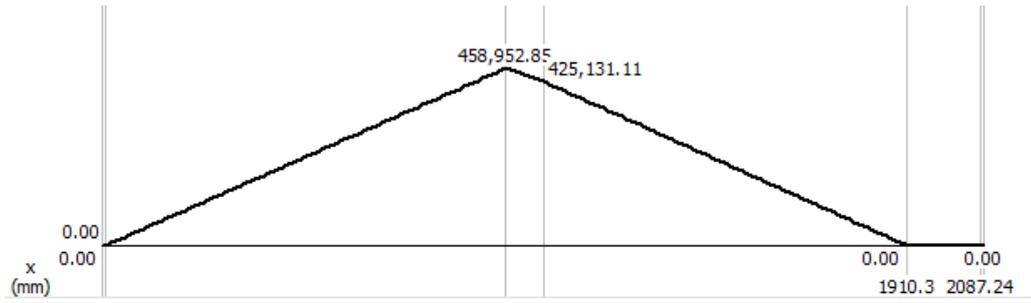


Figura 24. DMF XY.

Fuente: Elaboración propia.

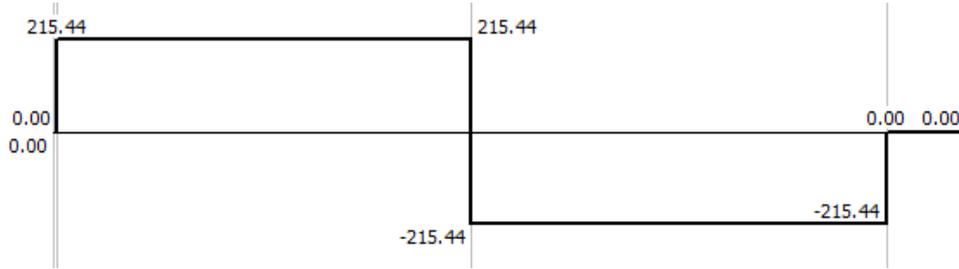


Figura 25. DFC XZ.

Fuente: Elaboración propia.

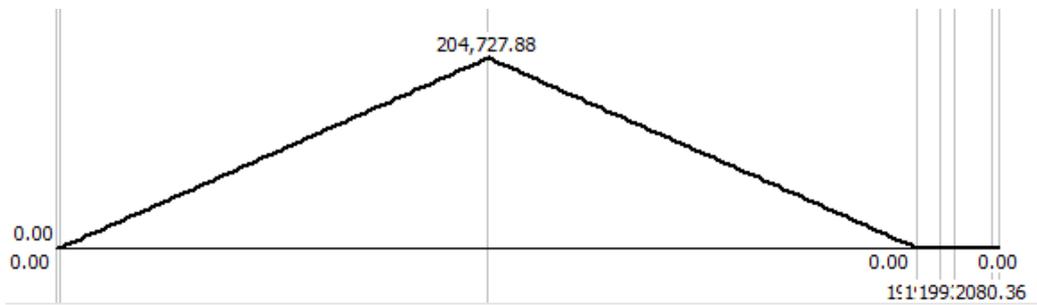


Figura 26. DMF XZ.

Fuente: Elaboración propia.

La zona crítica está a 950.31 mm del eje del rodaje inferior. Para analizar la fluencia y fatiga de la turbina se usaron las secciones mostradas en la *Figura 27* puesto que estas zonas se sometieron a mayores esfuerzos.

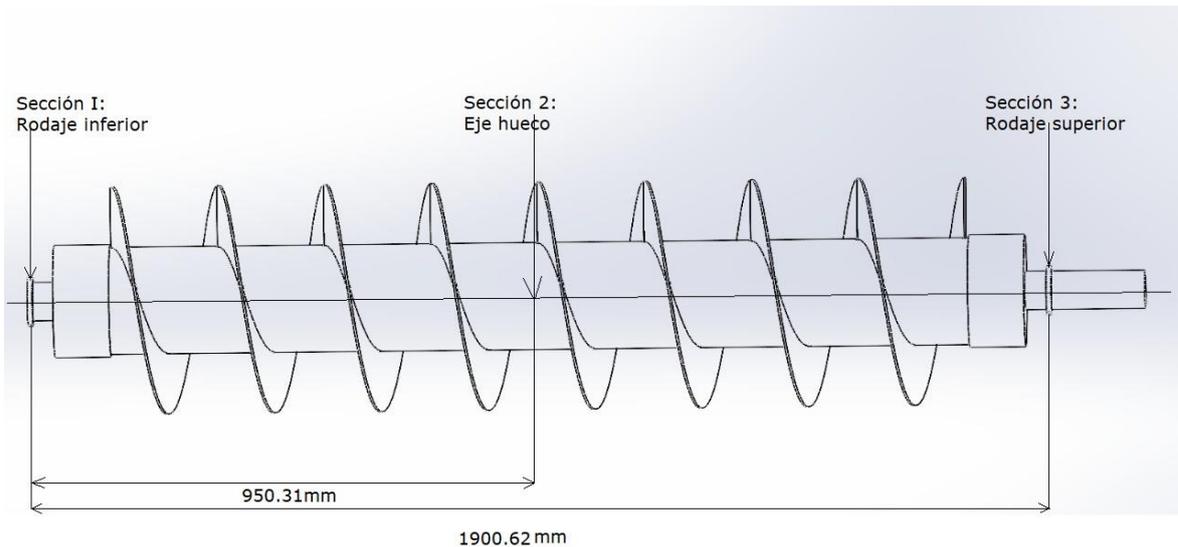


Figura 27. Secciones observadas.

Fuente: Elaboración propia.

Resistencia a la fluencia

$$M_f = \sqrt{(M_y)^2 + (M_z)^2} \quad (24)$$

$$V = \sqrt{(V_y)^2 + (V_z)^2} \quad (25)$$

El tubo de PVC rígido que conforma el cuerpo del tornillo de Arquímedes tiene un espesor asumido de 7.3 mm, el análisis de fluencia del eje hueco comprobará si ese valor satisface la resistencia requerida.

$$\sigma_n = \frac{4F}{\pi((\phi_2)^2 - (\phi_{int})^2)} \quad (26)$$

$$\sigma_f = \frac{32M_f\phi_2}{\pi((\phi_2)^4 - (\phi_{int})^4)} \quad (27)$$

$$\tau_t = \frac{16M_t\phi_2}{\pi((\phi_2)^4 - (\phi_{int})^4)} \quad (28)$$

$$\sigma_{eq. Von Mises} = \sqrt{(\sigma_f + \sigma_n)^2 + 3\tau_t^2} = 190,919.48 \leq \frac{\sigma_F}{FS} \quad (29)$$

Material por seleccionar

Los componentes eje hueco y hélice están hechos de PVC rígido, el cual se seleccionó con el fin de optimizar costos de tal manera que el presupuesto sea factible económicamente para las familias peruanas de viviendas rurales. De este material resaltan sus buenas propiedades mecánicas para la función.

- Resistencia a la fluencia (límite elástico): $\sigma_y = 2410 N/mm^2$
- Resistencia a la rotura (límite de tracción): $\sigma_u = 41 N/mm^2$

Y para los ejes en las tapas de los extremos fue tomado en consideración el material ASTM A36 que contiene las siguientes propiedades mecánicas:

- Resistencia a la fluencia (límite elástico): $\sigma_y = 250\text{N/mm}^2$
- Resistencia a la rotura (límite de tracción): $\sigma_u = 400\text{N/mm}^2$

Tabla 15. Factores de seguridad.

CASO	FACTOR SEGURIDAD	OBSERVACIONES
1	1.5 – 2	Materiales conocidos, para condiciones al medio ambiente a razón constante y sujeto a esfuerzos y cargas que se calculen con facilidad.
2	2 - 2.5	Materiales en promedio, trabajan a condiciones ambientales ordinarias y sujetas a cargas y esfuerzos calculables.
3	2.5 – 3	Materiales poco experimentados/frágiles en condiciones promedio al ambiente, esfuerzo y carga.
4	3 - 4	Materiales no experimentados que se usan para condiciones promedio al ambiente, esfuerzo y carga.
5	3 – 4	Usarse con materiales muy conocidos que se usarán en condiciones ambientales inciertas o sujeto a esfuerzos inciertos y cargas.

Fuente: Tomado de Santa-Cruz, (2018).

Las condiciones ambientales en el caserío Tumi de Oro de Lambayeque son inciertas, por tal motivo se seleccionó el factor de seguridad de 4 para determinar la fluencia, mostrada en la Tabla 15.

Cálculos en la Sección 2

Tabla 16. Fuerzas y momentos obtenidos del DFC y DMF

Descripción	Variable	Valor	Unidad
Momento flector en Z	M_z	485,952.85	N.mm
Momento flector en Y	M_y	204,727.88	N.mm
Fuerza cortante en Z	V_z	215.44	N
Fuerza cortante en Y	V_y	492.73	N

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Fuerzas y momentos calculados para la sección 2.

Descripción	Variable	Valor	Unidad	Ecuación
Fuerza Normal	F	563.33	N	18
Momento flector	M_f	527,317.44	N.mm	24
Momento torsor	M_t	45,844.57	N.mm	21
Fuerza cortante	V	537.77	N	25

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando los valores de la Tabla 17 en la ecuación de Von Mises (29) tenemos:

$$\sigma_{eq. Von Mises} = \sqrt{\left(\frac{3.375 \times 10^9}{\pi((200)^4 - (\phi_{int})^4)} + \frac{2253.32}{\pi((200)^2 - (\phi_{int})^2)}\right)^2 + 3\left(\frac{0.1467 \times 10^9}{\pi((200)^4 - (\phi_{int})^4)}\right)^2} \leq \frac{2941.995}{4}$$

$$\phi_{int} \leq 205.98 \text{ mm}$$

El valor asumido de ϕ_{int} es de 200mm, el cual es menor a 205.98mm, por lo que se cumple el análisis de resistencia al fallo por fluencia.

Cálculos en las secciones 1 y 3

En la *Figura 27* se visualizan las secciones 1 y 3, con el análisis de fluencia y los datos obtenidos en la Tabla 18 se calculó el diámetro mínimo para las secciones y se verificó si estos fallarán.

Tabla 18. Fuerzas y momentos calculados para las secciones 1 y 3.

Nombre	Variable	Rodamiento Inferior	Rodamiento Superior	Unidades	Ecuación
Fuerza normal	F	563.33	0	N	18
Momento flector	M_f	0	0	N.mm	24
Momento torsor	M_t	45,844.57	45,844.57	N.mm	21
Fuerza Cortante	V	443.99	531.69	N	25

Fuente: Elaboración propia

Las secciones 1 y 3 son ejes macizos, para el cálculo de sus diámetros se usarán las siguientes fórmulas:

$$\sigma_n = \frac{4F}{\pi(\phi_{rod int})^2} \quad (30)$$

$$\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi(\phi_{rod\ int})^3} \quad (31)$$

$$\tau_t = \frac{16M_t}{\pi(\phi_{rod\ int})^3} \quad (32)$$

$$\tau_c = \frac{4V}{\pi(\phi_{rod\ int})^2} \quad (33)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 18 en la ecuación de Von Misses (29) tenemos:

- Para el rodaje inferior:

$$\sqrt{\left(\frac{32M_f}{\pi(\phi_{rod\ int})^3} + \frac{4F}{\pi(\phi_{rod\ int})^2}\right)^2 + 3\left(\left(\frac{16M_t}{\pi(\phi_{rod\ int})^3}\right)^2 + \left(\frac{4V}{\pi(\phi_{rod\ int})^2}\right)^2\right)} \leq \frac{2 \times 10^5}{4}$$

$$\sqrt{\left(\frac{2253}{\pi(\phi_{rod\ int})^2}\right)^2 + 3\left(\left(\frac{733,513.12}{\pi(\phi_{rod\ int})^3}\right)^2 + \left(\frac{1775.96}{\pi(\phi_{rod\ int})^2}\right)^2\right)} \leq \frac{2 \times 10^5}{4}$$

$$\phi_{rod\ int} \geq 58\text{mm}$$

- Para el rodaje superior:

$$\sqrt{\left(\frac{32M_f}{\pi(\phi_{rod\ int})^3} + \frac{4F}{\pi(\phi_{rod\ int})^2}\right)^2 + 3\left(\left(\frac{16M_t}{\pi(\phi_{rod\ int})^3}\right)^2 + \left(\frac{4V}{\pi(\phi_{rod\ int})^2}\right)^2\right)} \leq \frac{2 \times 10^5}{4}$$

$$\sqrt{3\left(\left(\frac{733,513.12}{\pi(\phi_{rod\ int})^3}\right)^2 + \left(\frac{2126.76}{\pi(\phi_{rod\ int})^2}\right)^2\right)} \leq \frac{2 \times 10^5}{4}$$

$$\phi_{rod\ int} \geq 53\text{mm}$$

El valor asumido para los diámetros de rodamiento interior ($\phi_{rod\ int}$) es 70mm, el cual es mayor a los valores hallados anteriormente, por lo que se cumple el análisis de resistencia al fallo por fluencia.

Resistencia a la fatiga

Se tomó en cuenta la resistencia a la fatiga de los elementos críticos sometidos a flexión rotativa como son los ejes superior e inferior fabricados en acero A36.

Condiciones para el cálculo de Fatiga:

- Los ejes han sido fabricados con barra redonda de acero 36 laminado en caliente.
- La turbina, al estar en contacto con el agua, tendrá enfriamiento natural, por lo tanto, la temperatura de funcionamiento siempre es menor a 50°C.
- Con el fin de ser conservadores se aplicó una confiabilidad estadística del 50%.
- Los ejes fueron soldados a las tapas del mismo material (acero A36) que cubren

los extremos del eje hueco de PVC rígido, al existir un cambio de sección en esta zona ocurre concentración de esfuerzos, aquí se consideró redondeos de 4mm. Los DMF de *Figura 24* y *Figura 26* sirvieron para calcular los momentos actuantes en esas zonas, estos datos se aprecian en la Tabla 23.

El límite de fatiga para el acero está dado por las expresiones 34 y 35.

$$\sigma'_n = 0.5 \sigma_u = 0.5 * 400 = 200 \text{ Mpa} \quad (34)$$

$$\sigma_N = K_a * K_b * K_c * K_d * K_r * \frac{\sigma'_n}{K_f} \quad (35)$$

Los factores de la ecuación 35 sirven para corregir el límite de la resistencia a la fatiga y ajustar este valor a las condiciones reales de trabajo, cada uno de los cuales se calcula con las siguientes expresiones:

- Factor de Superficie:

$$K_a = a * \sigma_u^b \quad (36)$$

Tabla 19. Factor de superficie en aceros.

Acabado Superficial	Factor a		Exponente
	kpsi	MPa	b
Rectificado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado	2.7	4.51	-0.265
Lam. Caliente	14.4	57.7	-0.718
Forjado	39.9	272	-0.995

Fuente: Tomado de Mott, 2006.

- Factor de tamaño:

$$K_b = 1.189 * (0.37 * d)^{-0.097} \quad (37)$$

- Factor de carga: Por tratarse de flexión rotativa se usará un factor de carga.

$$K_c = 1 \quad (38)$$

- Factor de temperatura: Los elementos trabajan a temperaturas menores a 50°C

Tabla 20. Factor de temperatura.

T, °C	20	50	100	150	200	250	300	400	450	500	600
K_d	1	1,01	1,02	1,025	1,02	1	0,975	0,922	0,84	0,766	0,546

Fuente: Tomado de Mott, 2006.

$$K_d = 1.01 \quad (39)$$

- Factor de confiabilidad: Usamos una confiabilidad del 50%

Tabla 21. Factor de confiabilidad.

%	50	90	95	99	99,9	99,99
K_r	1	0,9	0,87	0,82	0,75	0,7

Fuente: Tomado de Mott, 2006.

$$K_r = 1 \quad (40)$$

- Factor de corrección de esfuerzos: Para el cálculo de este factor se utiliza la fórmula de la ecuación 41 en donde “q” es el factor de sensibilidad a las muescas y “ K_t ” es el factor de concentración de tensiones. Para hallar estos factores se utiliza los diagramas de la *Figura 28* y *Figura 29*.

$$K_f = 1 + q(K_{t-1}) \quad (41)$$

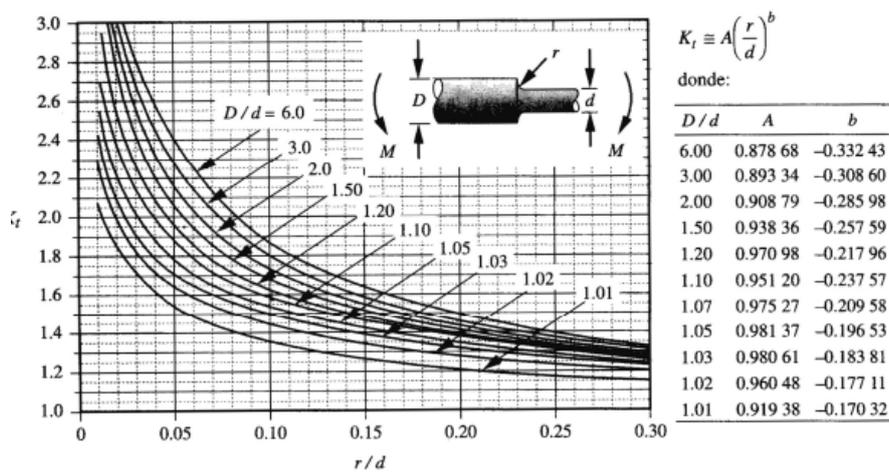


Gráfico 4 - Eje con hombro, sometido a flexión

Figura 28. Factor de corrección de eje con hombro a flexión.

Fuente: Tomado de Mott, 2006.

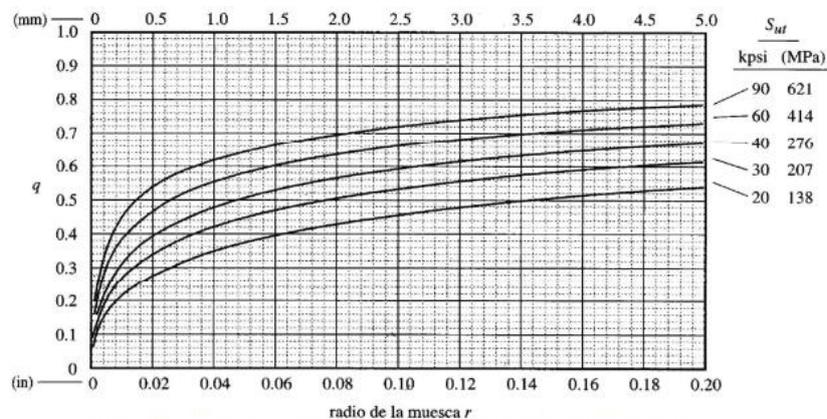


Gráfico 20 - Aluminio con Tratamiento Térmico, Factor de Sensibilidad a las muescas

Figura 29. Radio de la muesca.

Fuente: Tomado de Mott, 2006.

Todos los factores de corrección calculados se muestran en la Tabla 22, ahí también se indica el resultado final del esfuerzo a la fatiga permisible σ_N .

Tabla 22. Factores de corrección para límite de fatiga.

Factor	Variable	Valor calculado	Ecuación
Superficie	K_a	0.78	36
Tamaño	K_b	0.87	37
Carga	K_c	1	38
Temperatura	K_d	1.01	39
Confiabilidad (50%)	K_r	1	40
Concentración de esfuerzos	K_f	1.8	41
Resistencia a la fatiga corregida	σ_N	76.2	35

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de esfuerzos críticos.

El criterio de Goodman permite analizar de manera matemática la resistencia de piezas mecánicas sometidas a fatiga, se basa en los valores de tensiones críticas (ecuación 42 y 43). A través de este criterio se establece que la pieza resistirá si se cumple la ecuación (44).

$$\sigma_f = \frac{32M_f}{\pi(\phi)^3} \quad (42)$$

$$\tau_t = \frac{16M_t}{\pi(\phi)^3} \quad (43)$$

Utilizando la línea de Goodman se obtiene el factor de seguridad de cada sección.

$$\frac{\sigma_a}{S_n} + \frac{\tau_m}{S_u} = \frac{1}{N} \quad (44)$$

Tabla 23. Momentos y esfuerzos calculados en los cambios de sección.

Nombre	Variable	Eje inferior	Eje Superior	Unidades	Ecuación
Momento flector	M_f	16957.62	23477.68	N.mm	Fig. 22
Momento torsor	M_t	45,844.57	45,844.57	N.mm	21
Esfuerzo de flexión	σ_a	0.5	0.7	N.mm	42
Esfuerzo cortante	τ_m	0.7	0.7	N.mm	43

Factor de seguridad	FS	120.3	91.44	-	44
---------------------	----	-------	-------	---	----

Fuente: Elaboración propia

Selección de rodamientos: Para nuestra aplicación se asumió que la vida útil de los rodamientos debe ser aproximadamente 100000 horas y su diámetro mínimo debe cumplir con las dimensiones calculadas para los ejes superior e inferior con la ecuación de Von Mises (ecuación 29). Un parámetro importante en la selección de rodajes fue la carga dinámica equivalente, se trata de una carga hipotética que incide en la vida útil de los rodajes de igual manera que las fuerzas reales (axiales y radiales) que sobre él actúan. La carga dinámica equivalente está dada por la ecuación 45, donde X e Y son constantes propias del rodaje seleccionado.

$$P_{din} = X * F_r + Y * F_{axial} \quad (45)$$

Otro parámetro para tener en cuenta en la selección de rodajes fue la vida nominal L_{10} que es la vida a fatiga que el 90% de un grupo sustancial de rodajes idénticos supera funcionando en condiciones de trabajo equivalentes. La utilización de este parámetro fue importante para determinar las dimensiones adecuadas de un rodaje y así evitar fallas por fatiga. La marca SKF aplica la norma ISO 281 mostrada en la ecuación 46 para el cálculo de la vida nominal básica, en esta expresión C es la capacidad de carga dinámica básica y el exponente ρ es 3 para los rodamientos de bolas y 10/3 para los rodamientos de rodillos.

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P_{din}} \right)^\rho \quad (46)$$

En el caso específico de nuestra aplicación, se utilizó la marca de rodajes SKF por ser una marca ampliamente utilizada en el mercado nacional y permitirá encontrar fácilmente el repuesto cuando se le requiera, además se trata de una marca con amplia experiencia en la fabricación de estos componentes lo que nos brinda la garantía de un buen funcionamiento y durabilidad. El fabricante brinda los factores de modificación a_1 y a_{skf} que aproximan la vida útil a un valor de acuerdo con la realidad que toma en cuenta las condiciones de trabajo del rodaje. Esto se representa en la ecuación 47.

$$L_{nm} = a_1 * a_{skf} * L_{10} \quad (47)$$

El valor de la vida nominal básica en horas está dado por la expresión XL.

$$L_{10nmh} = \left(\frac{10^6}{60n} \right) * L_{nm} \quad (48)$$

Se seleccionaron rodajes que sean capaces de soportar cargas combinadas ya que sobre estos actúan cargas radiales y axiales, principalmente en el inferior. Un rodaje de rodillos a rótula resultó óptimo para este fin. Debido a que los rodajes están en contacto directo con el flujo de agua, fue necesario también que cuenten con un sello que los proteja y así minimizar los trabajos de mantenimiento y lubricación. Bajo estas condiciones, en el catálogo de rodamientos SKF (2019) se seleccionó el rodaje con código 21314E (Anexo 7). La Tabla 24 muestra los datos de entrada que servirán para la selección correcta del rodamiento.

Tabla 24. Datos de entrada para selección de rodamientos.

Descripción	Variable	Valor	Unidades
Fuerza axial	F_{axial}	563.33	N
Fuerza radial	V	443.99	N
Rev. por min.	RPM	115	<i>rpm</i>
Capacidad de carga básica	C	291	kN
Factor radial	X	0.67	-
Factor axial	Y	4.6	-
Exponente de ecuación de vida útil (rodillos)	ρ	10/3	-
Factor de ajuste (90% confiabilidad)	a_1	1	-
Factor de ajuste SKF	a_{skf}	2	-
Carga Límite de Fatiga	P_u	34.5	kN

Fuente: Elaboración propia

Con los valores de la Tabla 24 se obtuvieron los valores que se indican de la Tabla 25.

Tabla 25. Resultados de rodamientos.

Descripción	Variable	Rodamiento	Unidades	Ecuaciones
Carga dinámica equivalente	P_{din}	2.42	kN	45

Vida nominal básica	L_{10}	8582071	rev	46
Vida nominal corregida	L_{nm}	17164142	rev	47
Vida nominal corregida en horas	L_{10nmh}	2.5×10^9	horas	48

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 25 , bajo las condiciones de trabajo, los rodajes tendrán una vida útil que supera por mucho las 100000 horas cumpliendo así con el requerimiento de este parámetro, por lo tanto, el rodaje resulta óptimo para nuestra aplicación.

4.2.5.3 SELECCIÓN DE CHAVETA.

Se seleccionó este ítem para transmitir potencia para el acople entre la caja multiplicadora y el eje del tornillo de Arquímedes. Los cálculos matemáticos se centrarán en la norma DIN 6885 A, que hace énfasis a que es una chaveta paralela y que sus extremos son redondeados. Además, el tipo de ajuste será de forzado para que la chaveta esté montada con apriete tanto en el eje como en el cubo. Como el diámetro del eje de la tapa superior es de 70mm, se selecciona la chaveta con las dimensiones de 20x12mm.

$$L_{ef} \geq \frac{2 * M_t}{d * (h - t_1) * p_{adm}} \quad (49)$$

$$L \geq L_{ef} + b \quad (50)$$

Tabla 26. Resultados de la chaveta.

Parámetro	Variable	Magnitud	Unidades
Longitud efectiva	L_{ef}	2.911	Mm
Longitud requerida	L	22.911	Mm
Presión admitida	p_{adm}	100	MPa

Fuente: Elaboración propia

4.2.5.4 SELECCIÓN DE CAJA MULTIPLICADORA.

De la Tabla 10 se tiene que la velocidad de salida del tornillo es de 115.22 rpm y el generador que se seleccionará admite una velocidad de 450 rpm, para que el generador y la turbomáquina trabajen en sincronismo debe ser de forma coaxial y hacer uso de un elemento de acople directo. Es por ello que escogió la caja

multiplicadora, ROGIMAR el modelo STM serie 50000 (ver Anexo 6), teniendo una disposición de sus ejes en paralelo y con el tipo de encastre de eje chaveta macho, admitiendo una relación de rpm de 1:4, en la siguiente Tabla 27 se mostrara los valores de ingreso y salida del multiplicador.

Tabla 27. *Valores de entrada y salida del multiplicador.*

Nombre	Variable	Unidad	Valor
Relacion de multiplicación	I	-	4
Eficiencia de transmisión	Nm	%	0,95
Velocidad de diseño	n0	Rpm	115.22
Velocidad de ingreso	n1	Rpm	120
Velocidad de salida	n2	Rpm	480
Potencia de entrada	P1	W	448.12
Potencia de salida	P2	W	425.71

Fuente: Elaboración propia

4.2.5.5 SELECCIÓN DEL GENERADOR.

Se tiene que la velocidad del giro del eje al multiplicador de 480 rpm, se selecciona un generador que funcione a esa velocidad, es así que se escogió el generador GinLong modelo GL-PMG-500A (ver Anexo 8), que funciona bajo las siguientes condiciones:

Tabla 28. *Datos de motor seleccionado.*

Potencia salida	Velocidad de carga	Frecuencia	Vida útil	Eficiencia	Peso	Modelo
500 W	450 rpm	50/60 Hz	20 años	0.9	14.4 kg	GL-PMG-500A

Fuente: Elaboración propia

Al tomar la potencia en la salida del multiplicador e ingresando al generador GinLong se obtendrá una potencia de acuerdo con su eficiencia del mismo y que en su salida muestra una magnitud 383.14W.

4.2.6 Modelamiento y montaje del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes en toma lateral del canal Garbanzal en SolidWorks.

En este punto se tomó en consideración el primer resultado, evaluar el potencial hidroeléctrico en las viviendas rurales del Perú y se optó por modelar el generador hidroeléctrico en una de las tomas laterales del canal Garbanzal en el tramo km

1+339.60 al km 1+612.00, donde se encuentra ubicada la muestra de la investigación, el caserío Tumi de Oro. Posteriormente se tomó en cuenta el espacio geométrico disponible en la toma lateral y los estudios científicos relacionados con el diseño de la turbina de tornillo de Arquímedes; así también, se hizo énfasis a la norma de diseño VDI 2221 que mediante su metodología se seleccionó como solución óptima la alternativa 3. Y, por último, se usó el software de diseño mecánico SolidWorks para modelar la alternativa seleccionada, proceso que también se realizó con la toma lateral siguiendo las dimensiones indicadas en los planos del expediente técnico. Con ambos diseños pudimos emular cómo se vería el generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes montado in situ como se puede apreciar en la *Figura 30*. Cabe mencionar que para este diseño se empleó las unidades del Sistema Internacional (Anexo 9).

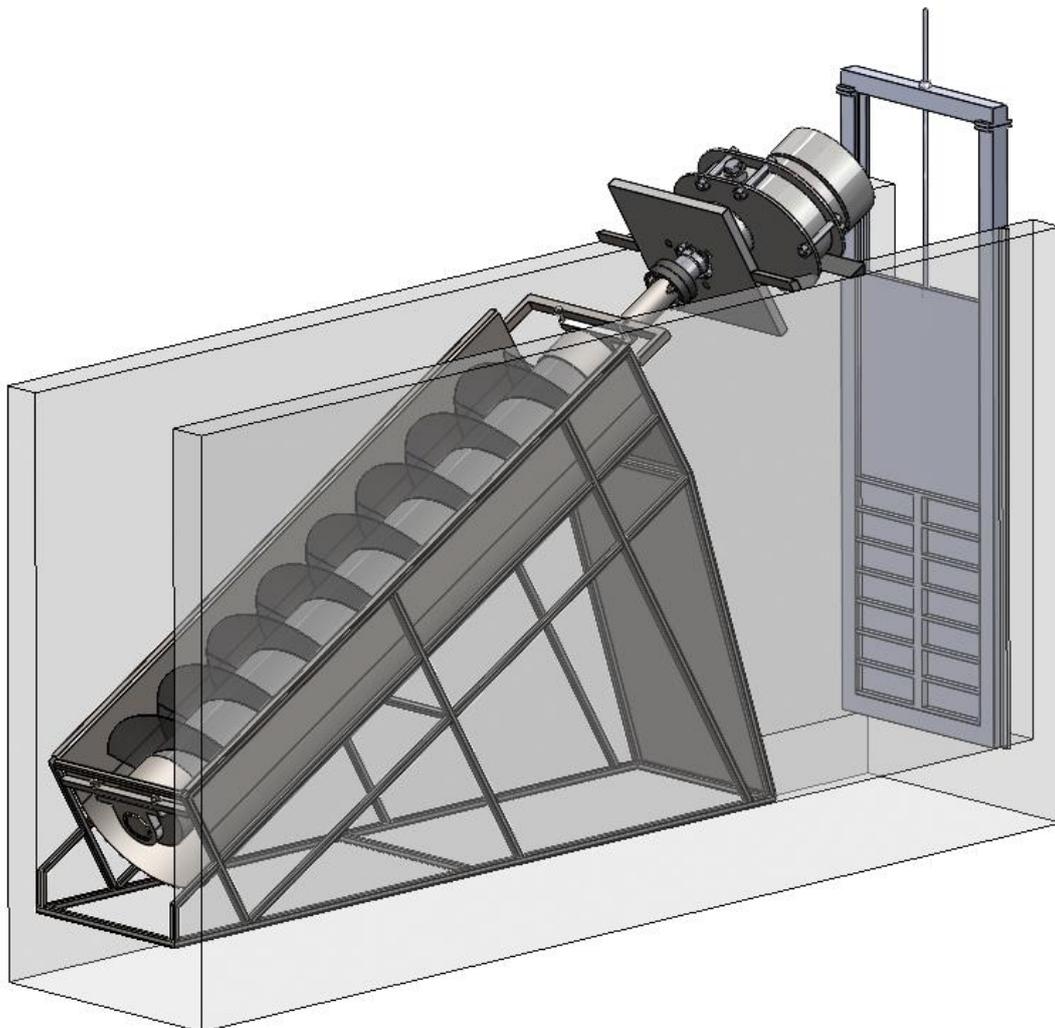


Figura 30. Esquema de la ubicación del tornillo respecto a la toma lateral.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.7 Conexión del generador monofásico, acometida y conexión eléctrica en baja tensión para vivienda rural.

La salida del generador monofásico GinLong PMG 500A se conecta a una caja de conexión impermeable – Meersee 2/3 Polos IP67, por un lado, y el otro extremo de la caja alimenta al conductor set de Cu. 2x4 mm².

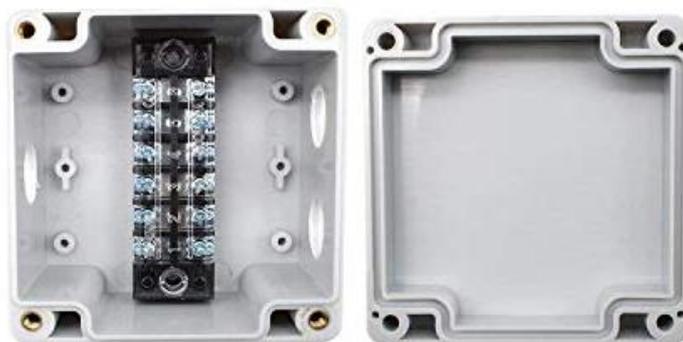
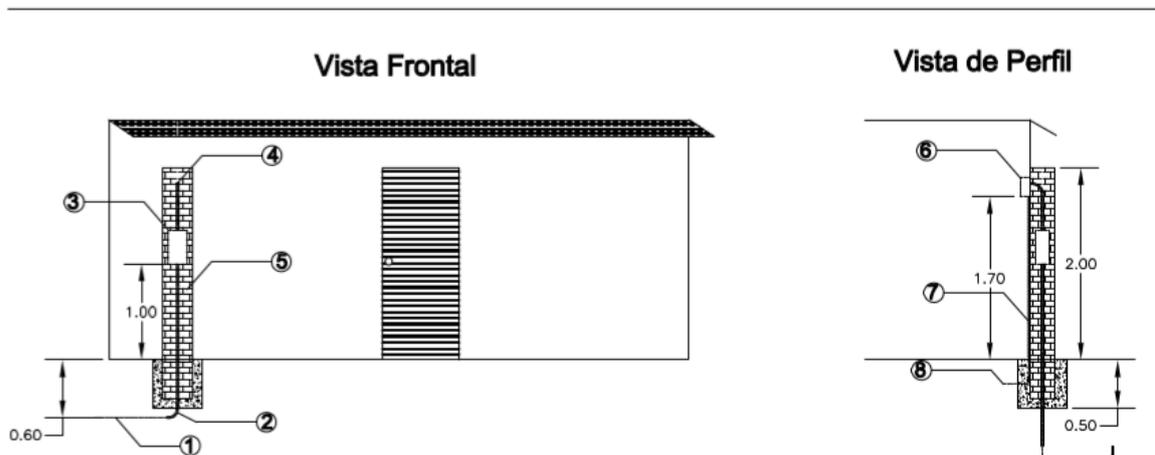


Figura 31. Caja de conexión impermeable.

Fuente: tomado de Indeco.

Luego el conductor set de Cu. 2x4 mm² se conducirá a la vivienda rural por medio de una zanja de 0.6m de profundidad por 0.2m de ancho, además el conductor estará protegido dentro de un tubo de PVC SAP de ¾” hasta el murete, aquí el conductor sube hasta la caja porta medidor haciendo uso de la misma tubería anterior a una distancia de 1.6m, dentro se conecta el cable alimentador al medidor monofásico electrónico energía activa 10-30 A y este a su vez se conecta al interruptor termomagnético 2X10A, con el conductor tipo TW 4 mm². Y a la salida de este interruptor termomagnético instalamos la acometida domiciliaria que alimentará al tablero de distribución interno (ver *Figura 32*).



COMPONENTES DE CONEXIÓN DOMICILIARIA	
ITEM	DESCRIPCIÓN
1	CONDUCTOR SET DE Cu 2X4 MM ²
2	TUBO PVC SAP 3/4"
3	CAJA METALICA PORTAMEDIDOR DE F°G° DE 350 X 150 X 185 MM
4	ACOMETIDA HACIA TABLERO DE DISTRIB. GENERAL
5	MURETE PREFABRICADO DE 0.30X0.25X2.40
6	TABLERO GENERAL PVC ADOSABLE 6 POLOS
7	TUBO PVC SEL 1/2"
8	CONDUCTOR PARA PUESTA A TIERRA

Figura 32. Esquema de conexión.

Fuente: Elaboración propia.

El tablero de distribución es de PVC adosable de 6 polos e internamente está conformado por interruptor diferencial de 2x10A y 2 interruptores termomagnéticos de 2x10A para alumbrado y tomacorriente, con lo cual se cumple la meta de electrificar la vivienda rural. Este detalle se observa en el diagrama unifilar de la *Figura 33*.

DIAGRAMA UNIFILAR T.G. VIVIENDA RURAL

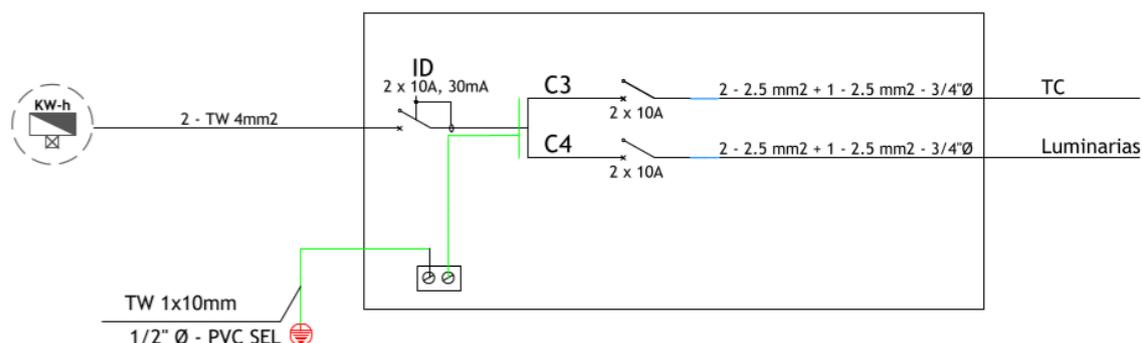


Figura 33. Diagrama unifilar de vivienda rural.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Realizar el presupuesto del generador hidroeléctrico de bajo caudal para estimar su factibilidad económica en viviendas rurales del Perú.

En este punto se procedió a presupuestar el precio de los materiales en el mercado como referencia de los proveedores Indeco, Maveri, ICOFESA, SHANDONG y TUPEMESA de acuerdo al despiece de cada ítem del diseño realizado en el software Solidworks (Anexo 9), determinando sus magnitudes como áreas y longitudes, también se presupuestó los elementos que seleccionaremos los cuales no formaron parte del diseño (ver Anexo 6, Anexo 7 y Anexo 8); por otro lado, se realizó un presupuesto para la fabricación del modelo y un presupuesto de materiales de fijación como pernos, tuercas, remaches y soldadura. Para luego obtener el presupuesto total del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes.

Presupuesto de materiales.

Tabla 29. *Materiales a utilizar.*

Generador hidroeléctrico de bajo caudal						
ítem	Cantidad	Unidades	Componente	Material	Precio unitario	Precio total
1	1.897	m ²	Carcasa	Chapa 1023 acero al carbono (SS) 2mm	70 $\frac{S/}{m^2}$	S/ 132.79
2	2	-	Chumaceras	Hierro fundido	S/139	S/ 278

3	1.8	m	Tubo	PVC rígido $\varnothing_{ext.}=200$, espesor 7.3mm	$46.71 \frac{S/}{m}$	S/ 84.08
4	0.93	m ²	Hélices	PCV rígido Espesor 6mm	S/.55.00	S/ 55.00
5	25.13	m	Base	Tubo cuadrado 20x20x2 mm Acero A500	$2.305 \frac{S/}{m}$	S/ 57.924
	0.5275	m ²		Plancha Metal Acero A36, 2mm	$70 \frac{S/}{m^2}$	S/ 36.925
6	0.46	m	Soporte de chumacera inferior	Barra cuadrada Acero A36 20x20mm	$10 \frac{S/}{m}$	S/ 4.6
7	0.7	m	Soporte de chumacera superior	Barra cuadrada Acero A36 20x20mm	$10 \frac{S/}{m}$	S/ 7
8	1	-	Tapa de tubo extremo superior	Tapa Metálica Acero A36 \varnothing_{int} 200mm, espesor 5mm	S/ 5	S/ 5
	0.225	m		Eje de Acero A36 $\varnothing=70$ mm	$45 \frac{S/}{m}$	S/ 10.125
9	1	-	Tapa de tubo extremo inferior	Tapa Metálica Acero A36 \varnothing_{int} 200mm, espesor 5mm	S/ 5	S/ 5
	0.05	m		Eje de Acero A36 $\varnothing=70$ mm	$45 \frac{S/}{m}$	S/ 2.25
Sub total						S/ 677.824
Caja multiplicadora ROGIMAR						
10	1	-	Relación de 1:4	modelo STM 50000	S/.120.00	S/.120.00
Sub total						797.824
Generador Ginlong						
11	1		Modelo PMG-500A	Esp. Técnicas 230V- 50/60 Hz	S/.400.00	S/.400.00
Sub total						S/.400.00

Total	S/.1197.824
--------------	-------------

Fuente: Elaboración propia.

Presupuesto de mano de obra.

Tabla 30. *Mano de obra.*

Sueldo	Asignación	Gratificación	ESSALUD	AFP/ONP	EPP
S/.1 215.00	S/.150.00	-	S/. 135.00	S/. 150.00	S/.250.00
Pagar mensual (24 días)					S/ 1935.00
Pago por el proyecto (7 días)					S/ 564.375

Fuente: Elaboración propia.

Presupuesto de fijación.

Tabla 31. *Soldadura, remache, pernos y tuercas.*

Electrodo E6011				
Ítem	unidades	Diámetro	Costo unitario	Costo total
Electrodo Soldexa	5	$3/32$	S/ 16.90	S/ 84.5
Pernos y tuercas				
	unidades	tamaño	Costo unitario	Costo total
Perno	4	M12	S/ 2.39	S/ 9.56
Tuerca	4	M12	S/ 1.14	S/ 4.56
Remache Aluminio	10	4.0x18 mm	S/ 0.23	S/ 2.3
TOTAL				S/ 100.92

Fuente: Elaboración propia.

Presupuesto de conexión eléctrica a la vivienda rural.

Tabla 32. *Material y montaje para conexión eléctrica.*

MATERIAL PARA CONEXIONES DOMICILIARIAS					523.20
Ítem	Descripción	Und.	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
01.01	CONDUCTOR SET DE Cu 2X4 MM2	m	25.00	6.80	156.40
01.02	CONDUCTOR TIPO TW DE 4 MM2	m	1.00	2.63	2.63
01.03	CAJA METALICA PORTAMEDIDOR DE F°G° DE 350 X 150 X 185 MM	und	1.00	29.70	29.70
01.04	CURVA DE PVC DE 3/4"	und	2.00	1.70	3.40

01.05	MURETE PREFABRICADO DE 0.30X0.25X2.40	und	1.00	127.12	127.12
01.06	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A, 220V	und	1.00	10.20	10.20
01.07	MEDIDOR MONOF. ELECTRONICO- ENERGIA ACTIVA, 220V 10-30 A.	und	1.00	50.85	50.85
01.08	CURVA DE PVC DE 1/2"	und	2.00	0.90	1.80
01.09	TUBO DE PVC SEL 1/2"	und	1.00	10.10	10.10
01.10	TABLERO DE DISTRIBUCIÓN PVC ADOSABLE 6 POLOS	und	1.00	13.60	13.60
01.11	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A, 220 V-ALUMBRADO	und	1.00	10.20	10.20
01.12	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO 2X10A, 220 V-TOMACORRIENTE	und	1.00	10.20	10.20
01.13	INTERRUPTOR DIFERENCIAL 2X10 A, 220 V	und	1.00	49.90	49.90
01.14	TUBO DE PVC 3/4"	und	8.00	2.90	23.20
01.15	CAJA DE CONEXIÓN IMPERMEABLE – MEERSEE 2/3 POLOS IP67	Und	1.00	23.90	23.90
MONTAJE DE CONEXIONES DOMICILIARIAS					143.53
02.01	INST. DE ACOMETIDA SIMPLE, INC. CONEXION AL LADO DE REDES	und	1.00	93.53	93.53
02.02	INST. TABLERO DE DSTRIBUCIÓN INTERIOR DE VIVIENDA	und	1.00	50.00	50.00
TOTAL					666.73

Fuente: Elaboración propia.

Presupuesto de fabricación de la turbina y estructura.

Tabla 33. Presupuesto total.

Descripción	Costo
Presupuesto de materiales	S/ 1197.824
Presupuesto de mano de obra	S/ 564.375
Presupuesto de fijación	S/ 100.92
Presupuesto de conexión eléctrica	S/ 666.73
Total	S/ 2529.85

Fuente: Elaboración propia.

El presupuesto para el diseño del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes asciende a S/. 2529.85 cifra que resulta factible

económicamente, satisfaciendo la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú al compararlo con otras tecnologías presentes en el mercado tal es el caso del aerogenerador Aeolos Wind Turbine H500W el cual se adquiere a un precio de \$ 1489.38 y el Kit solar que comercializa la empresa peruana AutoSolar AGM 300W-12V a S/ 3353.06.

V Discusión

Como primer objetivo específico se planteó evaluar el potencial hidroeléctrico en las viviendas rurales del Perú para el funcionamiento correcto del tornillo de Arquímedes, específicamente en el caserío Tumi de Oro ubicado en Lambayeque, el cual es nuestra muestra y se encuentra en el curso del canal de riego Garbanzal. Se pudo determinar que esta locación cuenta con el potencial hidroeléctrico necesario para que el generador basado en tornillo de Arquímedes funcione de manera correcta gracias al expediente técnico conforme a obra del canal Garbanzal que proporcionó datos relevantes sobre las características geométricas e hidráulicas, por ejemplo, en el tramo seleccionado, se cuenta con un caudal principal de $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$, velocidad de 0.59 m/s y el flujo es laminar, el estiaje anual es de $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ y se da en los meses de junio a noviembre. A lo largo del canal se ubican tomas laterales por donde el caudal ingresa a través de una compuerta metálica regulable con una magnitud de $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, la toma lateral seleccionada tiene las siguientes dimensiones: 0.5 de ancho y 1.34m de alto que ofrecen el espacio disponible para la instalación de nuestro modelo. En el estudio realizado por Shahverdi et al. (2020), se evalúa también el potencial hidroeléctrico del canal Aghili oriental en la provincia de Khuzestan (Irán), coinciden al ingresar los datos reportados en el expediente técnico de la construcción de este canal. Así como ocurre con el canal Garbanzal; Aghili cuenta con tomas laterales rectangulares con ancho y alto de $0,6\text{m}$, el caudal de diseño de entrada del canal $1.47 \text{ m}^3/\text{s}$ es usado como flujo de entrada para la evaluación del potencial hidroeléctrico. Por otro lado los autores Weking y Sudarmojo (2019), al evaluar el potencial hidroeléctrico se basaron en cálculos matemáticos para la capacidad de agua utilizada de 210 litros en un tiempo de llenado de 36 segundos, dando como resultado 5.83 lt/s para el diseño de prototipo de micro hidráulica con turbina de tornillo de Arquímedes para simulación de potencia hidráulica práctica de estudiantes de ingeniería eléctrica, de tal modo que difiere con nuestra investigación al simular de manera artificial el caudal mediante de una motobomba que recircula el fluido. El resultado de los autores Dedić-Jandrek y Nižetić (2019) difiere con nuestra investigación al evaluar el potencial hidroeléctrico debido a que, en su diseño de una pequeña estación de prueba de energía hidroeléctrica de turbina de tornillo de Arquímedes, puesto que asumieron el flujo de 10lt/s y 12lt/s , partiendo de ello concluyeron los parámetros

de salida en cuanto a potencia, eficiencia y voltaje, variando previamente el ángulo de inclinación. En la investigación de Lavrič, Rihar y Fišer (2018) los autores realizaron una simulación de la producción de energía eléctrica en una pequeña central hidroeléctrica de cabezal ultra bajo de tornillo de Arquímedes considerando las condiciones de protección del medio ambiente y las limitaciones técnicas, coincide su resultado con nuestra investigación al evaluar el potencial hidroeléctrico en donde se ubican molinos de agua abandonados en Eslovenia y que sus parámetros hídricos fueron medidos y publicados por entidades estatales, para luego simular las pequeñas centrales hidroeléctricas con velocidad constante y variable.

El segundo objetivo específico planteado fue modelar el generador hidroeléctrico de bajo caudal para estimar la potencia que satisfaga la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú. Para llevar a cabo el modelo nos fijamos en la geometría de una toma lateral rectangular en donde se puede aprovechar eficientemente el caudal disponible en estas derivaciones a saber $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual no será desabastecido debido a que el estiaje del canal principal no baja de $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$. La metodología de diseño utilizada fue la VDI 2221, criterio que conllevó a seleccionar el modelo adecuado en un sentido técnico y económico que logre satisfacer la demanda de 200w para una vivienda rural, según dicta la norma DGE que regula la calificación eléctrica de sistemas de distribución secundaria en el Perú. En este sentido, ninguno de los antecedentes de referencia considerados en esta investigación se apoya en alguna norma de diseño para poder optar por el modelo más apropiado, por tratarse en su mayoría de artículos de revisión que van por el camino de la optimización de modelos ya establecidos. Un parámetro importante para tomar en cuenta en el diseño de la turbina de tornillo de Arquímedes es la relación óptima de los diámetros, estos son el diámetro exterior de la hélice y el diámetro del eje hueco, en nuestro diseño este parámetro se aproxima a $\frac{\phi_2}{\phi_3} \approx 0,5$ (0.46 exactamente) lo que conlleva a determinar el número de hilos con los que cuenta el modelo que es 1. En el caso de la investigación realizada por los autores Shahverdi et al. (2020), Dedić-Jandrek y Nižetić (2019), Maulana, Syuhada y Almas (2018) y Weking y Sudarmojo (2019) coinciden con la nuestra al recurrir al artículo publicado por Rorres (2000) para definir la razón óptima de diámetros y el número

de hilos requeridos, por ejemplo en el caso de Shahverdi et al. (2020), tiene una relación óptima de 0.5 y utiliza 3 hilos, Dedić-Jandrek y Nižetić (2019) tiene una relación mayor de 0.55 y usa también 3 hilos, finalmente en el artículo de los investigadores Weking y Sudarmojo (2019) los diámetros presentan una relación de 0.3 y utilizan un hilo en su prototipo. Para el cálculo de la potencia se consideraron condiciones ideales (sin pérdidas por fricción) y se realizaron cálculos a partir de las fuerzas de empuje del agua con las cuales es posible obtener el torque producido en el tornillo de Arquímedes, la fórmula utilizada para obtener esta potencia es la ecuación 12, la cual es resultado del desarrollo de los parámetros de torque y velocidad angular, fórmula que usan también para el cálculo de la potencia los autores Weking y Sudarmojo (2019) y Dellinger et al. (2018) en su investigación. La fuerza de empuje influyente es la que se ejerce en el eje Z, pues es la que causa la rotación del tornillo, en nuestro caso esta fuerza tiene una magnitud resultante de 430.89N, este valor se multiplica por el centroide del área de contacto que equivale a 0.1064m, el producto de estos parámetros es un torque de 45.85N.m, valor que junto con la velocidad angular del tornillo (12.066 rad/s) producen una potencia hidráulica teórica de aproximadamente 553.23W, como la eficiencia del eje del tornillo de Arquímedes es de 81% la potencia de salida en este punto es de 448.12W, esta potencia aún deberá ser transformada en energía eléctrica al pasar por el multiplicador y el generador, los cuales con eficiencias de 95% y 90% respectivamente nos entregan una potencia eléctrica de 383.14W, satisfaciendo así la demanda requerida para una vivienda rural. Shahverdi et al. (2020) en su investigación, obtienen el torque de manera análoga haciendo cálculos matemáticos con las fuerzas de empuje del agua que inciden sobre las hélices de la turbina, a su vez la potencia fue calculada en primera instancia en condiciones ideales, es decir sin fugas ni pérdidas de carga debido a fricción criterio que coincide con nuestra investigación, pues estas empiezan a ser considerables según el autor en mención a partir de los 7m de longitud de hélice, así también considera un ángulo de inclinación de 30° y una eficiencia de 90.8%, además las fuerzas causantes del torque son aquellas que generan la rotación del tornillo, a saber, las fuerzas de empuje del agua en el eje Z, en consonancia con nuestro enfoque. La potencia eléctrica máxima obtenida por Shahverdi et al. (2020) es de 19.9kW, magnitud que refleja la envergadura del proyecto que es mucho mayor en comparación con el

nuestro. Los autores Weking y Sudarmojo (2019) de manera análoga, diseñan un prototipo a escala debido a las dificultades que presenta desarrollar uno en condiciones reales; el modelo desarrollado en el laboratorio de Universidad de Udayana logró obtener una potencia de aproximadamente 22 watts a partir de un caudal de 5.9l/s y un salto de 36 cm tal y como se realizó en la presente investigación con la ecuación 12, que con un caudal de 77l/s y una altura de 90cm, se logra generar una potencia teórica de 553.23watts, y que, como ya se mencionó luego debe transformarse en potencia eléctrica pasando por el multiplicador y el generador, camino que también siguen Dellinger et al. (2018). En el caso de Maulana, Syuhada y Almas (2018) coincide con nuestra investigación puesto que diseñan las turbinas de manera teórica para luego ser modeladas en herramientas de diseño mecánico computacional como es el caso del software ANSYS, el propósito de esta investigación se enfoca más en buscar qué geometría y dimensiones deben tener las palas del generador para obtener la mayor eficiencia en la obtención de energía.

Y, por último, en el tercer resultado tiene que ver con realizar el presupuesto del generador hidroeléctrico de bajo caudal para estimar su factibilidad económica en viviendas rurales del Perú. Los autores Bouvant et al. (2021), diseñaron una turbina de tornillo de Arquímedes enfocada en un diseño simplista de eje y hélice, para que sea ubicada en ríos, obteniendo menor impacto ambiental permitiendo que el presupuesto tenga una mejor factibilidad económica; este enfoque tiene coincidencia con nuestro resultado pues optimizamos los materiales y componentes con el fin de obtener un presupuesto adecuado para la implementación de la turbina de tornillo de Arquímedes en beneficio de las familias pertenecientes a las zonas rurales de Perú, se destaca el uso de PVC rígido como material base para la fabricación de la hélice y el eje hueco. Por otro lado, Simmons y Lubitz (2017) en su investigación de Generadores de tornillos de Arquímedes para el desarrollo energético sostenible, nos muestra un panorama de las turbinas de tornillo de Arquímedes en el mundo y sugiere que tienen el potencial de ser usadas para electrificación rural en regiones en desarrollo con recursos hídricos confiables de bajo caudal, tal como nos menciona, en un claro ejemplo donde se propuso la instalación de una pequeña turbina de tornillo de Arquímedes por \$460 USD y que fue puesta en marcha por empresas locales, para satisfacer la necesidad eléctrica

de viviendas rurales fuera de la red en una ciudad del sur de Tanzania, con la intención de reducir los costos de instalación y proporcionar suficiente energía a 48 familias permitiéndoles alimentar un banco de luces LED y la carga de las baterías de sus teléfonos móviles diariamente, lo que reflejaría un costo para cada familia de \$9.60 USD; con respecto a nuestra investigación el resultado difiere, por el simple hecho de que el autor, plasma realidades de implementación de costos en todo el mundo, mas no diseña una turbina de tornillo de Arquímedes, para que posteriormente pueda realizar un presupuesto y estimar su factibilidad económica.

VI Conclusiones

1. El caserío Tumi de Oro ubicado en Lambayeque es una muestra representativa para la población de nuestra investigación. En su mayoría, los pobladores de este caserío carecen de energía eléctrica proveniente de la red pública, sin embargo, aledaño él, se encuentra el canal Garbanzal, cuyo potencial hidroeléctrico para cubrir la necesidad de electricidad fue evaluado haciendo un análisis del expediente técnico conforme a obra de su construcción publicado en el portal del Sistema Electrónico de Contrataciones del Estado SE@CE (2021), concluyendo que este cuenta con las características suficientes para que el generador basado en tornillo de Arquímedes funcione de manera correcta. Por ejemplo, en el tramo seleccionado km 1+339.60 al km 1+612.00, se cuenta con un caudal principal de 1.2 m³/s, velocidad de 0.59 m/s y el flujo es laminar, el estiaje anual es de 0.4 m³/s y se da en los meses de junio a noviembre. A lo largo del canal se ubican 37 tomas laterales por donde el caudal ingresa a través de una compuerta metálica regulable con una magnitud de 0.2 m³/s, la toma lateral seleccionada tiene las siguientes dimensiones: 0.5m de ancho y 1.34m de alto que ofrecen el espacio disponible para el diseño. Los datos recabados nos llevan a concluir que el recurso hídrico de la toma lateral seleccionada del canal Garbanzal aledaño al caserío Tumi de Oro cuenta con el potencial hidroeléctrico necesario para el funcionamiento correcto del tornillo de Arquímedes. La literatura disponible respalda esta conclusión, como es el caso del Estudio de optimización numérica de la turbina de tornillo de Arquímedes (AST): un estudio de caso, de los autores Shahverdi et al. (2020), quienes toman los datos de ingreso para el modelamiento del canal y su respectiva evaluación de potencial hidroeléctrico del expediente técnico del canal Aghili Oriental, ubicado en Khuzestan, provincia de Irán.
2. El diseño el generador hidroeléctrico de bajo caudal para estimar la potencia que satisfaga la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú se llevó a cabo fijándonos en la geometría de una toma lateral rectangular en donde se puede aprovechar eficientemente el caudal disponible de estas derivaciones, a saber 0.2m³/s, se concluye que la toma lateral seleccionada no será desabastecida debido a que el estiaje del canal principal no baja de 0.4m³/s. Al aplicar la norma de diseño VDI 2221 para la selección del modelo adecuado en términos técnicos

y económicos se concluyó que la alternativa 3 es la que más se ajusta a nuestra realidad por ser fácil de transportar, de fabricación sencilla, rápida instalación, económica y de fácil mantenimiento. En concordancia con el espacio disponible en la toma lateral, adaptamos la medida de los diámetros de la hélice (ϕ_3) y del eje (ϕ_2) a 430mm y 200mm respectivamente, estableciendo una relación entre estos que se aproxima a 0.5, y permitió asignarle al diseño la cantidad de 1 hilo, conclusión que se apoya en *Computational Fluid Dynamic Predictions on Effects of Screw Number on Performance of Single Blade Archimedes Screw Turbine*, artículo del autores Maulana, Syuhada y Almas (2018). El caudal teórico de 77l/s calculado con la ecuación 15 tomado de Azevedo (1998), haciendo referencia a que el caudal ingresa al sistema como un vertedero, este caudal asociado al salto de 0.9m, las características geométricas del generador y a las fuerzas de empuje del agua permitió obtener una potencia teórica de 553.23W. Este resultado al pasar por las etapas de la caja multiplicadora ROGIMAR STM50000 y el generador eléctrico Ginlong GL-PMG-500A con eficiencias de 95% y 90% respectivamente, da como resultado una potencia eléctrica de salida de 383.14W valor lo que satisface la mínima demanda para viviendas rurales estipulada por el MINEM en la norma DGE que regula la calificación eléctrica de sistemas de distribución secundaria en el Perú.

3. El presupuesto obtenido para el diseño del generador se divide en 4 puntos, los cuales son: materiales, que asume un monto de S/ 1197.824, mano de obra que asciende a S/ 564.375, la conexión eléctrica a la vivienda rural de S/ 666.73 y por último, instalación, que equivale a S/ 100.92; los montos anteriores mencionados suman un total de S/ 2529.85 (dos mil quinientos veinte nueve con 85/100), este presupuesto se sustenta como un proyecto de bienestar e inclusión social y calidad de vida al estimar la factibilidad económica al compararla con otras tecnologías presentes en el mercado, para satisfacer la demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú.

VII Recomendaciones

Como recomendación fomentar el uso de material reciclado que contengan similares propiedades como del material seleccionado en esta investigación para ejes huecos y hélices, como una alternativa para reducir el presupuesto del diseño del generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes.

También se recomienda implementar al diseño una estructura o sistema que no permita el paso de impurezas dentro de la turbina de tornillo de Arquímedes, ya que podría deteriorar al diseño.

El sistema diseñado operará en condiciones que se prestan al análisis de mecánica de fluidos por lo que sería factible realizar una simulación en alguna herramienta computacional como ANSYS CFD, OpenFOAM'S Simulation Utilities para determinar resultados de presión, velocidad y la energía cinética de contorno turbulento que se produce al paso del caudal dentro del sistema y la influencia de estos parámetros en la pérdida de carga.

El presupuesto podría presentarse como una propuesta de un programa de beneficio social financiado por el Gobierno del Perú, con el fin de mejorar la calidad de vida de los pobladores de las viviendas rurales del Perú, que no cuentan con energía eléctrica proveniente del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

Referencias

AEOLOS. Aeolos Wind Turbine Company - Wind Turbines – Home Wind Generators – Small Wind Turbines. [en línea]. [Consulta: 8 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.windturbinestar.com/>.

AUTOSOLAR. Autosolar | La Tienda de la Energía Solar. [en línea]. [Consulta: 8 diciembre 2021]. Disponible en: <https://autosolar.pe/>.

ÁVALOS, Héctor. Diseño de un sistema fotovoltaico para abastecer la demanda de energía eléctrica del servicio habitacional Gran Hotel, San Ignacio 2016. *Repositorio Institucional - UCV* [en línea]. [Consulta: 3 noviembre 2021]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/9395>.

AZEVEDO, Netto. MANUAL DE HIDRÁULICA. 8va edició. S.I.: Editora Edgard Blucher LTDA. 1998.

BOUVANT, Maël; BETANCOUR, Johan; VELÁSQUEZ, Laura; RUBIO-CLEMENTE, Ainhoay; CHICA, Edwin. Design optimization of an Archimedes screw turbine for hydrokinetic applications using the response surface methodology. *Renewable Energy* [en línea], 2021, vol. 172. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148121004328>. ISSN 09601481.

CAMAYO, Kevin. Turbina Hidráulica con tecnología biométrica para zonas con afluente hídrico de bajo caudal para generar energía eléctrica renovable. *Universidad Continental* [en línea]. [Consulta: 3 noviembre 2021]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/5833>.

DEDIĆ-JANDREK, Hrvoje y NIŽETIĆ, Sandro. Small scale archimedes hydro power plant test station: Design and experimental investigation. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 231. ISSN 09596526.

DELLINGER, Guilhem; GARAMBOIS, Pierre André; DELLINGER, Nicolas; DUFRESNE, Matthieu; TERFOUS, Abdelali; VAZQUEZ, Josey; GHENAIM, Abdellah. Computational fluid dynamics modeling for the design of Archimedes Screw Generator. *Renewable Energy* [en línea], 2018, vol. 118. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.093>. ISSN 18790682.

GINLONG. China 500w Wind Turbine Generator (GL-PMG-500A) - China Vertical

Wind Turbine Generator, Low Rpm. [en línea]. [Consulta: 21 noviembre 2021]. Disponible en: <https://ginlong.en.made-in-china.com/product/BbuQjiHCZfll/China-500w-Wind-Turbine-Generator-GL-PMG-500A-.html>.

GOOGLE-MAPS. Caserío Tumi de Oro - Google Maps. [en línea]. [Consulta: 3 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Caserío+Tumi+de+Oro/@-6.6656201,-79.926233,17z/data=!4m5!3m4!1s0x904cf3020e026b5b:0x58bfc9eff9893c92!8m2!3d-6.6656989!4d-79.9254379>.

ICOFESA. Suministro de bienes y servicios. [en línea]. [Consulta: 6 noviembre 2021]. Disponible en: <https://icofesa.com/index.php>.

INDECO. Nexans - Nexans en Perú. [en línea]. [Consulta: 8 diciembre 2021]. Disponible en: <https://www.nexans.pe/es/company/Nexans-in-Peru.html>.

INEI. ENCUESTA NACIONAL DE PROGRAMAS PRESUPUESTALES 2011-2019. *Instituto Nacional de Estadística e Informática* [en línea], 2020, Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitaless/Est/Lib1729/Libro.pdf.

IRENA. Nuevo récord mundial de capacidad energética renovable en 2020 - Comunicado de prensa. *Irena*. S.l.:

JUCL. JUNTA DE USUARIOS CHANCAY LAMBAYEQUE - JUCL. [en línea]. [Consulta: 9 noviembre 2021]. Disponible en: <https://jucl.org.pe/>.

KHAN, Adeel; KHATTAK, Abraiz; ULASYAR, Abasin; IMRAN, Kashify; MUNIR, Muhammad Asim. Investigation of Archimedean Screw Turbine for Optimal Power Output by Varying Number of Blades. *1st International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2019*, 2019, no. July.

LAVRIČ, Henrik; RIHAR, Andraž; FIŠER, Rastko. Simulation of electrical energy production in Archimedes screw-based ultra-low head small hydropower plant considering environment protection conditions and technical limitations. *Energy*, 2018, vol. 164, no. 2018. ISSN 03605442.

LINSLEY, Ray y FRANZINI, Joseph. Ingeniería de Los Recursos Hidráulicos. 1ra

Edició. S.l.: COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. 1968. 791 pp.

LÓPEZ DE BENITO, Javier. La renovación de la capacidad hidroeléctrica mundial. *Ambientum Portal Lider Mediambiente* [en línea]. [Consulta: 3 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.ambientum.com/ambientum/energia/la-renovacion-de-la-capacidad-hidroelectrica-mundial.asp>.

LUCIO, Daniel. Diseño y construcción de una mini turbina tipo tornillo [en línea]. S.l.: s.n. 2019. 1-74 pp. Disponible en: [https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/29768/1/Tesis I. M. 518 - Lucio Yugsi Daniel Mesías.pdf](https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/29768/1/Tesis%20I.%20M.%20518%20-%20Lucio%20Yugsi%20Daniel%20Mesías.pdf). ISBN 1804437166.

MADRID, Mario y TORO, Juan. Viabilidad Técnica Y Económica De Tornillos Hidrodinámicos Para Generación Eléctrica Caso Quebrada El Chuscal. *Journal of Chemical Information and Modeling* [en línea], 2013, vol. 53, no. 9. Disponible en: <https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/307/1/CIVI0418.pdf>. ISSN 1098-6596.

MAULANA, Muhammad Ilham; SYUHADA, Ahmady; ALMAS, Fiqih. Computational fluid dynamic predictions on effects of screw number on performance of single blade Archimedes screw turbine. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 67. ISSN 22671242.

MAVERI. Manufactura de ventas. [en línea]. [Consulta: 6 noviembre 2021]. Disponible en: https://www.maveri.com/home/product?catt_name=TUBERIA&tipo=&scat=PESADO&cat=DESAGUE.

MEJIA, Julio. Diseño De Una Turbina Hidráulica Basada En El Tornillo De Arquímedes [en línea], 2012. S.l.: Universidad de el Salvador. Disponible en: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1788/>.

MINEM, Norma DGE “ Calificación Eléctrica Para La Subsistemas De Distribución Secundaria”. [en línea], 2004. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minem/normas-legales/108007-0531-2005-mem>.

MOTT, Robert. Diseño de Elementos de Máquinas [en línea]. S.l.: s.n. 2006. 260 pp. Disponible en:

https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nrYd_BjTL0UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=%22sistemas+de+unidades%22&ots=1BKp2eod9D&sig=SwoWt30msLlcScDpGeL1DGKzRGY#v=onepage&q=%22sistemas de unidades%22&f=false. ISBN 970-26-0812-0.

NINANTAY, Johnny. ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO SE0032 QUENCORO – CUSCO – ELECTRO SUR ESTE S.A.A. *Repositorio Institucional - UNSA* [en línea], 2019, Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/10788/UPnitoj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

ORTEGA, Jibrail y VALDIVIA, Gabriel. Diseño de un prototipo de generación de energía renovable - hidráulica para fines académicos. *Universidad Tecnológica del Perú* [en línea], 2018, [Consulta: 2 noviembre 2021]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/2940>.

OSINERGMIN. *Sectores de Distribución Típicos* [en línea]. 2012. S.l.: s.n. Disponible en: <http://gart.osinergmin.gob.pe/ProcReg/VAD/VAD2013/2-Sectores.htm>.

OSINERGMIN. Energías Renovables: Experiencia y Perspectivas en la Ruta del Perú Hacia la Transición Energética [en línea]. S.l.: s.n. 2019. 143 pp. Disponible en: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf. ISBN 9786124735066.

RAMOS, Ronaldo; RAMOS, Julinho y SÁNCHEZ, Alembert. Diseño de una turbina tipo sin fin para la iluminación del parque de Villa El Sol - La Oroya 2020. S.l.: Universidad Continental.

ROGIMAR. HIDRAULICA ROGIMAR S.A . Catalogo de Embragues y Cajas Multiplicadoras. [en línea], 2021. Disponible en: www.hidraulicarogimar.com.

RORRES, Chris. The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, vol. 126, no. 1. ISSN 0733-9429.

SANTA-CRUZ, José. Análisis energético de un Tornillo de Arquímedes para canales de regadío. *Pontificia Universidad Católica del Perú* [en línea], 2018, Disponible en: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/13235/SANTA_JOSE_TORNILLO_ARQUIMEDES.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

SE@CE. MEJORAMIENTO DEL SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO DEL CANAL GARBANZAL - SECTOR MAICILLO - MIRADOR ALTO - ENTRE UTM NORTE (9260587.89 - 9263733.62) Y ESTE (619570.01 - 618095.952), DISTRITO LAMBAYEQUE, PROVINCIA DE LAMBAYEQUE – LAMBAYEQUE. *Sistema Electrónico de Contrataciones del Estado* [en línea]. [Consulta: 3 noviembre 2021]. Disponible en: <https://prodapp2.seace.gob.pe/seacebus-uiwd-pub/fichaSeleccion/fichaSeleccion.xhtml?ptoRetorno=LOCAL>.

SECTOR-ELECTRICIDAD. Carga, demanda y energía eléctrica: Conceptos fundamentales para la distribución de electricidad | Sector Electricidad | Profesionales en Ingeniería Eléctrica. [en línea], 2017, [Consulta: 2 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.sectorelectricidad.com/17597/carga-demanda-y-energia-electrica-conceptos-fundamentales-para-la-distribucion-de-electricidad/>.

SEGURA, Ivan. Optimización y Estudio hidrodinámico de una microturbina hidráulica para el aprovechamiento energético de pequeños saltos de agua. *Universitat Jaume I* [en línea], 2016, Disponible en: http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/165117/TFG_2015_Segura_RodríguezI.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

SHAHVERDI, K.; LONI, R.; GHOBADIAN, B.; GOHARI, S.; MAROFI, S. y BELLOS, Evangelos. Numerical Optimization Study of Archimedes Screw Turbine (AST): A case study. *Renewable Energy* [en línea], 2020, vol. 145. Disponible en: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85070097671&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&nlo=&nlr=&nls=&sid=fbd5020856f8a066cf8478eb338d072a&sot=b&sdt=c&cluster=scosubtype%2C%22ar%22%2Ct%2C%22cp%22%2Ct%2C%22re%22%2Ct%2C%22cr%22%2Ct&sl=31&s=TI. ISSN 18790682>.

SHANDONG. PVC Rígido Celtex Blanco y Negro - Insumos para Publicidad. [en

línea]. [Consulta: 6 noviembre 2021]. Disponible en: <https://shandong.com.pe/producto/pvc-celtex-blanco-y-negro/>.

SIMMONS, Scott; DELLINGER, Guilhem; LYONS, Murray; TERFOUS, Abdelali; GHENAIM, Abdellah y LUBITZ, William David. Effects of Inclination Angle on Archimedes Screw Generator Power Production with Constant Head. *Journal of Hydraulic Engineering* [en línea], 2021, vol. 147, no. 3. [Consulta: 2 noviembre 2021]. Disponible en: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0001854>. ISSN 0733-9429.

SIMMONS, Scott y LUBITZ, William. Archimedes screw generators for sustainable energy development. *IHTC 2017 - IEEE Canada International Humanitarian Technology Conference 2017*, 2017,

SKF. Rodamientos rígidos de bolas. *Rodamientos* [en línea], 2019, Disponible en: https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf.

SKF. Vida nominal del rodamiento | SKF | SKF. [en línea]. [Consulta: 10 noviembre 2021]. Disponible en: <https://www.skf.com/pe/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-process/bearing-size/size-selection-based-on-rating-life/bearing-rating-life>.

TUPEMESA. Tubos metálicos | Tienda en línea | Tubos metálicos, Techos de aluzinc, Perfiles para drywall, Alcantarillas, Barreras de seguridad. [en línea]. [Consulta: 6 noviembre 2021]. Disponible en: <https://tienda.tupemesa.com.pe/tubos-metalicos>.

WEKING, Antonius y SUDARMOJO, Yanu. Prototype Design of Micro Hydro Using Turbine Archimedes Screw for Simulation of Hidropower Practical of Electro Engineering Students. *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, 2019, vol. 3, no. 1. ISSN 2549-8304.

Anexos

Anexo 1

Calificación Eléctrica para la Elaboración de Proyectos de Subsistemas de Distribución Secundaria – MINEM.

Tipo de habilitación	Sector de Distribución Típico 1 W	Sector de Distribución Típico 2 W	Sector de Distribución Típico 3 W	Sector de Distribución Típico 4 W
a) Habilitaciones de baja densidad poblacional, tipo 1 (Zonas R1-S y R1)	1 500 + 3 W/m ² hasta un máximo de 10 kW (suministro trifásico)	800 +1 W/m ² hasta un máximo de 5 kW (suministro trifásico)	—	—
b) Habilitaciones de baja densidad poblacional, tipo 2 (Zona R2)	1 500	800	—	—
c) Habilitaciones de media densidad poblacional, tipo 3 (Zona R3)	1 300	700	—	—
d) Habilitaciones de media densidad poblacional, tipo 4 (Zona R4)	900 (suministro monofásico)	900 (suministro monofásico)	—	—
e) Habilitaciones de alta densidad poblacional, para viviendas multifamiliares	11 W/m ² del área techada total, con un mínimo de 900 W	11 W/m ² del área techada total, con un mínimo de 700 W	—	—
f) Habilitaciones para vivienda taller (Zona I1-R)	1 000	1 000	—	—
g) Habilitaciones para vivienda en vías de regularización (parcial o totalmente edificadas), calificados como Centros Poblados, incluyendo agrupaciones de vivienda en zonas rurales	700 300 (*) (suministro monofásico)	300 200 (*) (suministro monofásico)	250 200 (*) (suministro monofásico)	200 (suministro monofásico)
h) Habilitaciones para vivienda en vías de regularización (parcial o totalmente edificadas), calificados como Asentamientos Humanos Marginales o Pueblos Jóvenes	700 (suministro monofásico)	400 (suministro monofásico)	300 (suministro monofásico)	250 (suministro monofásico)
i) Habilitaciones pre-Urbanas, tipos pecuarios o huertas (Zona P-U)	2 000	1 500	1 000	1 000
j) Lotizaciones para la industria elemental y complementaria de apoyo a la industria de mayor escala (Zona I1)	4 000	1 100	—	—

Anexo 2

Matriz de operacionalización de variables

	Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de Medición
Variable Independiente	Generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes	Es un dispositivo que genera energía eléctrica utilizando el principio de tornillo de Arquímedes, está formado por una superficie cilíndrica y que en su contorno tiene instaladas las hélices en forma de espiral. (Ramos, Ramos y Sánchez, 2020)	Se dimensiona la turbina con respecto al caudal disponible, el salto y cálculos matemáticos.	Cálculos matemáticos	Cálculo de torque Velocidad angular Potencia	De razón
Variable Dependiente	Demanda eléctrica	Es la intensidad de corriente, o potencia eléctrica, relativa a un intervalo de tiempo específico, que absorbe una determinada carga para funcionar (Ninantay, 2019).	Es la potencia eléctrica mínima expresada en kW que requiere una vivienda rural para ser dotada de servicio público de electricidad y permitir el desarrollo económico y tecnológico de sus habitantes.	Mínima Demanda máxima	Suministro Monofásico (W)	De razón
				Nivel de salto	Salto bruto	
				Consumo de energía en el ámbito rural	Consumo de energía por AD (Kwh-mes)	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 3

Validación de instrumentos

Criterios	Detalle	Calificación
Suficiencia	El ítem pertenece a la dimensión y basta para obtener la medición de esta.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Claridad	El ítem se comprende fácilmente, es decir, su sintáctica y semántica son adecuadas.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Coherencia	El ítem tiene relación lógica con el indicador que está midiendo.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Relevancia	El ítem es esencial o importante, es decir, debe ser incluido.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo

Dimensión	Indicador	Ítem	Suficiencia	Claridad	Coherencia	Relevancia	Observación
Cálculos matemáticos	Cálculo de torque	FR1				1	
	Velocidad angular					1	
	Potencia					1	
Estimación del caudal	Nivel de caudal mínimo	FR1				1	
Nivel de salto	Salto bruto			1			
Mínima Demanda máxima	Suministro Monofásico (W)	FR2			1		
Consumo de energía en el ámbito rural	Consumo de energía por AD (Kwh-mes)		1				

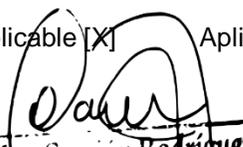
Opinión de aplicabilidad:

Aplicable [X]

Aplicable después de corregir []

No aplicable

[]


Carlos Carrion Rodriguez
 Ingeniero Mecánico Electricista
 CIP N° 60507

Lunes, 01 de noviembre de 2021.

Criterios	Detalle	Calificación
Suficiencia	El ítem pertenece a la dimensión y basta para obtener la medición de esta.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Claridad	El ítem se comprende fácilmente, es decir, su sintáctica y semántica son adecuadas.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Coherencia	El ítem tiene relación lógica con el indicador que está midiendo.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Relevancia	El ítem es esencial o importante, es decir, debe ser incluido.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo

Dimensión	Indicador	Ítem	Suficiencia	Claridad	Coherencia	Relevancia	Observación
Cálculos matemáticos	Cálculo de torque	FR1				1	
	Velocidad angular					1	
	Potencia					1	
Estimación del caudal	Nivel de caudal mínimo				1		
Nivel de salto	Salto bruto		1				
Mínima Demanda máxima	Suministro Monofásico (W)	FR2			1		
Consumo de energía en el ámbito rural	Consumo de energía por AD (Kwh-mes)				1		

Opinión de aplicabilidad:

Aplicable [x]

Aplicable después de corregir []

No aplicable []


 Jose Samuel Vidarte Mejia
 INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA
 REG. C.I.P. 211899

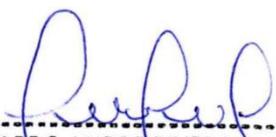


Miércoles, 03 de noviembre de 2021

Criterios	Detalle	Calificación
Suficiencia	El ítem pertenece a la dimensión y basta para obtener la medición de esta.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Claridad	El ítem se comprende fácilmente, es decir, su sintáctica y semántica son adecuadas.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Coherencia	El ítem tiene relación lógica con el indicador que está midiendo	1: de acuerdo 0: en desacuerdo
Relevancia	El ítem es esencial o importante, es decir, debe ser incluido.	1: de acuerdo 0: en desacuerdo

Dimensión	Indicador	Ítem	Suficiencia	Claridad	Coherencia	Relevancia	Observación
Cálculos matemáticos	Cálculo de torque	FR1				1	
	Velocidad angular					1	
	Potencia					1	
Estimación del caudal	Nivel de caudal mínimo				1		
Nivel de salto	Salto bruto		1				
Mínima Demanda máxima	Suministro Monofásico (W)	FR2		1			
Consumo de energía en el ámbito rural	Consumo de energía por AD (Kwh-mes)			1			

Opinión de aplicabilidad: Aplicable [**X**] Aplicable después de corregir [] No aplicable []



RICARDO ANDRE RIVERA FARRO
 INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
 REG. CIP. 216535

Lunes, 01 de noviembre de 2021.

Anexo 4

Ficha de registro 1

FR 1 - FICHA DE REGISTRO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAUDALES DEL CANAL GARBANZAL.				
Investigadores: Carrión Suyón, Gian Carlo Felipe Gonzáles Sánchez, José Antonio				
Objetivo: Identificar el estiaje del canal Garbanzal para diseñar el generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes (Variable Independiente).				
Ubicación: Caserío Tumi de Oro – Provincia de Chiclayo – Departamento Lambayeque				
CUADRO DE OFERTA DE AGUA EN CANAL GARBANZAL (m³/s)				
Fecha	2010-2011	2011-2012	2012-2013	Oferta Máxima
Enero	1.6	1.6	1.6	1.6
Febrero	1.6	1.6	1.7	1.7
Marzo	1.7	1.6	1.7	1.7
Abril	1.0	1.2	1.2	1.2
Mayo	0.4	0.8	1.2	0.4
Junio	0.4	0.4	0.4	0.4
Julio	0.4	0.4	0.4	0.4
Agosto	0.4	0.4	0.4	0.4
Setiembre	0.4	0.4	0.4	0.4
Octubre	0.4	0.4	0.4	0.4
Noviembre	0.4	0.4	0.4	0.4
Diciembre	0.4	0.4	0.6	0.6

Anexo 5

Ficha de registro 2

FR 2 - FICHA DE REGISTRO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS DE CALIFICACIÓN ELÉCTRICA PARA VIVIENDA RURAL.

Investigadores: Carrión Suyón, Gian Carlo Felipe.

González Sánchez, José Antonio.

Objetivo: Identificar la potencia de salida del generador hidro eléctrico para satisfacer la demanda eléctrica de una vivienda rural (variable dependiente).

CUADRO DE CALIFICACIÓN ELÉCTRICA PARA ELABORACIÓN DE PROYECTOS DE SUBSISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN SECUNDARIA – MINEM.

Tipo de Habilitación	Sector de Distribución Típico 1 (W)	Sector de Distribución Típico 2 – (W)	Sector de Distribución típico 3 – (W)	Sector de Distribución típico 4 (W)
a) Habilitaciones de baja densidad poblacional, tipo 1 (Zonas R1-S y R1)	1 500 + 3 W/m ² hasta un máximo de 10 kW (suministro trifásico)	800 +1 W/m ² hasta un máximo de 5 kW (suministro trifásico)	-	-
b) Habilitaciones de baja densidad poblacional, tipo 2 (Zona R2)	1 500	800	-	-
c) Habilitaciones de media densidad poblacional, tipo 3 (Zona R3)	1 300	700	-	-
d) Habilitaciones de media densidad poblacional, tipo 4 (Zona R4)	900 (suministro monofásico)	900 (suministro monofásico)	-	-
e) Habilitaciones de alta densidad poblacional, para viviendas multifamiliares	11 W/m ² del área techada total, con un mínimo de 900 W	11 W/m ² del área techada total, con un mínimo de 700 W	-	-

f) Habilitaciones para vivienda taller (Zona 11-R)	1 000	1 000	-	-
g) Habilitaciones para vivienda en vías de regularización (parcial o totalmente edificadas), calificados como Centros Poblados, incluyendo agrupaciones de vivienda en zonas rurales	700 300 (*) (suministro monofásico)	300 200 (*) (suministro monofásico)	250 200 (*) (suministro monofásico)	200 (suministro monofásico)
h) Habilitaciones para vivienda en vías de regularización (parcial o totalmente edificadas), calificados como Asentamientos Humanos Marginales o Pueblos Jóvenes	700 (suministro monofásico)	400 (suministro monofásico)	300 (suministro monofásico)	250 (suministro monofásico)
i) Habilitaciones pre-Urbanas, tipos pecuarios o huertas (Zona P-U)	2 000	1 500	1 000	1 000
j) Lotizaciones para la industria elemental y complementaria de apoyo a la industria de mayor escala (Zona 11)	4 000	1 100	-	-

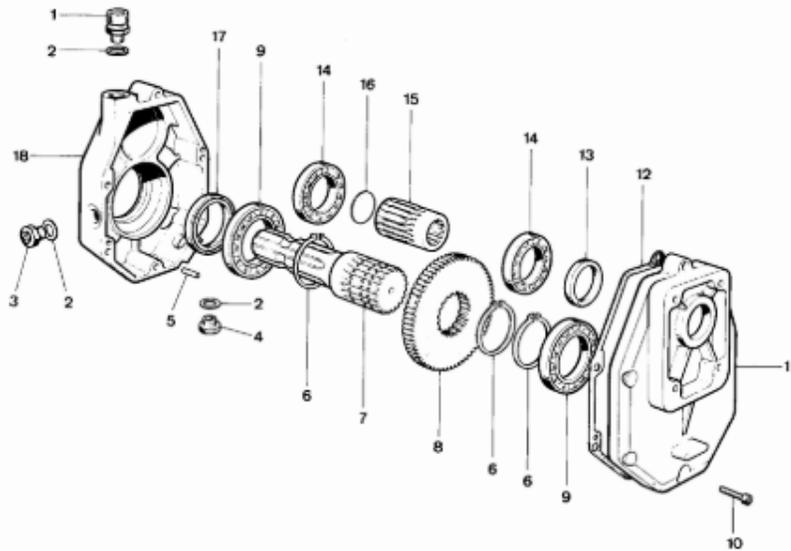
Anexo 6

Caja multiplicadora ROGIMAR.

HIDRAULICA ROGIMAR S.A.
Despiece de

Catálogo de Cajas Multiplicadoras
STM 50000

SERIE 50000



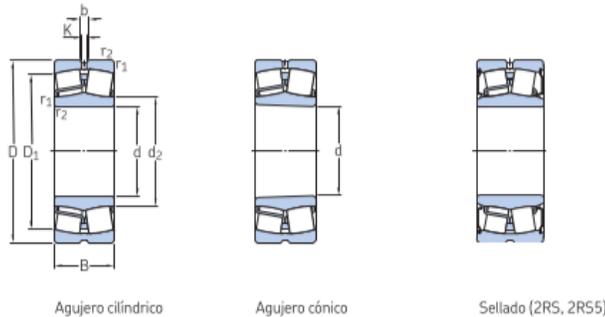
STM- (SERIE 50000)
Para Bombas del GR I

NOTA.-Para solicitar cualquier pieza de repuesto de la caja indicar el N° indicativo de la misma

Anexo 7

Rodamiento de rodillos a rótula – 21314 E

9.1 Rodamientos de rodillos a rótula d 60 – 80 mm



Dimensiones principales	Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades nominales		Masa	Designaciones			
	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite		Rodamiento con agujero cilíndrico	agujero cónico		
d	D	B								
mm			kN	kN	r. p. m.	kg	–			
60	110	28	159	166	18,6	5 600	7 500	1,15	▶ 22212 E	▶ 22212 EK
	110	34	159	166	18,6	–	2 700	1,3	▶ BS2-2212-2RS/VT143	▶ BS2-2212-2RSK/VT143
	130	31	217	240	26,5	4 800	6 300	2,1	▶ 21312 E	▶ 21312 EK
	130	46	325	335	36	4 000	5 300	3,1	▶ 22312 E	▶ 22312 EK
	130	46	325	335	36	4 000	5 300	3,1	▶ 22312 E/VA405	22312 EK/VA405
	130	53	325	335	36	–	2 500	3,4	▶ BS2-2312-2RS/VT143	–
65	100	35	137	173	20,4	–	2 600	0,95	24013-2RS5W/VT143	–
	100	35	137	173	20,4	4 300	6 300	0,95	24013 CC/W33	24013 CCK30/W33
	120	31	198	216	24	5 000	7 000	1,55	▶ 22213 E	▶ 22213 EK
	120	38	198	216	24	–	2 400	1,6	▶ BS2-2213-2RS/VT143	▶ BS2-2213-2RSK/VT143
	140	33	243	270	29	4 300	6 000	2,55	▶ 21313 E	▶ 21313 EK
	140	48	357	360	38	3 800	5 000	3,75	▶ 22313 E	▶ 22313 EK
70	140	48	357	360	38	3 800	5 000	3,75	▶ 22313 E/VA405	22313 EK/VA405
	140	56	357	360	38	–	2 400	4,15	▶ BS2-2313-2RS/VT143	–
	125	31	213	228	25,5	5 000	6 700	1,55	▶ 22214 E	▶ 22214 EK
	125	38	213	228	25,5	–	2 300	1,8	▶ BS2-2214-2RS/VT143	▶ BS2-2214-2RSK/VT143
	150	35	291	325	34,5	4 000	5 600	3,1	▶ 21314 E	▶ 21314 EK
	150	51	413	430	45	3 400	4 500	4,55	▶ 22314 E	▶ 22314 EK
75	150	51	413	430	45	3 400	4 500	4,55	▶ 22314 E/VA405	22314 EK/VA405
	150	60	413	430	45	–	2 100	5,1	▶ BS2-2314-2RS/VT143	–
	115	40	181	232	28,5	–	2 300	1,55	24015-2RS5/VT143	–
	115	40	181	232	28,5	3 800	5 300	1,55	▶ 24015 CC/W33	24015 CCK30/W33
	130	31	217	240	26,5	4 800	6 300	1,7	▶ 22215 E	▶ 22215 EK
	130	38	217	240	26,5	–	2 200	2,1	▶ BS2-2215-2RS/VT143	▶ BS2-2215-2RSK/VT143
80	160	37	291	325	34,5	4 000	5 600	3,75	▶ 21315 E	▶ 21315 EK
	160	55	462	475	48	3 200	4 300	5,55	▶ 22315 E	▶ 22315 EK
	160	55	462	475	48	3 200	4 300	5,55	▶ 22315 EJA/VA405	22315 EKJA/VA405
	160	64	462	475	48	–	2 100	6,5	▶ BS2-2315-2RS/VT143	▶ BS2-2315-2RSK/VT143
	140	33	243	270	29	4 300	6 000	2,1	▶ 22216 E	▶ 22216 EK
	140	40	243	270	29	–	2 000	2,4	▶ BS2-2216-2RS/VT143	▶ BS2-2216-2RSK/VT143
170	170	39	331	375	39	3 800	5 300	4,45	▶ 21316 E	▶ 21316 EK
	170	58	516	530	54	3 000	4 000	6,6	▶ 22316 E	▶ 22316 EK
	170	58	516	530	54	3 000	4 000	6,6	▶ 22316 EJA/VA405	22316 EKJA/VA405
	170	67	516	530	54	–	2 000	7,2	▶ BS2-2316-2RS/VT143	–

9.1



Anexo 8
Generador Ginlong.



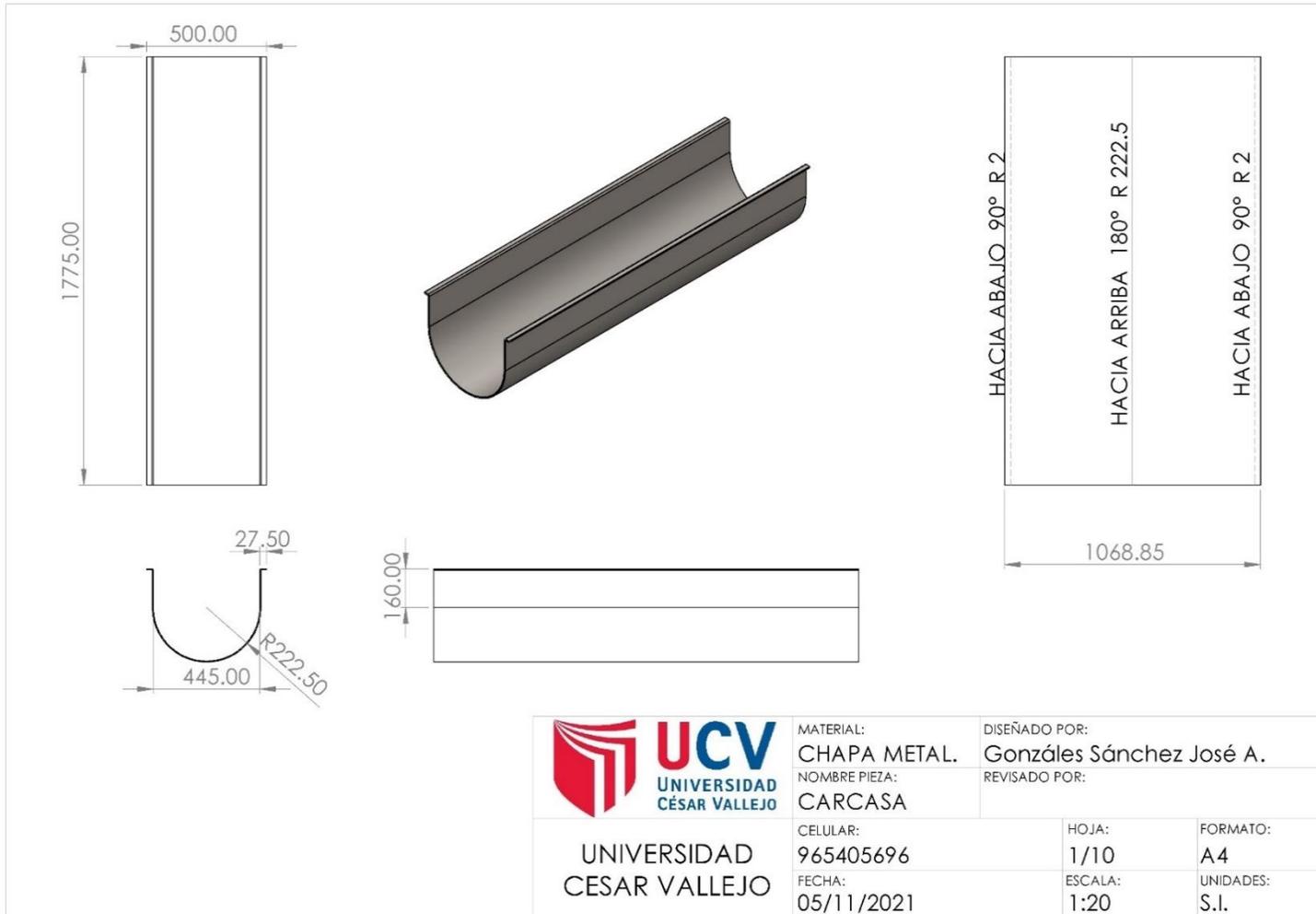
500w (GL-PMG-500A)

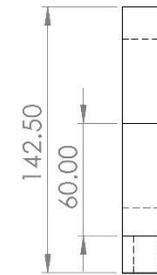
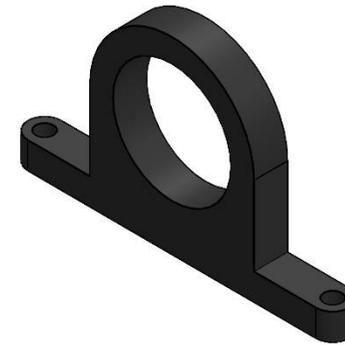
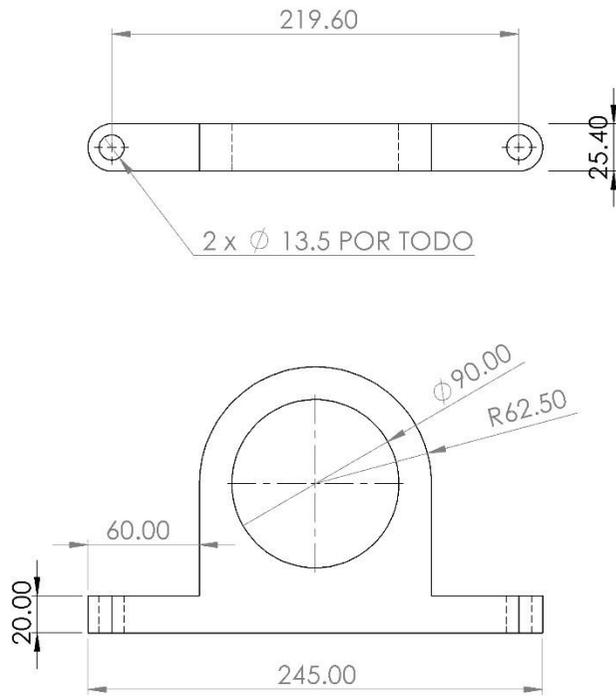
Min. Order: 1 Piece
Production Capacity: 3,000 PCS/Month
Transport Package: Packing Suitable for International Shipping
Payment Terms: L/C, T/T
Ningbo Ginlong Technologies
Co., Ltd.
Zhejiang, China

Model NO.	GL-PMG-500A
Trademark	Ginlong
Origin	China

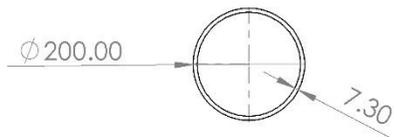
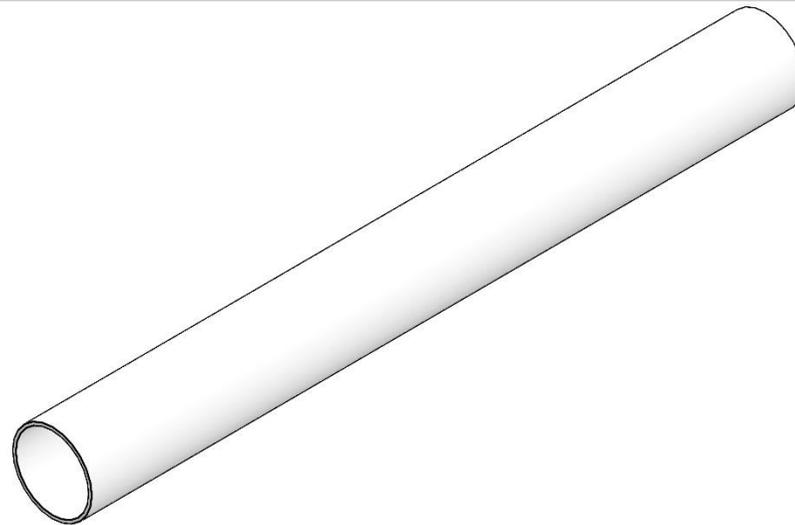
Output Power: 500w	Rated Rpm: 450
Specification	0.5kw
HS Code	8503003000

Anexo 9
Planos





 UCV UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	MATERIAL: HIERRO FUNDIDO	DISEÑADO POR: Gonzáles Sánchez José A.	
	NOMBRE PIEZA: CHUMACERA	REVISADO POR:	
UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO	CELULAR: 965405696	HOJA: 2/10	FORMATO: A4
	FECHA: 05/11/2021	ESCALA: 1:3	UNIDADES: S.I.



UNIVERSIDAD
CESAR VALLEJO

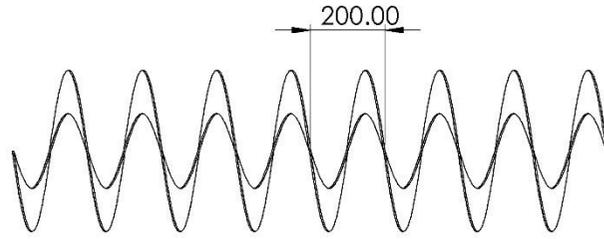
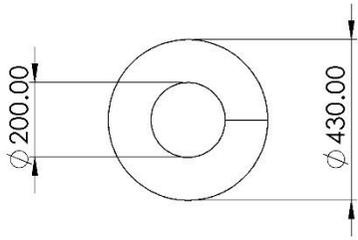
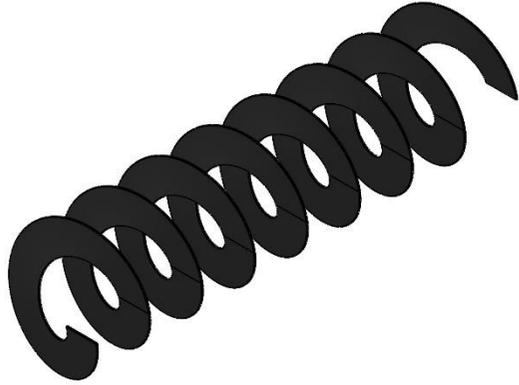
MATERIAL:
PCV RÍGIDO
NOMBRE PIEZA:
TUBO

CELULAR:
965405696
FECHA:
05/11/2021

DISEÑADO POR:
González Sánchez José A.
REVISADO POR:

HOJA:
3/10
ESCALA:
1:10

FORMATO:
A4
UNIDADES:
S.I.



área de una hélice=116202.41 mm²



UNIVERSIDAD
CESAR VALLEJO

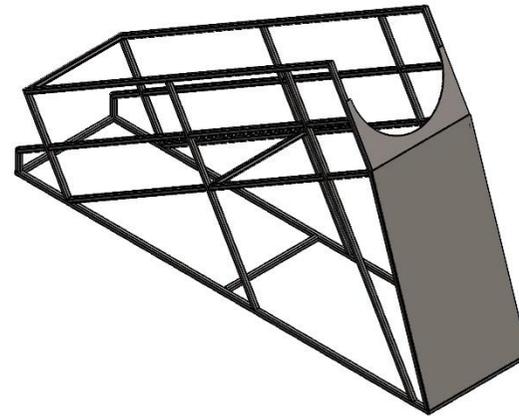
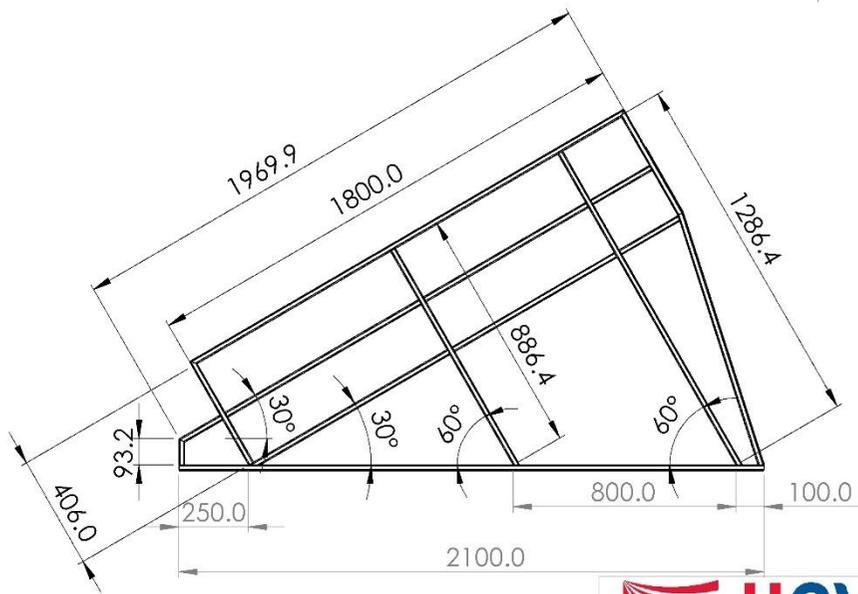
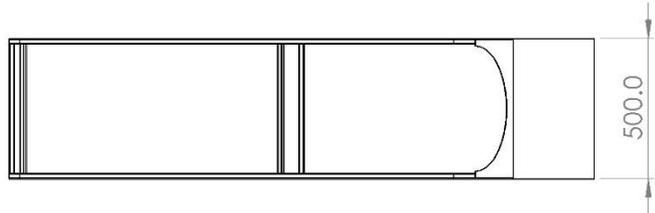
MATERIAL:
PCV RÍGIDO
NOMBRE PIEZA:
Helices

CELULAR:
965405696
FECHA:
05/11/2021

DISEÑADO POR:
González Sánchez José A.
REVISADO POR:

HOJA:
4/10
ESCALA:
1:15

FORMATO:
A4
UNIDADES:
S.I.



UNIVERSIDAD
CESAR VALLEJO

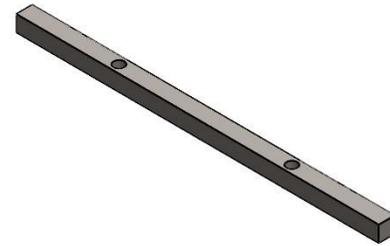
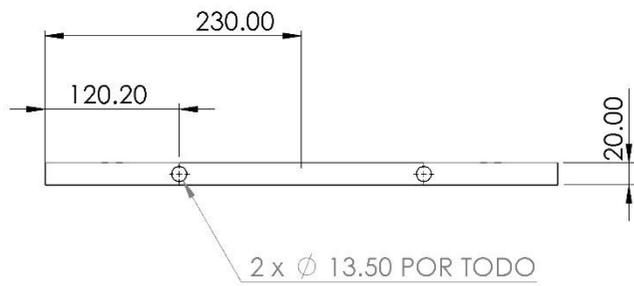
MATERIAL:
Acero ASTM A36
NOMBRE PIEZA:
BASE DEL TORNILLO ARQ..

DISEÑADO POR:
González Sánchez José A.
REVISADO POR:

CELULAR:
965405696
FECHA:
05/11/2021

HOJA:
5/10
ESCALA:
1:20

FORMATO:
A4
UNIDADES:
S.I.



UNIVERSIDAD
CESAR VALLEJO

MATERIAL:

Acero ASTM A36

NOMBRE PIEZA:

SOPORT. CHUMACERA INF.

DISEÑADO POR:

González Sánchez José A.

REVISADO POR:

CELULAR:

965405696

FECHA:

05/11/2021

HOJA:

6/10

ESCALA:

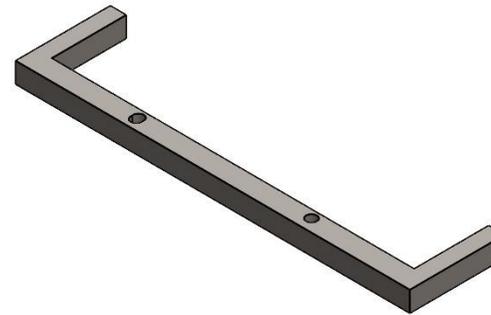
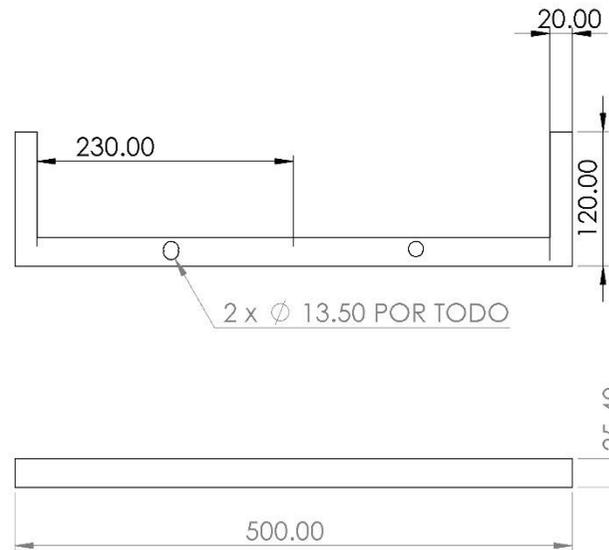
1:5

FORMATO:

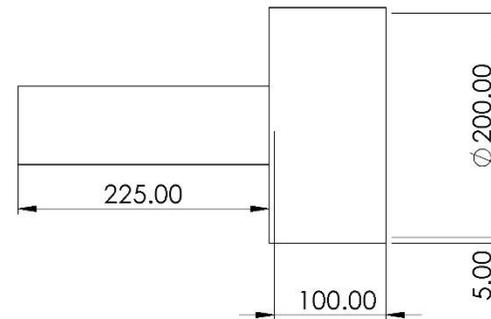
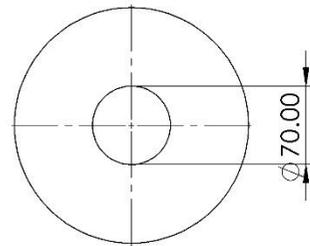
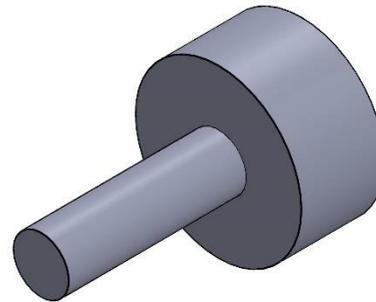
A4

UNIDADES:

S.I.



 <p>UCV UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO</p>	<p>MATERIAL: Acero ASTM A36</p>	<p>DISEÑADO POR: González Sánchez José A.</p>	
	<p>NOMBRE PIEZA: SOPORT. CHUMACERA SUP.</p>	<p>REVISADO POR:</p>	
<p>UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO</p>	<p>CELULAR: 965405696</p>	<p>HOJA: 7/10</p>	<p>FORMATO: A4</p>
	<p>FECHA: 05/11/2021</p>	<p>ESCALA: 1:5</p>	<p>UNIDADES: S.I.</p>



UNIVERSIDAD
CESAR VALLEJO

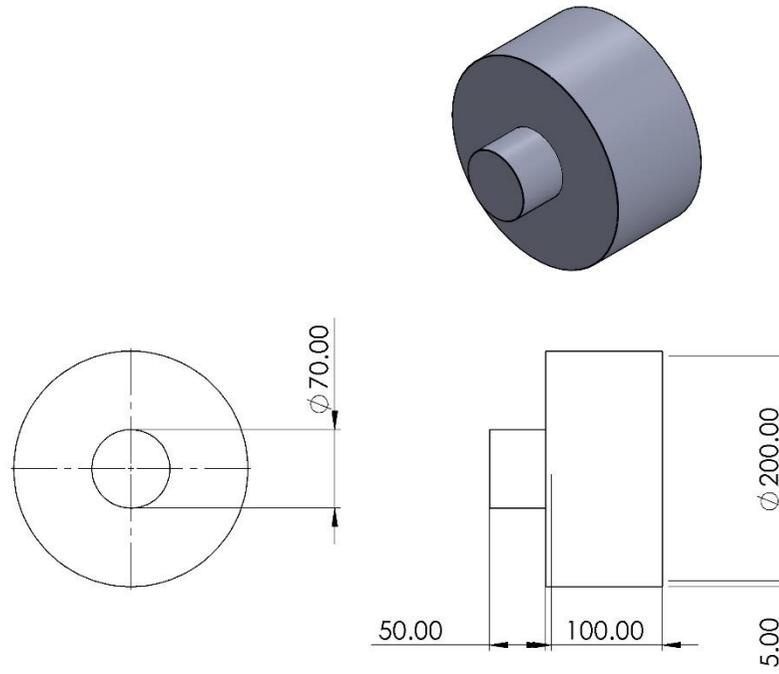
MATERIAL:
Acero ASTM A36
NOMBRE PIEZA:
TAPA DE TUBO EXT. SUP.

DISEÑADO POR:
González Sánchez José A.
REVISADO POR:

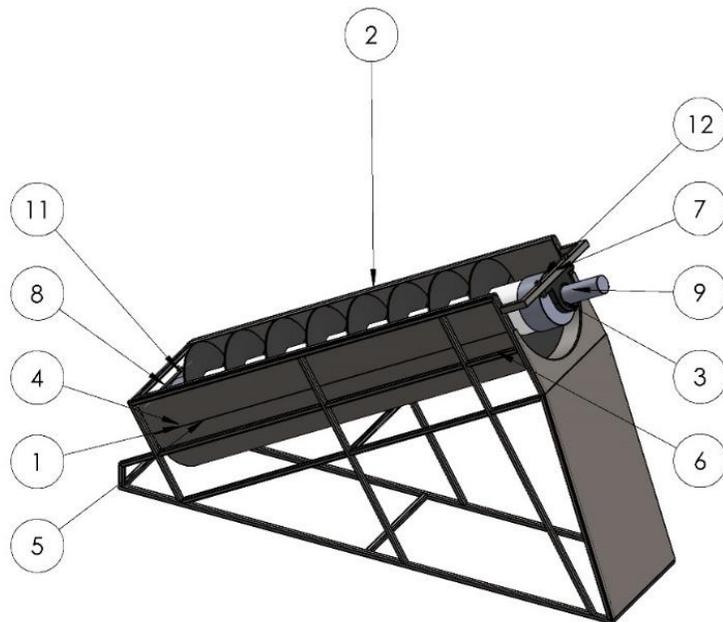
CELULAR:
965405696
FECHA:
05/11/2021

HOJA:
8/10
ESCALA:
1:5

FORMATO:
A4
UNIDADES:
S.I.



 UCV UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	MATERIAL: Acero ASTM A36	DISEÑADO POR: Gonzáles Sánchez José A.	
	NOMBRE PIEZA: TAPA DE TUBO EXT. SUP.	REVISADO POR:	
UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO	CELULAR: 965405696	HOJA: 9/10	FORMATO: A4
	FECHA: 05/11/2021	ESCALA: 1:5	UNIDADES: S.I.



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	NUEVA BASE	1
2	CARCAZA	1
3	CHUMACERA	2
4	EJE	1
5	TAPAS LATERALES	1
6	HÉLICE	1
7	PERFIL	1
8	PERFIL PARA CHUMACERA INFERIOR	1
9	AFBMA 12.1.4.1 - 0700-90 - 34,DE,NC,34_68	2
10	B18.2.3.2M - Formed hex screw, M10 x 1.5 x 60 --60WN	4
11	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M12 x 1.75 --N	4
12	TAPAS lateral superior	1



UNIVERSIDAD
CESAR VALLEJO

MATERIAL:	DISEÑADO POR: González Sánchez José A.		
NOMBRE PIEZA: TORNILLO ARQUÍMEDES	REVISADO POR:		
CELULAR: 965405696	HOJA: 10/10	FORMATO: A4	
FECHA: 05/11/2021	ESCALA: 1:20	UNIDADES: S.I.	

Anexos 10

La presente investigación se basó en la selección del material de PVC para las hélices y eje hueco. Y se recomendó el material reciclado con **criterio** de comprometernos con el desarrollo sostenible, medio ambiente y reducir los **costos** de la implementación de la turbina basado en tornillo de Arquímedes a escala de autoconsumo. Así también, haciendo énfasis que la Unión Europea está fomentando desde el año 2003 el reciclaje de Policloruro de Vinilo mediante su organización llamada Recovinyll, donde sus estudios señalan que este material tiene una naturaleza termoplástica, se puede calentar y moldear o extruir muchas veces para formar nuevos productos sin pérdidas de rendimiento técnico. Y que el proceso de reciclaje Vinyloop no disminuye de manera medible la longitud de la cadena de moléculas de PVC debido a sus **propiedades** y que ha sido probado en tuberías de PVC reciclado, reduciendo así los **costos** en petróleo como materia prima para crear nuevas tuberías.

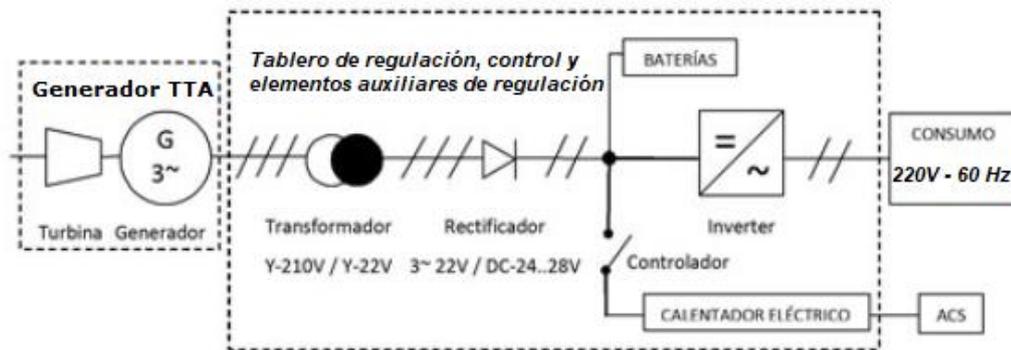
Acotar también que el MINAM está apostando por la economía circular proponiendo un nuevo modelo de negocio al valorar el reciclaje, es por ello que se inauguró una planta de reciclaje RECICLOPLAS ubicada en el Callao, maximizando así los beneficios ambientales, sociales y económicos.

Sistema de balanceo y control de parámetros eléctricos para consumo final.

Los equipos y electrodomésticos que se usan en Perú se diseñan para funcionar a 220V CA - 60Hz, valores que proporciona la red eléctrica del SEIN. Por este motivo, nuestro sistema de generación debe garantizar que la energía eléctrica sea estable dentro de estos valores, de tal manera que si en un momento dado el consumo de la vivienda rural aumenta no se provoquen variaciones en los parámetros eléctricos de voltaje y frecuencia debido a cambios en las condiciones de revolución de la turbina, es decir que esta acelere o desacelere, lo que puede conllevar a un colapso del sistema e interrupción del fluido eléctrico. Para este propósito se debe instalar una etapa intermedia que actúe como un sistema estabilizador entre el generador y el tablero de distribución. El proceso por el que pasa la energía eléctrica previo al consumidor final es como sigue:

- Transformación: La corriente alterna trifásica proporcionada por el generador se reduce a 24V mediante un transformador.

- Rectificación: mediante un puente de diodos se rectifica la corriente alterna a corriente continua.
- Control de carga: la energía sobrante es en caso de producirse más de lo que se consume se dirige a un sistema de almacenamiento de energía formado por un banco de baterías, o en el caso de estar cargadas al 100%, a un calentador de agua.
- Inversión: La corriente continua se convierte a alterna a través del inversor ondulador, los valores de voltaje y frecuencia de salida son 220V-60Hz.



Esquema eléctrico del sistema de balanceo

Una vez que la corriente ha pasado por estas etapas ya se dispondrá de electricidad en las condiciones habituales pudiendo hacer funcionar sin problemas a toda clase de electrodomésticos y equipos de iluminación.