



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO DE UNA MICRO CENTRAL HIDRÁULICA DE TORNILLO DE  
ARQUÍMEDES PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA AL  
COMPLEJO TURÍSTICO HUACHITO DEL CANTÓN MORÓNA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: JOHN ALEXANDER FAREZ BENALCAZAR

TUTOR: ING. FRAN ZHOVANI REINOSO AVECILLAS, PhD.

Cuenca - Ecuador

2023

# CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, John Alexander Farez Benalcazar con documento de identificación N° 1401255961 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 10 de Agosto 2023

Atentamente,



---

John Alexander Farez Benalcazar  
1401255961

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, John Alexander Farez Benalcazar con documento de identificación N° 1401255961, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Diseño de una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Moróna", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 10 de Agosto 2023

Atentamente,



---

John Alexander Farez Benalcazar

1401255961

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Fran Zhovani Reinoso Avecillas con documento de identificación N° 0102257925, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UNA MICRO CENTRAL HIDRÁULICA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA AL COMPLEJO TURÍSTICO HUACHITO DEL CANTÓN MORÓNA, realizado por John Alexander Farez Benalcazar con documento de identificación N° 1401255961, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 10 de Agosto 2023

Atentamente,



---

Ing. Fran Zhovani Reinoso Avecillas, PhD  
0102257925

## **Dedicatoria**

El presente trabajo de investigación va dedicado principalmente para mis padres, quienes han sido mi inspiración y motivación en el proceso universitario.

A mi padre, por forjar mi carácter y persona, por ser un apoyo en cada paso que doy y cada error que cometo, por su sabiduría ante las distintas circunstancias y eventos de la vida.

A mi madre, por asegurar mi felicidad y bienestar, por ser mi confidente y consejera sabia dispuesta a escucharme y alentarme en mis momentos más oscuros con el amor incondicional que me brinda.

Cada sacrificio realizado para brindarme las mejores oportunidades y necesidades para mi son invaluableles. El esfuerzo por verme crecer y mejorar a diario para alcanzar mis metas han sido la base sobre la cual me he sostenido para construir el camino hacia mis sueños.

Con amor,

***John Farez***

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a cada persona que supo apoyarme en el momento necesario y que han sido una parte fundamental en la realización de este trabajo de titulación.

En primer lugar, agradezco a mi tutor universitario Fran Reinoso por su orientación, paciencia y apoyo en el proceso universitario. Su experiencia técnica y acompañamiento hizo posible el desarrollo del presente trabajo de titulación.

Agradezco a los docentes que han compartido su conocimiento para hacer de mi una persona más capaz para el mundo exterior. Cada clase impartida ha ampliado mi visión académica. Cada consejo dado por los docentes han sido cimiento para forjarme como profesional y persona.

Agradezco a mi familia y a mis padres por la confianza depositada en mi, por su apoyo incondicional y comprensión a lo largo de mi camino universitario. Las palabras de ánimo son las que guardo en lo profundo de mi, siendo ellas el motor para no rendirme jamás y perseguir mis sueños y metas con determinación y voluntad.

Con mucha gratitud,

***John Farez***

Este documento fue realizado enteramente en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

## Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación . . . . .	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana . . . . .	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación . . . . .	III
Dedicatoria . . . . .	IV
Agradecimientos . . . . .	V
Abstract . . . . .	XV
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Problema</b>	<b>2</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	2
2.2. Descripción del problema . . . . .	2
2.3. Importancia y alcances . . . . .	3
2.4. Delimitación . . . . .	3
2.4.1. Espacial o geográfica . . . . .	3
2.4.2. Temporal . . . . .	4
2.4.3. Sectorial o institucional . . . . .	4
2.5. Problema General . . . . .	4
2.6. Problemas Específicos . . . . .	5
<b>3. Objetivo</b>	<b>6</b>
3.1. Objetivo General . . . . .	6
3.2. Objetivos Específicos . . . . .	6
<b>4. Hipótesis</b>	<b>7</b>
4.1. Hipótesis General . . . . .	7
4.2. Hipótesis Específicas . . . . .	7
<b>5. Marco Teórico</b>	<b>8</b>
5.1. Centrales Hidroeléctricas . . . . .	8
5.1.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas . . . . .	9
5.1.1.1. Tipos de microcentrales . . . . .	10
5.1.2. Turbinas hidráulicas . . . . .	12

5.1.2.1.	Tipos de turbinas hidráulicas . . . . .	12
5.1.2.2.	Campo operativo y eficiencia de las distintas turbinas hidráulicas	16
5.1.3.	Componentes de una microcentral con tornillo de Arquímedes . . . . .	17
5.2.	Microcentral con turbina de tornillo de Arquímedes . . . . .	19
5.2.1.	Principio de funcionamiento de Arquímedes . . . . .	19
5.2.2.	Turbina tipo tornillo de Arquímedes . . . . .	20
5.2.2.1.	Consideraciones para el cálculo del caudal de diseño . . . . .	22
5.2.2.2.	Consideraciones para el dimensionado de la turbina tipo tornillo de Arquímedes . . . . .	23
5.2.3.	Sistema de alimentación de agua a la turbina . . . . .	36
5.2.3.1.	Consideraciones para el dimensionado del canal de conducción a la turbina . . . . .	39
5.2.3.2.	Consideraciones para el dimensionado del desarenador . . . . .	43
5.2.3.3.	Consideraciones para el dimensionado de la rejilla para sólidos	50
5.2.4.	Sistema de transmisión . . . . .	52
5.2.4.1.	Criterios de diseño del sistema de transmisión . . . . .	53
5.2.4.2.	Criterios de selección de sistema de transmisión . . . . .	54
5.2.5.	Generador eléctrico . . . . .	55
5.2.5.1.	Generador Síncrono . . . . .	55
5.2.5.2.	Principio de funcionamiento del generador síncrono . . . . .	57
5.2.5.3.	Criterios de selección de un generador eléctrico . . . . .	57
<b>6.</b>	<b>Marco metodológico</b>	<b>58</b>
6.1.	Metodología de la Investigación . . . . .	58
6.2.	Metodología del Proceso . . . . .	58
6.2.1.	Datos de partida para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes . . . . .	59
6.2.1.1.	Determinación de dimensiones del cuerpo de agua . . . . .	59
6.2.1.2.	Determinación del caudal de diseño . . . . .	59
6.2.1.3.	Determinación del salto aprovechable . . . . .	68
6.2.1.4.	Determinación de la potencia aproximada de funcionamiento	69
6.2.2.	Diseño mecánico e hidráulico de la micro central de tornillo de Arquímedes. . . . .	71
6.2.2.1.	Dimensionado del diseño del tornillo de Arquímedes . . . . .	71
6.2.2.2.	Dimensionado de la canaleta . . . . .	77
6.2.2.3.	Dimensionado del canal de conducción . . . . .	78
6.2.2.4.	Dimensionado del desarenador . . . . .	81
6.2.2.5.	Dimensionado de la rejilla para sólidos . . . . .	83
6.2.2.6.	Selección del sistema de transmisión . . . . .	84

6.2.2.7.	Selección del generador eléctrico síncrono . . . . .	85
6.2.3.	Estudio presupuestario para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes. . . . .	87
6.2.3.1.	Costos unitarios de obra civil . . . . .	88
6.2.3.2.	Costos unitarios de sistema mecánico de la micro central hidroeléctrica . . . . .	89
6.2.3.3.	Costos unitarios de sistema eléctrico y de transmisión . . . . .	90
<b>7.</b>	<b>Resultados</b>	<b>91</b>
7.1.	Parámetros iniciales para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes . . . . .	91
7.2.	Diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes . . . . .	91
7.3.	Resultados de la simulación del diseño mecánico e hidráulico de la turbina tipo Tornillo de Arquímedes en Software . . . . .	98
7.4.	Costos totales del sistema . . . . .	107
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>108</b>
<b>9.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>110</b>
	<b>Referencias</b> . . . . .	114
	<b>ANEXOS</b> . . . . .	115
	Anexo 2: Propuesta de diseño de la micro central hidroeléctrica tipo tornillo de Arquímedes . . . . .	117
	Anexo 3: Planos constructivos con vista superior y lateral de la micro central hidroeléctrica . . . . .	118
	Anexo 4: Planos constructivos de la turbina de Arquímedes . . . . .	120
	Anexo 5: Planos constructivos del eje central y las hélices del tornillo de Arquímedes	121
	Anexo 6: Planos constructivos de los ejes y tapas laterales del tornillo de Arquímedes	122
	Anexo 7: Planos constructivos de la canaleta de contención del tornillo de Arquímedes	123
	Anexo 8: Planos constructivos del soporte para el tornillo de Arquímedes . . . . .	124
	Anexo 9: Planos constructivos del perfil para la chumacera del tornillo de Arquímedes	125
	Anexo 10: Planos constructivos del perfil y la rejilla para los sólidos del canal de entrada . . . . .	126
	Anexo 11: Planos constructivos del canal de entrada hacia la turbina . . . . .	127
	Anexo 12: Planos constructivos del canal de salida desde la turbina . . . . .	128
	Anexo 12: Planos constructivos del canal de salida desde la turbina . . . . .	129

## Lista de Tablas

5.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas según su potencia . . . . .	10
5.2. Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según la OLADE . . . . .	10
5.3. Correlación de radios en función de número de hélices de la turbina tipo tornillo de Arquímedes . . . . .	24
5.4. Elementos geométricos de las secciones transversales de los canales hidráulicos . . . . .	38
5.5. Valores del coeficiente de Manning . . . . .	41
5.6. Borde libre en relación con el caudal. . . . .	43
5.7. Borde libre en relación con la base del canal. . . . .	43
5.8. Tiempo necesario para la sedimentación de distintas partículas . . . . .	45
6.1. Costos unitarios de la obra civil para instalación de la turbina de Arquímedes . . . . .	88
6.2. Costos unitarios del sistema mecánico . . . . .	89
6.3. Costos unitarios del sistema eléctrico y de transmisión . . . . .	90
7.1. Parámetros iniciales para el diseño de la micro central hidroeléctrica . . . . .	91
7.2. Parámetros principales para el diseño de la turbina de Arquímedes . . . . .	92
7.3. Parámetros mecánicos para el diseño de la turbina de Arquímedes . . . . .	93
7.4. Parámetros hidráulicos para el diseño de la turbina de Arquímedes . . . . .	94
7.5. Parámetros principales para el diseño de la canaleta de contención . . . . .	94
7.6. Parámetros principales para el diseño del canal de conducción . . . . .	95
7.7. Parámetros principales para el diseño del desarenador . . . . .	95
7.8. Parámetros principales para el diseño de la rejilla para sólidos . . . . .	96
7.9. Costos totales de la micro central hidroeléctrica . . . . .	107
9.1. Matriz de consistencia . . . . .	116

## Lista de Figuras

2.1. Ubicación del proyecto hidroeléctrico con turbina tipo Tornillo de Arquímedes	4
5.1. Central hidroeléctrica de tipo fluyente . . . . .	9
5.2. Central hidroeléctrica de pie de presa . . . . .	9
5.3. Microcentral hidroeléctrica de tornillo de Arquímedes . . . . .	11
5.4. Microcentral hidroeléctrica sin regulación de caudal . . . . .	11
5.5. Microcentral hidroeléctrica con regulación de caudal . . . . .	12
5.6. Esquema de una turbina Pelton . . . . .	13
5.7. Esquema de una turbina Michell - Banki . . . . .	13
5.8. Esquema de una turbina de tornillo de Arquímedes . . . . .	14
5.9. Esquema de una turbina Francis . . . . .	15
5.10. Esquema de una turbina Kaplan . . . . .	15
5.11. Campo operativo de las turbinas hidráulicas . . . . .	16
5.12. Curvas de eficiencia de las turbinas hidráulicas . . . . .	17
5.13. Componentes de una microcentral con tornillo de Arquímedes . . . . .	19
5.14. Esquema de una turbina de tornillo de Arquímedes . . . . .	20
5.15. Esquema de instalación de una turbina tipo tornillo de Arquímedes . . . . .	21
5.16. Propiedades del acero inoxidable AISI 316 . . . . .	22
5.17. Representación de superficies y puntos del rodete de la turbina de Arquímedes	25
5.18. Brecha de fuga entre las hélices y la canaleta de contención . . . . .	26
5.19. Representación de ángulos y longitudes que conforman la brecha de fuga . .	27
5.20. Curvas para selección del diámetro exterior de las hélices de la turbina de Arquímedes . . . . .	28
5.21. Representación de parámetros necesarios para calcular el par . . . . .	34
5.22. Esquema de turbina de tornillo de Arquímedes . . . . .	36
5.23. Esquemas de conductos hidráulicos para la conducción de agua . . . . .	37
5.24. Sección rectangular del canal hidráulico . . . . .	39
5.25. Dimensiones del desarenador para el canal de conducción . . . . .	44
5.26. Vista superior del desarenador . . . . .	44
5.27. Constante $a$ en función del diámetro . . . . .	45
5.28. Determinación de velocidad de sedimentación usando la experiencia generada por Sudry . . . . .	46

5.29. Determinación de velocidad de sedimentación usando la experiencia generada por Sellerio . . . . .	46
5.30. Determinación de velocidad de sedimentación usando la tabla generada por Arkhangelski . . . . .	47
5.31. Vista isométrica de la rejilla para sólidos . . . . .	51
5.32. Vista lateral de la rejilla para sólidos . . . . .	51
5.33. Factores de servicio en motores eléctricos . . . . .	55
5.34. Esquema de generador síncrono de imanes permanentes . . . . .	56
6.1. Fases de la metodología del proceso . . . . .	58
6.2. Complejo turístico Huachito del cantón Morona . . . . .	59
6.3. Curva de caudales del río Jurumbaino . . . . .	60
6.4. Valores del caudal mensual del río Jurumbaino en el año 2023 . . . . .	61
6.5. Sección transversal A-A del río Jurumbaino en estiaje . . . . .	62
6.6. Sección transversal B-B del río Jurumbaino en estiaje . . . . .	62
6.7. Sección A-A del río Jurumbaino en crecida. . . . .	65
6.8. Sección B-B del río Jurumbaino en crecida . . . . .	65
6.9. Salto desde la toma de agua hasta la descarga de agua al río . . . . .	69
6.10. Consumo eléctrico mensual del complejo turístico Huachito durante el año 2022-2023 . . . . .	70
6.11. Matriz de ponderación para selección de turbina hidráulica . . . . .	71
6.12. Modelo de la turbina de Arquímedes . . . . .	72
6.13. Rodamiento axial de bolas SKF . . . . .	76
6.14. Esquema de la canaleta de contención del tornillo de Arquímedes . . . . .	77
6.15. Esquema del canal de conducción a la entrada de la turbina . . . . .	78
6.16. Esquema del canal de conducción a la salida de la turbina . . . . .	79
6.17. Esquema de la rejilla para los sólidos . . . . .	83
6.18. Fotografía de la caja multiplicadora de velocidades seleccionada . . . . .	84
6.19. Características técnicas de la caja multiplicadora de velocidades . . . . .	85
6.20. Esquema del generador síncrono de imanes permanentes . . . . .	86
6.21. Características técnicas del generador síncrono . . . . .	87
7.1. Estandarización de turbinas de Arquímedes . . . . .	96
7.2. Parámetros estandarizados de Turbinas de Arquímedes . . . . .	97
7.3. Contornos de esfuerzos Von-Mises en el eje del tornillo de Arquímedes . . . . .	98
7.4. Contornos de deformación estructural en el eje del tornillo de Arquímedes . . . . .	99
7.5. Contornos de esfuerzos Von-Mises en las hélices del tornillo de Arquímedes . . . . .	99
7.6. Contornos de deformación estructural en las hélices del tornillo de Arquímedes . . . . .	100
7.7. Contornos de esfuerzos Von-Mises en la canaleta de contención del tornillo de Arquímedes . . . . .	101

7.8. Contornos de deformación estructural en la canaleta de contención del tornillo de Arquímedes . . . . .	101
7.9. Contornos de esfuerzos Von-Mises en el eje lateral del tornillo de Arquímedes	102
7.10. Contornos de deformación estructural en el eje lateral del tornillo de Arquímedes	103
7.11. Contornos de esfuerzos Von-Mises en las tapas laterales del tornillo de Arquímedes	103
7.12. Contornos de deformación estructural en las tapas laterales del tornillo de Arquímedes . . . . .	104
7.13. Contornos de esfuerzos Von-Mises en el soporte para la chumacera del tornillo de Arquímedes . . . . .	105
7.14. Contornos de deformación estructural en el soporte para la chumacera del tornillo de Arquímedes . . . . .	105
7.15. Contornos de esfuerzos Von-Mises en la turbina de Arquímedes . . . . .	106
7.16. Contornos de deformación estructural de la turbina de Arquímedes . . . . .	106

## Resumen

**E**l objetivo del proyecto de investigación es diseñar una micro central hidráulica para abastecer de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Morona, utilizando una turbina tipo tornillo de Arquímedes. Para el efecto, se realiza el estudio topográfico del sitio de instalación, la determinación del caudal instalado y la potencia normal de accionamiento para abastecer el consumo eléctrico del complejo. Finalmente, se determinan los costos de implementación del proyecto hidroeléctrico. Los resultados del proceso de diseño mecánico e hidráulico muestran que la turbina tipo tornillo de Arquímedes debe tener una generación de 1.265 kW para abastecer satisfactoriamente la demanda de energía eléctrica del complejo turístico Huachito considerando una posible propuesta de expansión.

**Palabras clave:** Micro central eléctrica, Energía Hidráulica, Tornillo de Arquímedes.

## **Abstract**

**T**he objective of the research project is to design a micro hydraulic power plant to supply electrical energy to the Huachito tourist complex in the Morona canton, using an Archimedes screw type turbine. For this purpose, a topographic study of the installation site is carried out, as well as the determination of the installed flow rate and the normal drive power to supply the electrical consumption of the complex. Finally, the costs of implementing the hydroelectric project are determined. The results of the mechanical and hydraulic design process show that the Archimedes screw type turbine must have a generation of 1,265 kW to satisfactorily supply the electrical energy demand of the Huachito tourist complex considering a possible expansion proposal.

**Keywords:** Micro power station, Hydraulic Energy, Archimedean Screw.

## 1. Introducción

**L**as energías renovables han sido tendencia en estos últimos años debido al impacto ambiental existente en la actualidad que se ha generado gracias a las energías sucias y explotación de los recursos limitados. Esta búsqueda de métodos de obtención de energía se da gracias a las necesidades energéticas que el hombre asume para poder realizar tareas como moverse rápido, cocinar, construir viviendas, calentarse, vestirse, entre otras actividades que brinden comodidad al ser humano (Correa, Gonzalez, y Pacheco, 2016). Se le da el concepto de energía renovable a los tipos de energías derivadas de fuentes naturales que se reponen a mayor velocidad de lo que pueden consumirse. Como ejemplo tenemos a la luz solar, las corrientes de agua y el viento (ONU, 2023).

Dentro de estas energías renovables se encuentra la energía hidroeléctrica, siendo este el ámbito en el cual se enmarca el proyecto. Gracias a la disponibilidad de estos recursos renovables en la región, se ha optado por la generación de energía hidroeléctrica para el abastecimiento del complejo turístico Huachito del cantón Morona. Básicamente, Ecuador cuenta con diversidad de fuentes renovables. La hidroeléctrica, por ejemplo, podría cubrir la demanda total del país en cuanto al consumo eléctrico necesario (Barragan y Llanos, 2020).

El proyecto se divide en tres fases, siendo el primero la determinación de los datos de partida para el diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica. Como segunda fase se ha considerado el diseño mecánico e hidráulico de los componentes que conforman la microcentral hidráulica utilizando software de ingeniería. En la última fase se realiza el análisis de precios unitarios para proponer un presupuesto para el desarrollo de la micro central hidráulica.

## **2. Problema**

### **2.1. Antecedentes**

La presente investigación está inspirada en reducir la huella de carbono del sitio utilizando una alternativa de energía renovable como lo es la energía hidráulica. De esta manera controlamos y reducimos el consumo de la energía en nuestro entorno. Una de las energías renovables más fundamentales dentro del Ecuador es la hidroeléctrica. Debido a la alta cantidad de ríos y corrientes de agua dulce en el país, especialmente en la región amazónica de Moróna Santiago, se puede ayudar al reemplazo de métodos de obtención de energía mediante combustibles fósiles.

El complejo turístico Huachito se encuentra ubicado en la parroquia de San Isidro, provincia de Moróna Santiago, cantón Moróna. Contiene varias casetas con el fin de utilizarlos como asaderos, canchas de ecuavoley y fútbol, un ambiente de naturaleza y un dique utilizado como balneario de los turistas.

Al ser un complejo turístico, realizando un sistema de micro generación de energía eléctrica utilizando una turbina amigable con la biodiversidad acuática como lo es la turbina tipo de tornillo de Arquímedes, se generaría un valor agregado en el turismo del lugar. Es la principal razón por el cual se ha optado por aprovechar el cuerpo de agua presente en el mismo para establecer una micro central hidráulica, aprovechando energía hidráulica para suministrar de energía eléctrica a todo el complejo turístico. La energía que consume el complejo turístico Huachito es de aproximadamente 297 kW/h mensual. Se considera un 50% extra de consumo debido a la perspectiva de expansión. Entonces, la potencia necesaria para abastecer el complejo sería de 0.61kW (Centrosur, 2023).

El caudal del río Jurumbaino está entre 1 y 1.25 metros cúbicos por segundo y con un desnivel de 1.5 metros desde la cota máxima y la cota mínima, por lo que la implementación de este sistema sería un beneficio para el complejo turístico, debido al buen aprovechamiento que se puede dar al río que circula por el terreno del mismo. También se debe considerar que este sitio tiene un dique en donde se retiene el agua del río para usarlo de balneario. Este sistema tiene semejanza a la captación de agua de una central hidroeléctrica.

### **2.2. Descripción del problema**

La presente investigación tiene el propósito de apoyar a la reducción de la huella de carbono del sitio utilizando una alternativa de energía renovable como lo es la energía hidráu-

lica. De esta manera controlamos y reducimos el consumo de la energía en nuestro entorno. Para el diseño de esta micro central hidroeléctrica se requiere un conocimiento previo del principio de Arquímedes, como el dimensionamiento y los parámetros del cuerpo de agua, para realizar los cálculos requeridos para obtener la mayor eficiencia en comparación a otros modelos alternativos de micro centrales hidráulicas. El fin de utilizar la turbina tipo tornillo de Arquímedes en este sistema de microgeneración es por su sostenibilidad en el sitio de instalación y porque es amigable con la biodiversidad que circula el río del lugar. La razón por la que se consideró este tipo de turbina también tiene que ver con las características topográficas del sitio y al comparar las eficiencias de las distintas turbinas respecto al salto del cuerpo de agua, la turbina tipo tornillo de Arquímedes es la más adecuada y económica. Esta turbina requiere un ángulo bajo de posición y un salto de agua mínimo.

### **2.3. Importancia y alcances**

En el complejo turístico Huachito, existe una posibilidad de generar energía eléctrica con el uso del caudal del río que circula por su terreno. Esto complementaría a la mitigación y al aprovechamiento de los recursos hídricos que nos brinda el sector. Dado el hecho que existe un dique en el sector, se aprovecharía esta estructura para usarlo como la captación de agua de la micro central hidráulica. Las turbinas de Arquímedes son conocidas por su alta eficiencia, lo que significa que pueden convertir una mayor parte de la energía del agua que fluye en energía mecánica debido a que tienen una gran superficie en comparación con su volumen, lo que permite un mejor flujo de agua y una menor pérdida de energía. También se destacan porque tienen un diseño relativamente simple y tienen menos piezas móviles que otros tipos de turbinas hidráulicas, haciéndolos más fáciles de mantener y reparar. Las turbinas tipo tornillo de Arquímedes se consideran amigables con los peces, ya que tienen una velocidad de rotación lenta y aspas grandes que no dañan a los peces ni a otras formas de vida acuática, evitando un impacto ambiental y a la biodiversidad.

### **2.4. Delimitación**

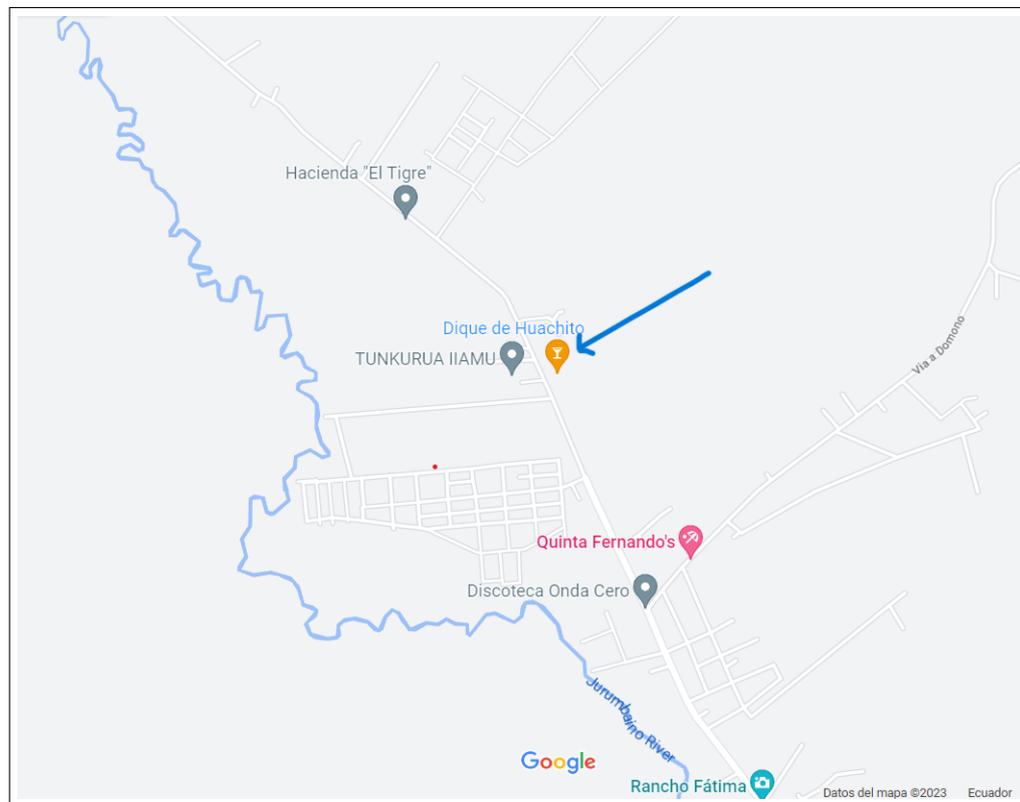
El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

#### **2.4.1. Espacial o geográfica**

La siguiente propuesta de trabajo de titulación tomará como referencia para la toma de datos el dique de Huachito ubicado en la parroquia de San Isidro, provincia de Moróna Santiago, cantón Moróna como se observa en la Figura 2.1.

## Figura 2.1

*Ubicación del proyecto hidroeléctrico con turbina tipo Tornillo de Arquímedes.*



**Nota:** Se puede observar la ubicación en donde se realizará el trabajo de titulación. La Figura fue recuperada de Google Maps (2023).

### 2.4.2. Temporal

El diseño del trabajo de titulación propone dentro de su cronograma su culminación en cuatro meses con un total de 240 horas; que corresponde al periodo académico 62, comprendido entre los meses de marzo y junio del 2023.

### 2.4.3. Sectorial o institucional

El presente trabajo de titulación se lo desarrollará dentro del sector Hidroeléctrico.

## 2.5. Problema General

- ¿Será factible diseñar una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito?

## **2.6. Problemas Específicos**

- ¿Será factible determinar los parámetros iniciales para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes?
- ¿Es posible realizar el diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes?
- ¿Se podrá elaborar un estudio presupuestario para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes?

### **3. Objetivo**

#### **3.1. Objetivo General**

- Diseñar una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Moróna.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar los parámetros iniciales para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.
- Realizar el diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.
- Elaborar un estudio presupuestario para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.

## **4. Hipótesis**

### **4.1. Hipótesis General**

- Se diseñará una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Moróna.

### **4.2. Hipótesis Específicas**

- Los parámetros iniciales determinará el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.
- Se realizará el diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.
- Se elaborará un estudio presupuestario para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.

## **5. Marco Teórico**

Para el diseño de las centrales hidroeléctricas, y dentro de ellas las micro centrales hidroeléctricas, se deben considerar los parámetros iniciales como es el caudal, el salto y la topografía del terreno. En primer lugar, vamos a escoger la turbina adecuada para las condiciones iniciales que establece el terreno, estableceremos todos los componentes de una micro central con el tipo de turbina definido. En segundo punto se analizará los procedimientos y modelos para realizar los cálculos necesarios de cada componente que conforma la mini central. En tercer lugar, se realizará un análisis técnico financiero del diseño de la mini central mediante una metodología de cálculo de precios por costos unitarios.

### **5.1. Centrales Hidroeléctricas**

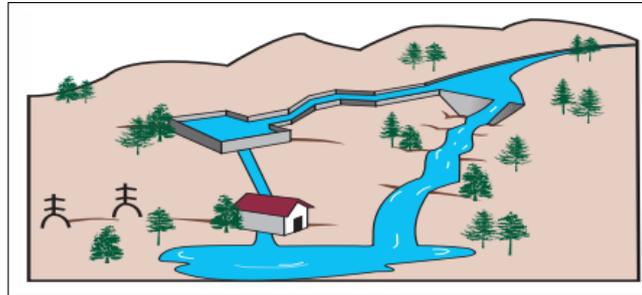
Las centrales hidroeléctricas, y dentro de ellas las micro y minicentrales hidroeléctricas, están muy condicionadas por las peculiaridades y características que presente el lugar donde vayan a ser ubicadas. Para poner en marcha una instalación de este tipo, se debe tener en cuenta la topografía del terreno que influirá tanto en la obra civil como en la selección de la maquinaria.

Según el emplazamiento de la central hidroeléctrica se realiza la siguiente clasificación general (Castro, 2006):

- Centrales de agua fluyente:  
Captan una parte del caudal del río, lo trasladan hacia la central y una vez utilizado, se devuelve al río. Se observa un ejemplo en la Figura 5.1 (Castro, 2006).

## Figura 5.1

*Central hidroeléctrica de tipo fluyente.*



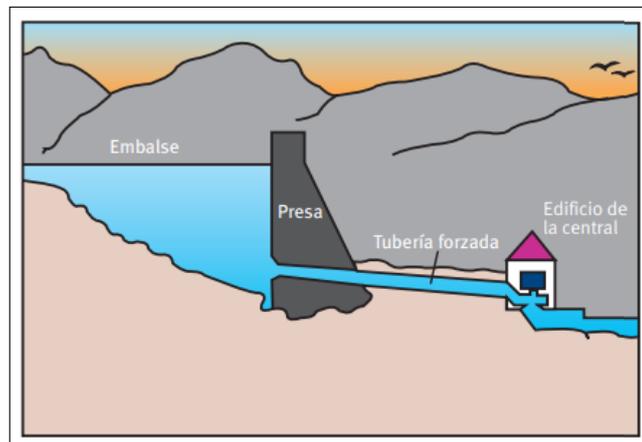
**Nota:** Tomado de (Castro, 2006).

- Centrales de pie de presa:

Se sitúan debajo de los embalses destinados a usos hidroeléctricos o a otros usos, aprovechando el desnivel creado por la propia presa. Se observa un ejemplo en la Figura 5.2 (Castro, 2006).

## Figura 5.2

*Central hidroeléctrica de pie de presa.*



**Nota:** Tomado de (Castro, 2006).

### 5.1.1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas se clasifican de acuerdo a la altura de la fuente o cabeza hidráulica. Son consideradas Pequeñas Centrales Hidroeléctricas cuando el salto se encuentra menor a los 15 metros, Medianas centrales Hidroeléctricas cuando el salto se encuentra entre

los 15 y 50 metros y Grandes Centrales Hidroeléctricas cuando superan los 50 metros. La potencia generada será la que determina el tamaño de la central hidroeléctrica (Sierra, Sierra, y Guerrero, 2011). En la Tabla 5.1 se aprecia la clasificación de las centrales hidroeléctricas según su potencia instalada.

**Tabla 5.1**

*Clasificación de las centrales hidroeléctricas según su potencia.*

Potencia	Tipo
0.1 - 0.999 MW	Pequeñas
1 - 9.99 MW	Medianas
> 10 MW	Grandes

**Nota:** La Tabla presenta la potencia según el tipo de centrales hidroeléctricas, adaptado de (Sierra y cols., 2011).

A su vez, las pequeñas centrales hidroeléctricas se subdividen en otras categorías como pico, micro, mini y pequeña generación. En la Tabla 5.2 se presentan los rangos utilizados por la OLADE, Organización Latinoamericana de Energía.

**Tabla 5.2**

*Clasificación de las pequeñas centrales hidroeléctricas según la OLADE.*

Potencia	Tipo	Salto		
		Bajo	Medio	Alto
0.5 - 5 kW	Pico Central		N. A.	
5 - 50 kW	Micro Central	<15	15 - 50	>50
50 - 500 kW	Mini Central	<20	20 - 100	>100
500 - 5000 kW	Pequeña Central	<25	25 - 130	>130

**Nota:** La Tabla presenta la clasificación de las distintas centrales hidroeléctricas correspondientes a la categoría de las pequeñas centrales, adaptado de (Sierra y cols., 2011).

#### 5.1.1.1. Tipos de microcentrales

Se les denomina micro o minicentrales a las plantas de generación de baja escala, ya que producen potencias menores de 10 MW y tienen un ordenamiento administrativo y económico llamado de Régimen Especial. La electricidad obtenida de estas minicentrales puede ser utilizada para abastecer zonas aisladas o revenderse a una red pública de distribución (Fundación Descubre, 2023). En la Figura 5.3 se observa una micro central hidráulica con tornillos de Arquímedes paralelos.

### Figura 5.3

*Microcentral hidroeléctrica de tornillo de Arquímedes.*



**Nota:** En la Figura se aprecia el uso de tornillos sinfín paralelos para la generación de energía eléctrica en un proyecto español de Sinfin Energy, tomado de (Sinfin Energy, 2019).

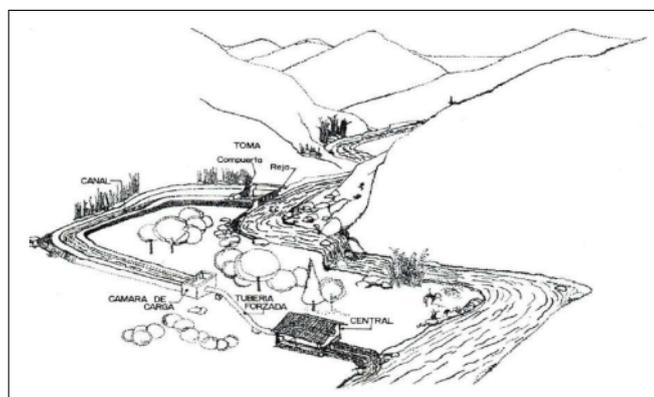
En la categoría de las microcentrales disponemos de dos tipos que son:

- Microcentrales sin Regulación:

Se los denomina así a aquellos aprovechamientos hidroeléctricos que mediante una obra de derivación desvían un determinado caudal del río, sin regularlo, y lo transportan hasta la central. En este tipo de centrales las aguas son captadas mediante un dique derivador o una derivación lateral, luego pasan a camaras sedimentadoras y de ahí a un canal de conducción de baja pendiente hasta alcanzar la cámara de carga, la tubería forzada y finalmente a las turbinas (Espinosa, Jégat, DeLeón, y Ramírez, 2021). Se puede observar la toma de agua sin regulación para una microcentral en la Figura 5.4.

### Figura 5.4

*Central hidroeléctrica sin regulación de caudal.*



**Nota:** Tomado de (Espinosa y cols., 2021).

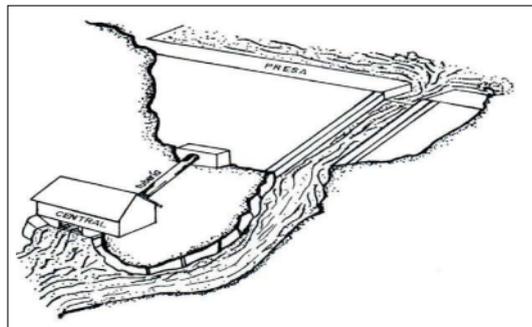
- Microcentrales con Regulación:

Se los denomina así a aquellos aprovechamientos hidroeléctricos que poseen un vaso de almacenamiento con suficiente capacidad que le permite realizar una regulación de caudales, sea esta horaria, diaria, semanal o mensual. Estos permiten adecuar el régimen de caudales del río a los requerimientos energéticos, pudiendo generar mayor potencia en las horas pico para satisfacer la energía de punta de la curva de demanda. En este tipo de centrales las aguas son captadas del embalse y conducidas a la casa de máquinas a través de una tubería forzada (Espinosa y cols., 2021).

Se puede observar la toma de agua con regulación para una microcentral en la Figura 5.5.

**Figura 5.5**

*Central hidroeléctrica con regulación de caudal.*



**Nota:** Tomado de (Espinosa y cols., 2021).

### 5.1.2. Turbinas hidráulicas

La turbina hidráulica es el elemento clave de la minicentral. Aprovecha la energía cinética y potencial que contiene el agua, transformándola en un movimiento de rotación, que transferido mediante un eje al generador produce energía eléctrica (Castro, 2006):

#### 5.1.2.1. Tipos de turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grupos:

- Turbinas de Acción:

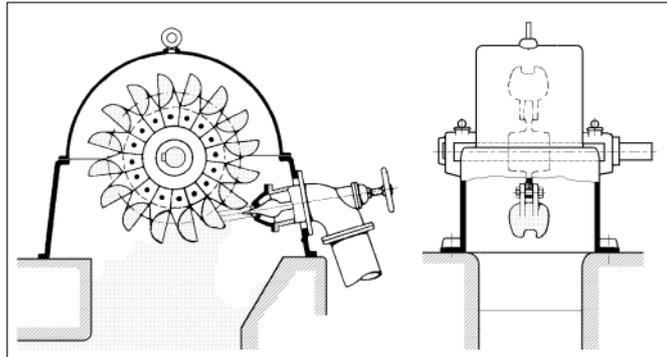
Son aquellas que aprovechan únicamente la velocidad del flujo de agua para hacerlas girar. El tipo más utilizado es el denominado turbina Pelton, aunque existen otros como la Turgo con inyección lateral y la turbina de doble impulsión o de flujo cruzado, también conocida por turbina Ossberger o Banki-Michell. La turbina tipo Tornillo de Arquímedes es considerada una turbina de acción debido a que depende del golpe del

agua para el giro (Castro, 2006).

En las Figuras 5.6 y 5.7 se observan turbinas de acción comunes en el sector hidroeléctrico. Por otro lado, en la Figura 5.8 se puede observar una turbina con el principio de Arquímedes, la cual se considera muy eficiente en bajos saltos.

### Figura 5.6

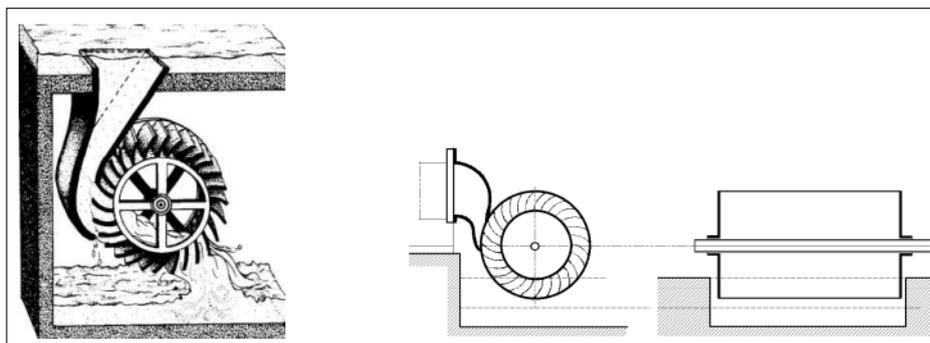
*Esquema de una turbina Pelton.*



**Nota:** Es tangencial, y la mas utilizada para grandes saltos, tomado de (Fernández, 2015).

### Figura 5.7

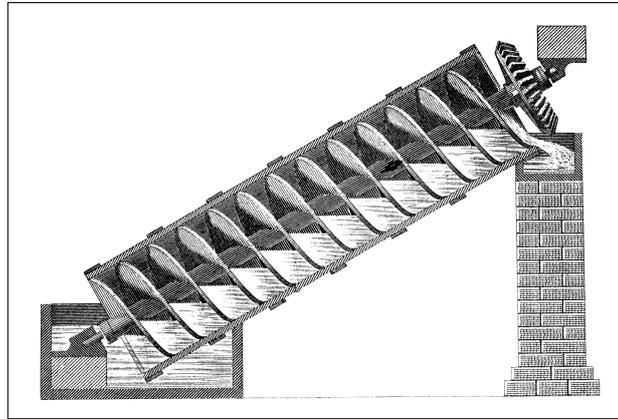
*Esquema de una turbina Michell - Banki.*



**Nota:** El agua pasa dos veces por los álabes del rodete, construido en forma de tambor; se utiliza para pequeños y grandes saltos, tomado de (Fernández, 2015).

## Figura 5.8

*Esquema de una turbina de tornillo de Arquímedes.*



**Nota:** El agua pasa por la parte superior del tornillo generando una presión entre las hélices y haciendo que estas giren por su forma helicoidal. Se utilizan en pequeños y grandes saltos, tomado de (Roca, 2021).

- Turbinas de Reacción:

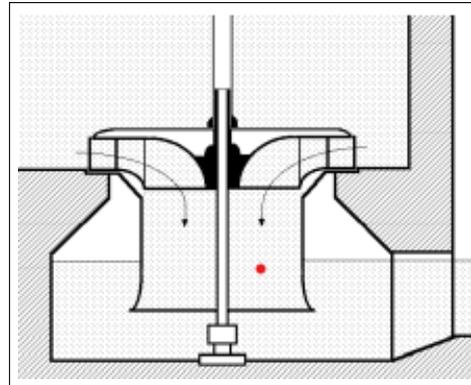
Este tipo de turbinas cuentan con un diseño de rotor que permite aprovechar la presión que aún le queda al agua a su entrada para convertirla en energía cinética. Esto hace que el agua al salir del rotor tenga una presión por debajo de la atmosférica. Las turbinas de reacción más utilizadas son las Francis y la Kaplan (Castro, 2006).

En las Figuras 5.9 y 5.10 se observan turbinas de reacción muy comunes en el sector hidroeléctrico.

La turbina Francis es radial centrípeta, con tubo de aspiración; el rodete es de fácil acceso, por lo que es muy práctica. Es fácilmente regulable y funciona a un elevado número de revoluciones; es el tipo más empleado, y se utiliza en saltos variables, desde 0,5 m hasta 180 m; pueden ser, lentas, normales, rápidas y extrarápidas.

**Figura 5.9**

*Esquema de una turbina Francis.*

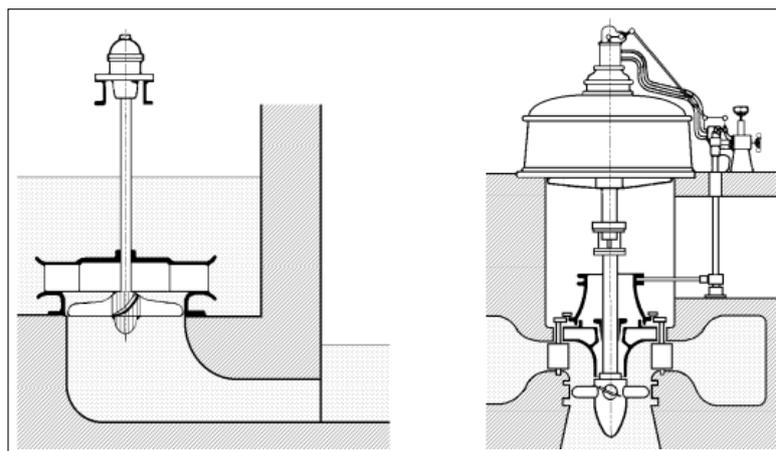


**Nota:** En la Figura se puede apreciar el esquema de una turbina Francis, muy utilizado en centrales con saltos variables, tomado de (Fernández, 2015).

Las turbinas Kaplan se caracterizan principalmente porque las palas del rodete tienen forma de hélice; se emplea en saltos de pequeña altura, obteniéndose con ella elevados rendimientos, siendo las palas orientables lo que implica paso variable. Si las palas son fijas, se denominan turbinas hélice.

**Figura 5.10**

*Esquema de una turbina Kaplan.*



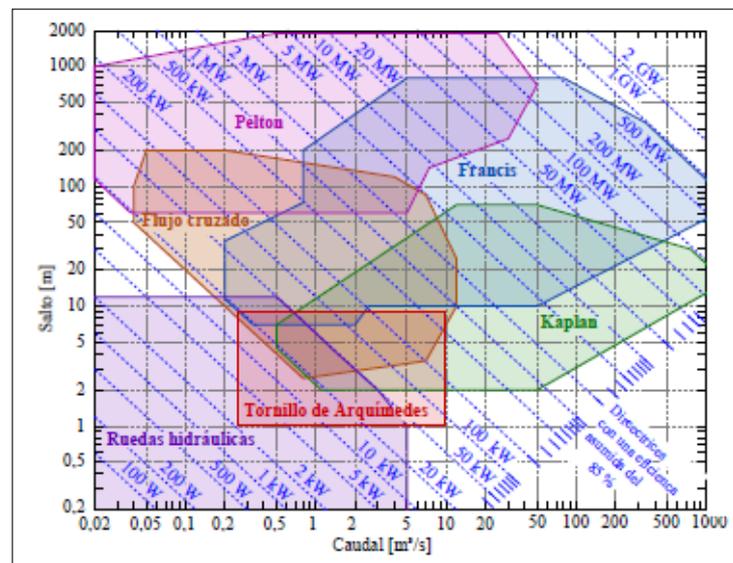
**Nota:** En la Figura se puede apreciar el esquema de una turbina Kaplan, muy utilizado en centrales con pequeños saltos, tomado de (Fernández, 2015).

### 5.1.2.2. Campo operativo y eficiencia de las distintas turbinas hidráulicas

Para escoger el tipo de turbina adecuado para una microcentral hidroeléctrica debemos considerar el uso de diagramas del campo operativo de las distintas turbinas. La mejor manera para determinar la turbina adecuada es conociendo el sector a instalarse la central. Se deben conocer las condiciones iniciales, las cuales son el salto, el caudal y la potencia necesaria para generar. En la Figura 5.11 podemos observar el rango de funcionamiento específico para cada turbina dependiendo de su salto y caudal.

**Figura 5.11**

*Campo operativo de las turbinas hidráulicas.*

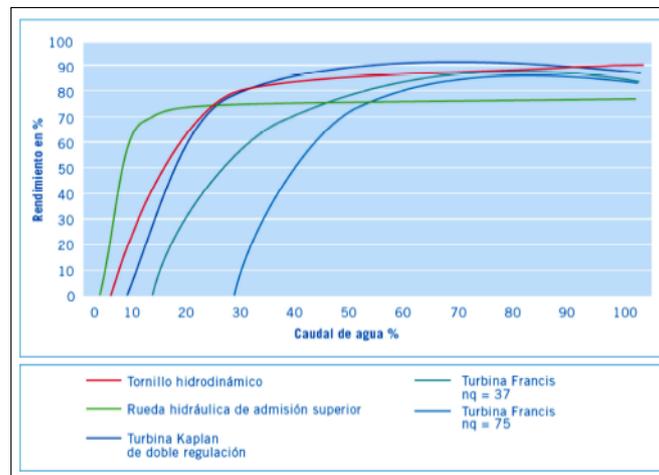


**Nota:** En la Figura se observa la potencia a generar de cada turbina según su caudal y salto, tomado de (Schwizer, 2018).

En la Figura 5.12 se aprecia las distintas eficiencias de las turbinas para considerar la más adecuada considerando el caudal del agua y así analizar su rendimiento.

**Figura 5.12**

*Curvas de eficiencia de las turbinas hidráulicas.*



**Nota:** Para la creación de estas curvas se asume que el flujo de agua se puede variar a una altura constante, tomado de (Mejia, 2011).

### 5.1.3. Componentes de una microcentral con tornillo de Arquímedes

Para el diseño de la microcentral se consideran ciertas definiciones manifestadas por Landustrie (2023), Espinosa y cols. (2021):

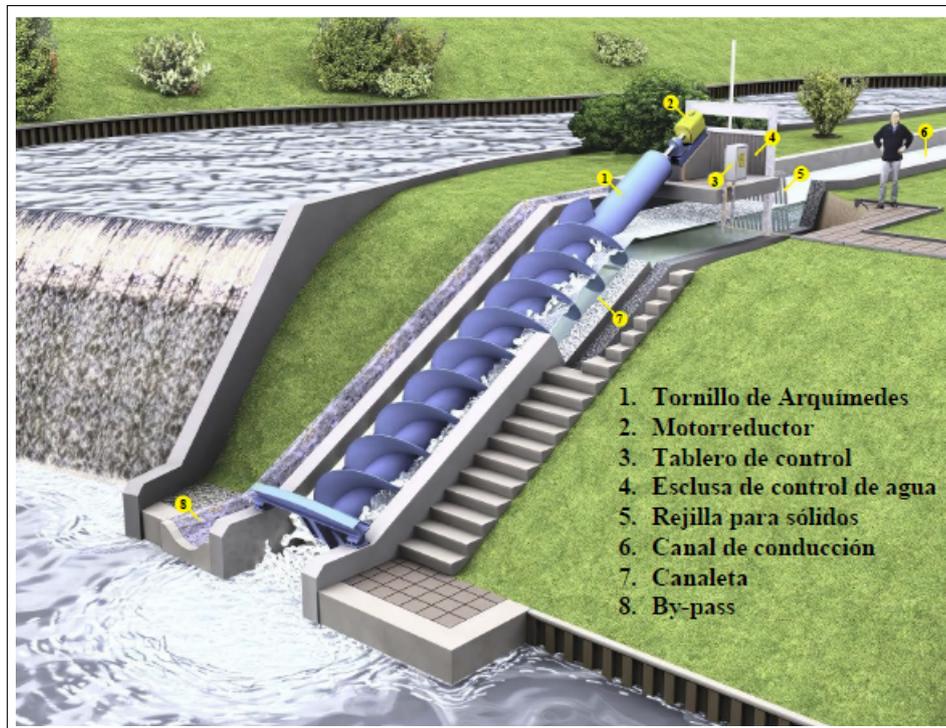
- Presa o dique:  
La presa es la obra que se construye para cerrar una garganta y conformar el vaso de almacenamiento en aquellos desarrollos con regulación. El dique derivador es una estructura hidráulica de baja altura cuya finalidad es dar a las aguas en el río durante el estiaje, la energía potencial necesaria para ser derivadas o captadas a través de la obra de toma.
- Tornillo de Arquímedes:  
Es la turbina encargada de recuperar la energía del fluido y transformarla en energía mecánica gracias a su rotación.
- Motorreductor:  
Es la combinación de una caja reguladora de velocidad y un motor. Se pueden aprovechar altas velocidades de rotación para generar altos torques o viceversa. En el caso del tornillo de Arquímedes, estos tienen un torque alto con velocidades de rotación bajas.

- **Tablero de control:**  
Permite la conexión a la red eléctrica. Contiene un inversor para adaptar la frecuencia de la corriente a la salida del generador hacia el consumidor.
  
- **Esclusa de control de agua:**  
Permite regular el caudal que ingresa a la turbina y aísla el tornillo en caso de inundación.
  
- **Desarenador:**  
Tiene como función retener ciertas partículas sólidas, especialmente arenas, transportadas por la turbulencia de las aguas, evitando así que pasen a la tubería forzada y de allí a las turbinas, donde podrían ocasionar daños importantes. Se encuentra en la entrada a la turbina.
  
- **Canal de Conducción:**  
Es un cauce artificial, el cual tiene por finalidad llevar las aguas hasta la turbina, en forma tal que estas ganen progresivamente energía potencial respecto al cauce del río.
  
- **Canaleta:**  
La canaleta permite retener el agua proyectada por el tornillo durante su rotación. Cabe señalar que, en algunas centrales, el canal es un cilindro completamente cerrado, ya que permite reducir la contaminación acústica.
  
- **By-Pass:**  
Permite desviar parcial o totalmente el caudal que normalmente ingresa a la turbina. El porcentaje de caudal desviado será regulado por la esclusa de control.

En la Figura 5.13 se puede observar una propuesta de diseño de una micro central hidroeléctrica utilizando una turbina tipo tornillo de Arquímedes.

**Figura 5.13**

*Componentes de una microcentral con tornillo de Arquímedes.*



**Nota:** En la Figura se observan los componentes de una minicentral hidroeléctrica con turbina tipo tornillo de Arquímedes, tomado de (Landustrie, 2023).

## 5.2. Microcentral con turbina de tornillo de Arquímedes

La aplicación del tornillo de Arquímedes en el ámbito hidroeléctrico se presenta como una alternativa muy beneficiosa para aprovechar los recursos hídricos a una escala menor, en centrales pico y mini hidroeléctricas, y en recursos hídricos como pequeños ríos o canales de regadío con saltos de agua menores.

### 5.2.1. Principio de funcionamiento de Arquímedes

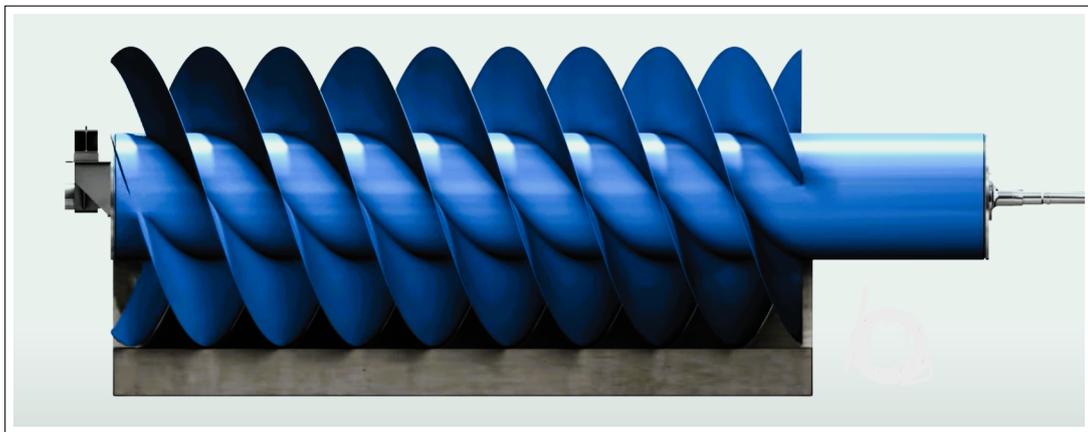
El principio de Arquímedes nos dice que “Todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un fluido en reposo recibe un empuje vertical hacia arriba igualando el peso del fluido que desaloja”. Cabe señalar que la fuerza de empuje no depende del peso del objeto sumergido en el agua, sino solo del peso del líquido desplazado, es decir, si tenemos diferentes materiales de igual volumen, todos están sujetos a la misma repulsión o fuerza de empuje. A cualquier profundidad, el objeto no puede desplazar un volumen mayor a su propio volumen (Vite, 2014).

Este sistema de generación de energía mecánica mediante el tornillo de Arquímedes es posible gracias al propio peso del agua. El agua se desplaza llenando las cavidades del tornillo y usándolo como cubetas que se mueven hacia abajo debido al peso y la superficie helicoidal de la hélice realiza el giro del tornillo. Una vez transformada la energía hidráulica en energía mecánica, obtenemos energía eléctrica acoplando un generador al eje del tornillo directamente o indirectamente (Santa Cruz Herrera, 2018).

En la Figura 5.14 se puede apreciar más de cerca como se compone una turbina con este criterio. Se observa el espacio que existe entre hélices permitiendo el paso de fauna íctica.

### Figura 5.14

*Esquema de una turbina de tornillo de Arquímedes.*



**Nota:** En la Figura se observa que el tornillo contiene tres hilos el cual es un diseño bastante eficiente para la generación de energía, tomado de (Landustrie, 2023).

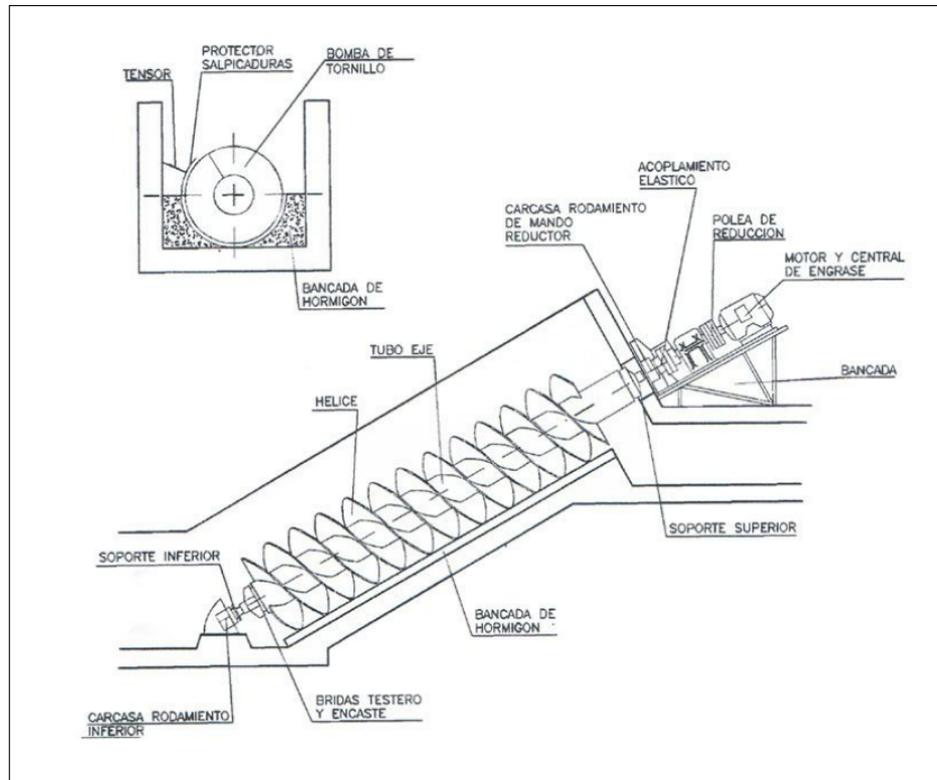
### 5.2.2. Turbina tipo tornillo de Arquímedes

La turbina de Arquímedes es una máquina gravimétrica con una superficie de hélices helicoidales dentro de un cilindro que contiene un eje inclinado de tal modo que el extremo inferior se encuentre sumergido dentro del agua. Esto forma una serie de celdas en donde el agua se adentra y asciende o desciende dependiendo de la configuración y aplicación a la cual el tornillo está colocado (Santa Cruz Herrera, 2018).

Esta turbina es eco amigable con los peces debido a su baja velocidad de rotación, la ausencia de cambios bruscos de presión y la inexistencia de esfuerzos cortantes importantes. En la Figura 5.22 se observa el esquema de una turbina de Arquímedes junto a su canaleta y acoplamiento del sistema de generación eléctrica. También se observa una canaleta de contención rectangular que en el caso de este proyecto no es muy conveniente por el exceso de fugas de caudal.

**Figura 5.15**

*Esquema de instalación de una turbina tipo tornillo de Arquímedes.*



**Nota:** Se aprecia los componentes principales para la instalación de una turbina con tornillo de Arquímedes, tomado de (Landustrie, 2023).

Para la construcción de la mayor parte de la turbina se utilizará el material Acero Inoxidable AISI 316, ya que posee propiedades convenientes para proyectos que estarán en exposición con el agua. Este material tiene una estructura inoxidable austenítica de cromo-níquel que contiene entre dos y 3% de molibdeno. El contenido de molibdeno aumenta la resistencia a la corrosión, mejora la resistencia a las picaduras en soluciones de iones de cloruro y aumenta la resistencia a altas temperaturas (Jnablog., 2019). En la Figura 5.16 se puede observar las propiedades del material.

## Figura 5.16

### Propiedades del acero inoxidable AISI 316.

Propiedades físicas de los aceros tipo 316 y 316L son:

- Densidad: 0.799g / centímetro cúbico
- Resistencia eléctrica: 74 microhm-centímetros (20 grados Celsius)
- Calor específico: 0.50 kiloJoules / kilogramo-Kelvin (0–100 grados Celsius)
- Conductividad térmica: 16,2 vatios / metro-Kelvin (100 grados Celsius)
- Módulo de elasticidad (MPa):  $193 \times 10^3$  en tensión
- Rango de fusión: 2,500–2,550 grados Fahrenheit (1,371–1,399 grados Celsius)

En cuanto a los porcentajes de los elementos utilizados para crear estas aleaciones, están:

Elemento	Tipo 316 (%)	Tipo 316L (%)
Carbón	0.08 máx.	0.03 máx.
Manganeso	2,00 máx.	2,00 máx.
Fósforo	0.045 máx.	0.045 máx.
Azufre	0.03 máx.	0.03 máx.
Silicio	0,75 máx.	0,75 máx.
Cromo	16.00-18.00	16.00-18.00
Níquel	10.00-14.00	10.00-14.00
Molibdeno	2.00-3.00	2.00-3.00
Nitrógeno	0,10 máx.	0,10 máx.

**Nota:** En la Figura se pueden comparar las propiedades físicas del Acero Inoxidable AISI 316 y 316L para la selección del material mas adecuado, adaptado de (Jnablog., 2019).

#### 5.2.2.1. Consideraciones para el cálculo del caudal de diseño

Se debe tener en cuenta que el caudal de diseño no es el mismo que el caudal de flujo del río. Se restringe el uso del 20% del caudal medio del río para no afectar al flujo normal del mismo. Para el análisis de cuanto es el caudal medio se debe realizar una curva de caudales, esto siendo posible gracias a cálculos de caudal en intervalos de tiempo largos. Estos cálculos son necesarios realizar cuando existe estiaje y crecida del cuerpo de agua para hallar los caudales máximos y mínimos en cuanto al intervalo de tiempo.

$Q_M$  Caudal máximo [ $m^3/s$ ]

$Q_m$  Caudal mínimo [ $m^3/s$ ]

$Q$  Caudal medio [ $m^3/s$ ]

$Q_e$  Caudal ecológico necesario dejar en el río por su cauce normal [ $m^3/s$ ]

### 5.2.2.2. Consideraciones para el dimensionado de la turbina tipo tornillo de Arquímedes

Considerando algunos modelos de cálculo planteados por varios autores sobre diferentes aspectos de una turbina de Arquímedes, se puede establecer una estructura para el dimensionamiento de esta, para lo cual se tomarán las siguientes consideraciones.

- Tomando como referencia los trabajos realizados por Lyons (2014) y Dragomirescu (2021) se establece que el ángulo de inclinación de la turbina  $\beta$  es recomendada que sea de entre  $22^\circ$  y  $30^\circ$ . No se recomienda usar ángulos mayores a  $30^\circ$  ya que la capacidad del tornillo decrece notablemente.
- La longitud del tornillo se determina con la ecuación siguiente:

$$L_T = \frac{H}{\text{sen}(\beta)} \quad (1)$$

donde:

$L_T$	Longitud del tornillo [m]
$\beta$	Ángulo de inclinación del tornillo [°]
$H$	Salto de agua [m]

- Para la selección del número de hélices se debe tener como prioridad maximizar la potencia que estas transmitan al eje, pero además generar la carga mínima posible al eje central y a los cojinetes. Se debe tener en cuenta que el número de hélices es relativo a los costos de transporte, fabricación e instalación de la turbina. Al existir mayor número de hélices, se considera también el incremento del número de celdas que permite un crecimiento en las pérdidas por fricción.

Lyons en un trabajo experimental observó que aumentar el número de hélices por encima de 3 implica un decremento marginal en la eficiencia poco significativa, por lo que se considera que el número de hélices adecuado para el diseño es  $N = 3$ .

- Se puede empezar estimando el diámetro externo usando la siguiente ecuación:

$$D_e = \psi^{-3/7} \cdot Q^{3/7} \quad (2)$$

donde:

$D_e$	Diámetro externo [m]
$\psi$	Constante de Lubitz que toma el valor de 0.32918
$Q$	Caudal [ $m^3/s$ ]

- Siguiendo la tendencia de la mayoría de fabricantes de turbinas de Arquímedes, la correlación de radios  $\rho_R$  se establece en 0.5, por lo tanto:

$$\frac{D_i}{D_e} = \rho_R \quad (3)$$

donde:

$D_i$	Diámetro interno [m]
$D_e$	Diámetro externo [m]
$\rho_R$	Correlación de radios con un valor de 0.5

y

$$\frac{S}{D_e} = 1 \quad (4)$$

donde:

$S$	Paso del tornillo [m]
$D_e$	Diámetro externo [m]

En la Tabla 5.3 se puede observar el valor de la correlación de radio, de paso y de volumen por vuelta. Para el cálculo se opta por usar 0.5 como valor promedio de la correlación óptima de radio.

**Tabla 5.3**

*Correlación de radios en función de número de hélices de la turbina tipo tornillo de Arquímedes.*

Número de hélices	Correlación óptima de radio	Correlación óptima de paso	Correlación óptima de volumen por vuelta
$N$	$\rho_R$	$\lambda_S$	$\lambda_V$
1	0.5358	0.1285	0.0361
2	0.5369	0.1863	0.0512
3	0.5357	0.2217	0.0598
4	0.5353	0.2456	0.0655
5	0.5352	0.2630	0.0696

**Nota:** Comparación de las correlaciones óptimas con relación al número de hélices de la turbina de Arquímedes, tomado de (Benavides y Gordillo, 2022).

- Para la estimación del volumen de agua que se encuentra entre dos hélices consecutivas, la canaleta de contención y el eje central del tornillo de Arquímedes, se empleara la siguiente ecuación que fue propuesta por Dellinger. Se

puede entonces expresar la superficie mojada  $A_h(k)$  que se encuentra limitada por la superficie libre asimilada a un plano y por las helicoidales internas y externas. Considerando  $l = 1$  para una potencia óptima del tornillo:

$$V_C = \frac{(Q - Q_f) \cdot 60}{l \cdot n \cdot N} \quad (5)$$

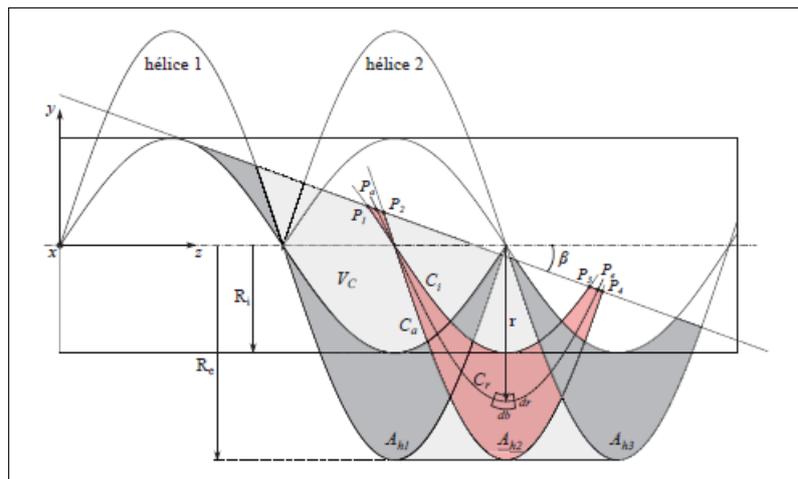
donde:

$V_C$  Volumen de agua entre dos hélices consecutivas [ $m^3$ ]

Como se puede observar en la Figura 5.17, el cálculo del volumen de agua dentro de una celda está delimitado por varios parámetros que son necesarios considerar.

**Figura 5.17**

*Representación de superficies y puntos del rodete de la turbina de Arquímedes.*



**Nota:** En la Figura se puede apreciar los parámetros y variables necesarios para el cálculo del volumen de una celda de agua, tomado de (Benavides y Gordillo, 2022).

- Se considera para el estudio un nivel de llenado  $l = 1$ , por lo tanto,  $Q_s = 0$ ; también el uso de una canaleta de contención, por lo que  $Q_c = 0$ .
- No se pueden despreciar las pérdidas de caudal entre las hélices y la canaleta de contención  $Q_f$  misma que se calculará con la siguiente ecuación según Nagel:

$$Q_f = 2.5 \cdot A_b \cdot D_e^{1.5} \quad (6)$$

donde:

$$A_b = 0.0045 \cdot \sqrt{D_e} \quad (7)$$

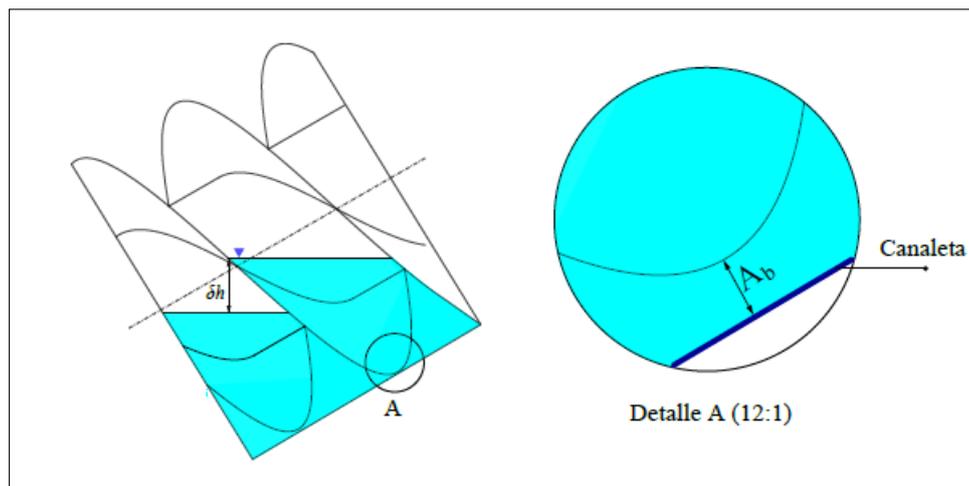
$$\delta h = \frac{S}{N} \cdot \sin \beta \quad (8)$$

- $A_b$       Corresponde a la anchura de la brecha entre las hélices y la canaleta [m]  
 $\delta h$       Diferencia de alturas entre celdas [xx]  
 $D_e$       Diámetro exterior de las hélices [m]

En la Figura 5.18 se observa a detalle la brecha entre las hélices y la canaleta como diferencia de altura entre el nivel de llenado de la hélice anterior y la posterior.

**Figura 5.18**

*Brecha de fuga entre las hélices y la canaleta de contención.*

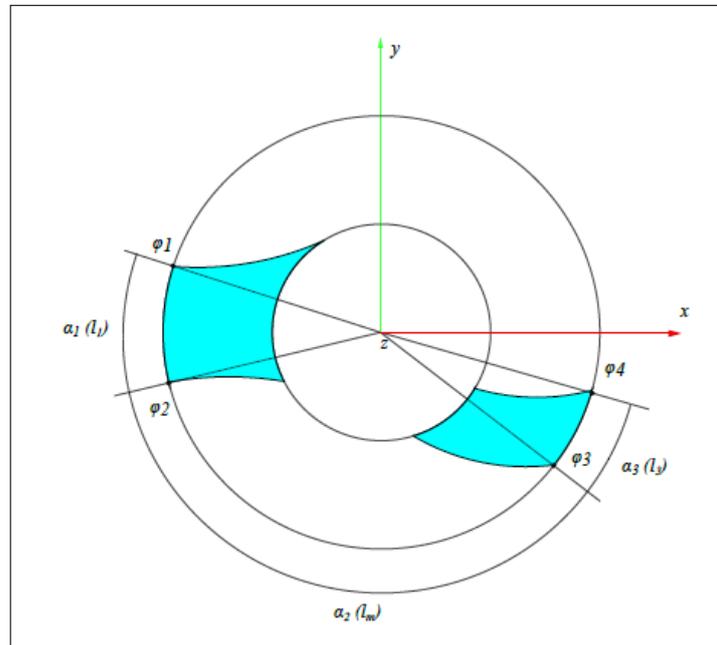


**Nota:** Vista a detalle de la brecha entre las hélices y la canaleta de contención, tomado de (Benavides y Gordillo, 2022).

En la Figura 5.19 se representa los ángulos y longitudes que conforman la brecha de fuga entre la canaleta y las hélices.

**Figura 5.19**

*Representación de ángulos y longitudes que conforman la brecha de fuga.*

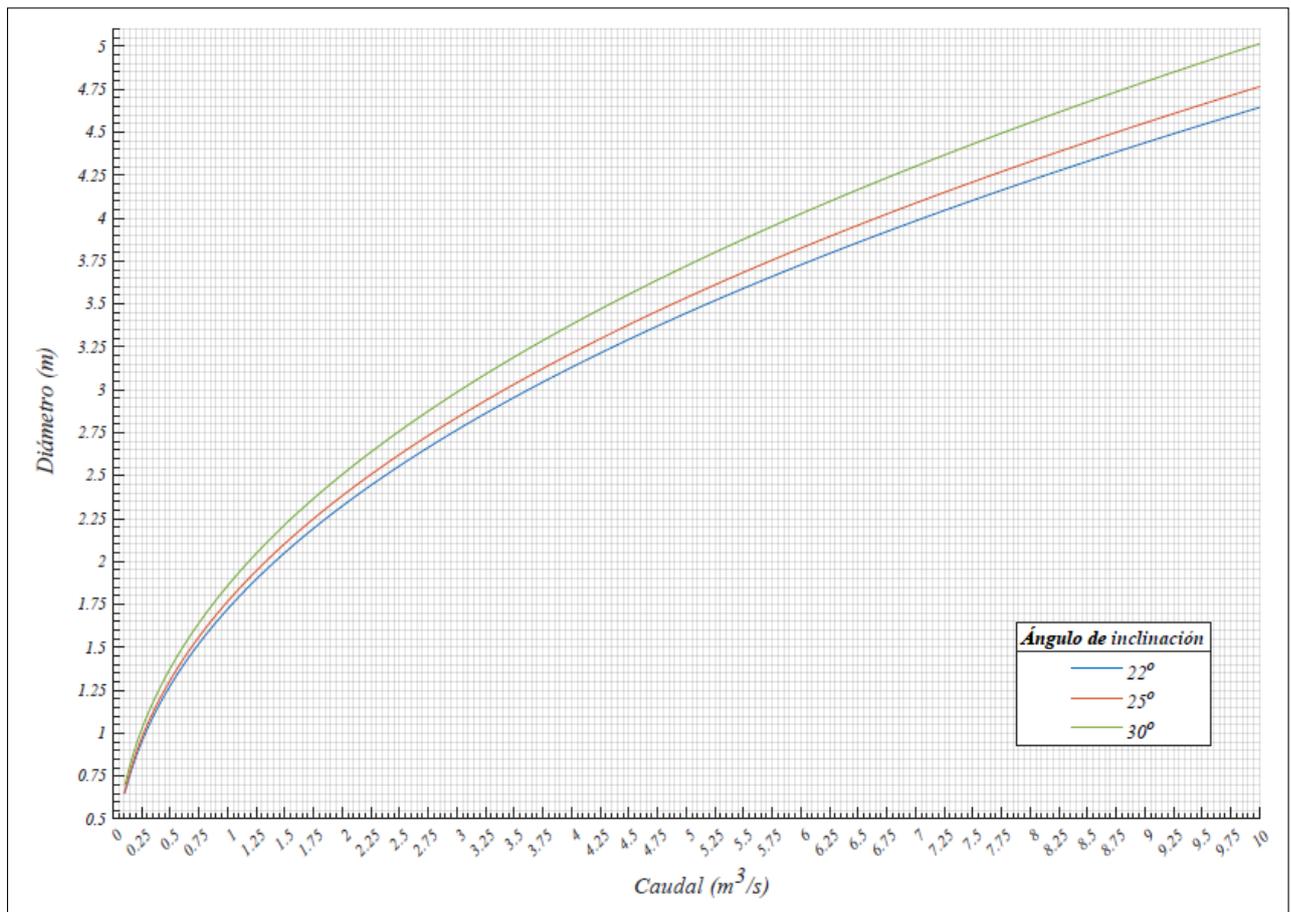


**Nota:** Representación de ángulos y longitudes que conforman la brecha de fuga, tomado de (Benavides y Gordillo, 2022).

En la Figura 5.20 se observan las curvas correspondientes al ángulo de diseño para determinar el diámetro exterior de la turbina en función del caudal del río y el ángulo de inclinación de la turbina.

**Figura 5.20**

*Curvas para selección del diámetro exterior de las hélices de la turbina de Arquímedes.*



**Nota:** En la Figura se aprecian las curvas correspondientes al diámetro exterior de las hélices según el ángulo de inclinación y el caudal de diseño, tomado de (Benavides y Gordillo, 2022).

- Para el cálculo del caudal nominal  $Q_n$  se aplicará la siguiente ecuación planteada por Weisbach:

$$Q_n = N \cdot V_C \cdot \frac{n}{60} \quad (9)$$

donde:

- $N$  Número de hélices  $[xx]$
- $V_C$  Volumen de agua entre 2 hélices, la canaleta y el eje central  $[m^3]$
- $n$  Velocidad de rotación del tornillo  $[min^{-1}]$

- La velocidad de rotación máxima de la turbina de Arquímedes será la que Muysken ha planteado en 1932, quien demostró que velocidades por encima de este valor incrementa las pérdidas por fricción y fuerzas centrífugas de manera excesiva. Por lo tanto, la velocidad de rotación máxima para

una turbina de Arquímedes, para evitar las pérdidas de fricción y fuerzas centrífugas, es:

$$n_{max} = \frac{50}{D_e^{2/3}} \quad (10)$$

Debido al criterio anterior en que el nivel de llenado es  $l = 1$ , la velocidad de rotación de la turbina se expresa como:

$$n = \frac{(Q - Q_f) \cdot 60}{l \cdot V_C \cdot N} \quad (11)$$

donde:

$Q$	Caudal total [ $m^3/s$ ]
$Q_f$	Caudal de fuga [ $m^3/s$ ]
$l$	Nivel de llenado [ $xx$ ]

- El nivel de agua al ingreso se desarrolla a partir del modelo de Nuernbergk y Rorres debido a sus resultados positivos en la predicción del nivel del agua. La entrada del tornillo depende de los parámetros hidráulicos del caudal y geometría del tornillo de Arquímedes.

$$h_{in} = h_2 + \frac{1}{2g} \cdot \left( \frac{Q}{h_2 \cdot b_2} \right)^2 \cdot \left[ 1 + \zeta - \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Donde  $\zeta$  es el factor de pérdidas hidráulicas y responde a la siguiente expresión:

$$\zeta = \left( \frac{\nu_t \cdot \pi \cdot R_e}{\kappa \cdot \cos \beta \cdot b_2} - 1 \right)^2 \quad (13)$$

$$\nu_c = \frac{V_C}{2 \cdot R_e^2 \cdot S}$$

$$\nu_t = \nu_c + \frac{Q_f}{\pi \cdot R_e^2 \cdot C_{ax}}$$

donde:

$\nu_c$	Volumen de agua en una mitad de la celda [ $m^3$ ]
$\nu_t$	Volumen de agua entre celda incluyendo el caudal de fuga [ $m^3$ ]
$c_{ax}$	Velocidad del agua en el canal [ $m/s$ ]

Siendo  $\kappa$  una medida adimensional de altura:

$$\kappa = \frac{h_3}{R_i} \quad (14)$$

- La expresión de Nuernbergk facilita encontrar el nivel de agua óptimo a la salida del tornillo, la cual permite encontrar el valor de inmersión. Para ellos se establece la siguiente ecuación:

$$h_{sal} = \left( \frac{D_e + D_i}{2} \right) \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{S \cdot \tan(\beta)}{\pi \cdot D_i} \right)^2} \cdot \cos(\beta) - \frac{S}{N} \cdot \sin(\beta) + h_{inf} \quad (15)$$

- La inmersión  $I$  de un tornillo se define por:

$$I = \frac{h_{sal} - h_1}{2 \cdot R_i \cdot \cos(\beta)} \quad (16)$$

donde

$h_1$       Altura indicada en la Figura 5.21 [m]

- Para determinar la fuga entre el canal y las hélices, utilizamos la ecuación que Muysken propuso en el año 1932:

$$Q_f = \mu_a \cdot A_b \cdot R_e \cdot \left( 1 + \frac{A_b}{2 \cdot R_e} \right) \cdot \sqrt{1 + \frac{S}{2 \cdot \pi \cdot R_e}} \cdot \left( \frac{2}{3} \alpha_1 + \alpha_2 + \frac{2}{3} \alpha_3 \right) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot dh} \quad (17)$$

donde:

$A_b$	Espacio entre las hélices y el canal [m]
$\mu_a$	Coefficiente de contracción de la descarga [xx]
$dh$	Diferencia de altura del volumen entre hélices superior e inferior [m]
$\frac{dh}{N}$	$\frac{\sin(\beta)}{N}$ [m]
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Ángulos húmedos alrededor de la brecha. Se muestran en la Fig 5.19 [°]

La constante  $\mu_a$  depende de la forma del borde de la hélice y está típicamente en el rango de entre 0.65 y 1 para la fuga mínima y máxima, respectivamente. Nagel proporcionó una relación empírica para estimar  $A_b$  basada en el tamaño del tornillo:

$$A_b = 0.0045 \sqrt{D_e} \quad (18)$$

Por lo que la pérdida de potencia debido a la fuga entre el canal y las hélices es igual a:

$$P_f = \rho \cdot g \cdot Q_f \cdot H \quad (19)$$

- La fuerza de fricción en el canal se debe al movimiento del agua a través del sistema. Está dado por:

$$F_c = \tau_c \cdot A_c \cdot \frac{L \cdot N}{S} \quad (20)$$

donde:

- $\tau_c$  Esfuerzo cortante [Pa]
- $A_c$  Superficie mojada del canal entre dos hélices sucesivas [m<sup>2</sup>]

Suponiendo que el flujo en el canal es un flujo de superficie libre dentro de un canal circular, el esfuerzo cortante del canal puede ser modelado por la ley de Darcy - Weisbach:

$$\tau_c = \frac{\lambda_c}{8} \cdot \rho \cdot c_{ax}^2 \quad (21)$$

$$c_{ax} = \frac{S \cdot n}{60} \quad (22)$$

$$A_c = \frac{V_C \cdot N}{S} \quad (23)$$

donde:

- $\lambda_c$  Coeficiente de fricción del agua [xx]
- $c_{ax}$  Velocidad del agua en el canal [m/s]

El trabajo realizado por la fuerza de fricción de  $F_c$  a lo largo del canal está dado por:

$$W_c = F_c \cdot L \quad (24)$$

donde:

- $L$  Longitud del tornillo [m]
- $F_c$  Fuerza de fricción a lo largo del canal [N]

Esta fuerza también se puede expresar como una función de la caída de presión debido a la fricción viscosa  $h_f$ :

$$W_c = \rho \cdot g \cdot V_C \cdot \frac{L \cdot N}{S} \cdot h_f \quad (25)$$

La pérdida de energía  $h_f$  se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$h_f = \frac{L_B \cdot c_{ax}^2}{k^2} \cdot \left( \frac{A_c}{V_B} \right)^{4/3} \quad (26)$$

El coeficiente de Strickler  $k$  depende de la superficie del canal. En el caso de las micro centrales de tornillo de Arquímedes, el canal es generalmente de hormigon muy liso o de acero. El coeficiente elegido es entonces  $k = 100$ . Finalmente, la pérdida de potencia debido a la fricción en el canal es igual a:

$$P_{al} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h_f \quad (27)$$

- La fricción del fluido en el núcleo del tornillo genera una fuerza de fricción debido a la viscosidad del fluido y luego crea un torque resistente. Esta fuerza está determinada por:

$$F_n = \tau_n \cdot A_n \quad (28)$$

$$A_n = \frac{2\pi \cdot L_T \cdot R_i}{60} \quad (29)$$

donde:

$A_n$	Área húmeda del núcleo del tornillo [ $m^2$ ]
$\tau_n$	Esfuerzo cortante del fluido sobre el núcleo del tornillo [ $Pa$ ]

Para un flujo de superficie libre sobre una superficie lisa, la fricción se describe con la ley de Darcy - Weisbach y un coeficiente de fricción constante. Por lo tanto el núcleo del esfuerzo cortante está definido por:

$$\tau_n = \frac{\lambda_t}{8} \cdot \rho \cdot c f_n^2 \quad (30)$$

donde:

$\lambda_t$	Coeficiente de fricción del agua [ $xx$ ]
$c f_n$	Velocidad del fluido en relación con el núcleo [ $m/s$ ]
$c f_n$	$2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot \frac{n}{60}$ [ $m/s$ ]

El par de frenado generado por la fricción del agua sobre el núcleo de un tornillo es igual a:

$$T_{f,n} = F_n \cdot R_i \quad (31)$$

La pérdida de potencia debido a la fricción del agua en el núcleo del tornillo se expresa como:

$$P_{f,n} = T_{f,n} \cdot \frac{2\pi \cdot n_{max}}{60} \quad (32)$$

- El flujo del fluido en las superficies mojadas superior e inferior de las palas genera una fuerza de fricción debido a la viscosidad del fluido y luego crea un par de frenado. La fuerza de fricción elemental es igual a:

$$dF_{h(r)} = \tau_h(r) \cdot dA \quad (33)$$

$$dA = r \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{S}{2 \cdot \pi \cdot r}\right)^2} d\varphi \cdot dr \quad (34)$$

Donde  $\tau_h(r)$  es el esfuerzo cortante del fluido sobre las hélices y  $dA$  es la superficie elemental. La ley de Darcy - Weisbach se usa nuevamente para describir la fricción. Entonces, el esfuerzo cortante de la hélice está dado por:

$$\tau_h(r) = \frac{\lambda_t}{8} \cdot \rho \cdot c_{f/h}(r)^2 \quad (35)$$

donde:

$\lambda_t$	Coeficiente de fricción del agua en el tornillo [xx]
$c_{f/h}(r)$	Velocidad del fluido con respecto a una hélice [m/s]
$c_{f/h}(r)$	$r \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{n}{60}$ [m/s]

El par de frenado proyectado sobre el eje del tornillo es igual a:

$$dC_h(r) = dF_h(r) \cdot r \cdot \cos(\alpha_r) \quad (36)$$

siendo:

$\alpha_r$	Inclinación de la hélice con respecto al eje del tornillo [°]
------------	---

Los ángulos para  $r = R_e$  y  $r = R_i$  están representados en la Figura 5.21:

El valor del ángulo  $\alpha_r$  es:

$$\alpha_r = \arctan\left(\frac{S}{2 \cdot \pi \cdot r}\right) \quad (37)$$

La hélice de un tornillo de Arquímedes se somete a la presión de un volumen de agua superior e inferior. Así, la parte inferior de la superficie mojada de una hélice está sujeta a la presión procedente de los dos volúmenes de agua mientras que la parte superior solo está sujeta a la presión de la hélice superior.

El par  $dC_h$  viene dado por:

$$dC_h(M) = dF_h(r_M) \cdot r_M \cdot \cos(\alpha_r) = \frac{\lambda_t}{8} \cdot \rho \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}\right)^2 \cdot r^2 \cdot \cos(\alpha_r) \cdot dA \quad (38)$$

El par de frenado total es entonces igual a:

$$T_h = \frac{\lambda_t}{8} \cdot \rho \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^2 \cdot \left[ \int_{R_i}^{R_e} \int_{\varphi_a}^{\varphi_b} r^3 \cdot \cos(\alpha_r) dA + \int_{R_i}^{R_e} \int_{\varphi_c}^{\varphi_d} r^3 \cdot \cos(\alpha_r) dA \right] \quad (39)$$

El par debido a la fricción viscosa del agua en todas las hélices estaría expresada por:

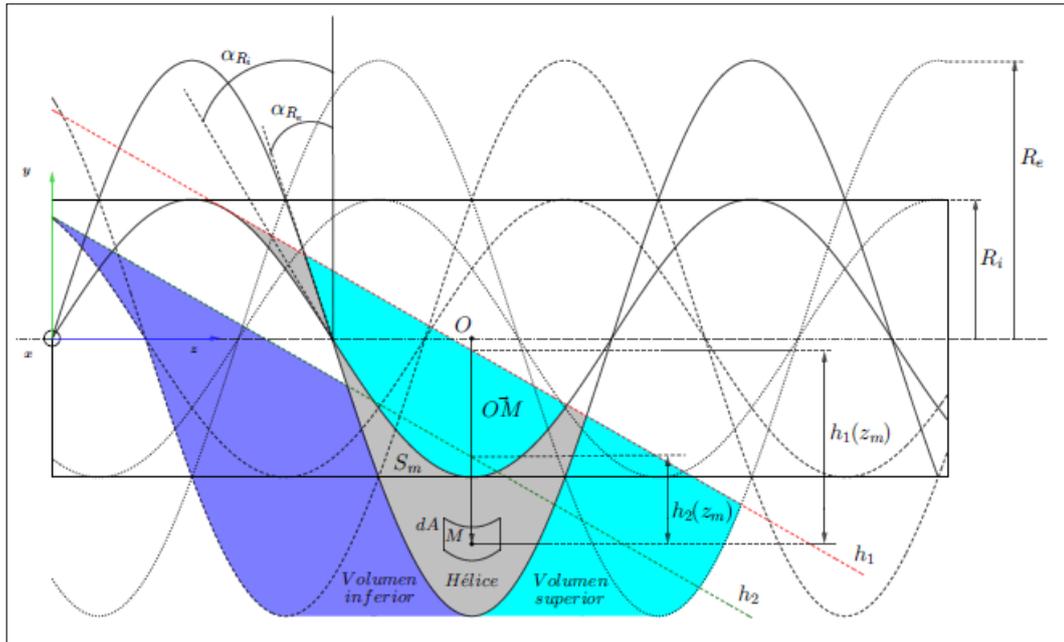
$$T_{f,p} = \frac{L \cdot N}{S} \cdot T_h \quad (40)$$

$$P_{f,p} = T_{f,p} \cdot \frac{2\pi \cdot n_{max}}{60} \quad (41)$$

En la Figura 5.21 se representa gráficamente los parámetros necesarios para calcular el par del tornillo.

**Figura 5.21**

*Representación de parámetros necesarios para calcular el par.*



**Nota:** Representación de un tornillo de Arquímedes con los diferentes parámetros para calcular el par, tomado de (Benavides y Gordillo, 2022).

- Para determinar el par teórico suministrado por el tornillo  $T_{total}$  se emplea el modelo que Dellinger ha desarrollado. Los pares de frenado debidos a la fricción viscosa se restan del par teórico  $T$ . El par  $T_{total}$  es igual a:

$$T = \int_{R_i}^{R_e} \int_{\varphi_a}^{\varphi_b} r \cdot \sin(\alpha_r) \cdot [y_M - h_1(z_m)] \cdot dA - \int_{R_i}^{R_e} \int_{\varphi_c}^{\varphi_d} r \cdot \sin(\alpha_r) \cdot [y_M - h_2(z_m)] \cdot dA \quad (42)$$

$$T_{total} = T - T_{f,p} - T_{f,n} \quad (43)$$

donde:

$T_{f,p}$	Torque perdido por la fricción viscosa entre las hélices y el agua [ $N \cdot m$ ]
$T_{f,n}$	Torque perdido por la fricción viscosa entre el núcleo y el agua [ $N \cdot m$ ]
$T$	Par teórico [ $N \cdot m$ ]

Así mismo, la potencia total  $P_t$  se definirá como:

$$P_t = T_{total} \cdot n_{max} \quad (44)$$

donde:

$n_{max}$	Velocidad de rotación máxima [ $rpm$ ]
-----------	--

- La potencia mecánica entregada por el tornillo puede entonces expresarse como:

$$P_{mec} = T_{total} \cdot \frac{2\pi \cdot n_{max}}{60} \quad (45)$$

Mientras que la potencia hidráulica disponible se define como:

$$P_{hid} = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \quad (46)$$

- Se utilizan aquí los métodos de cálculo de las diferentes pérdidas de carga propuestas por Nuernbergk. Para determinar la evolución de la eficiencia hidráulica de un tornillo para un caudal fijo en función de la velocidad de rotación, y viceversa.
- Para hallar el rendimiento hidráulico de un tornillo de Arquímedes, se aplicará la siguiente ecuación empleada por Nuernbergk:

$$\eta_h = 1 - \frac{P_{al} + P_{f,p} + P_f + P_{f,n} + P_s}{\rho \cdot g \cdot QH} \quad (47)$$

donde:

$P_{al}$	Potencia perdida por rozamiento viscoso de canaleta y agua [W]
$P_{f,p}$	Potencia perdida por fricción viscosa entre las hélices y el agua [W]
$P_f$	Potencia perdida por el flujo de fuga entre canal y hélices [W]
$P_{f,n}$	Potencia perdida por fricción viscosa entre el núcleo y el agua [W]
$P_s$	Potencia perdida por el flujo de fuga de sobrellenado [W]

- Para hallar el rendimiento global  $\eta$ , Dellinger propone la siguiente expresión:

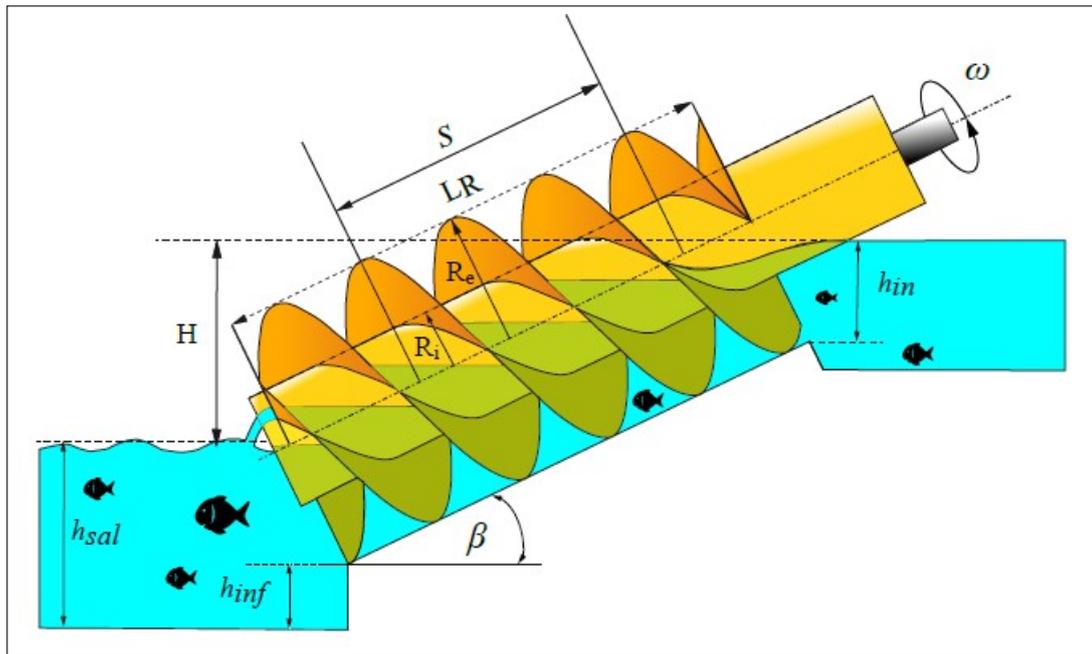
$$\eta = \frac{T_{total} \cdot \omega}{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H} \quad (48)$$

(Benavides y Gordillo, 2022, Pág. 63)

En la Figura 5.22 se aprecia como quedaría el diseño final de la turbina de Arquímedes con los parámetros iniciales como lo son el salto, el paso, la altura de inmersión, el radio, el ángulo de inclinación y la longitud total.

**Figura 5.22**

*Esquema de turbina de tornillo de Arquímedes.*



**Nota:** Vista de corte de una turbina con tornillo de Arquímedes representando sus dimensiones, tomado de (Benavides y Gordillo, 2022).

### 5.2.3. Sistema de alimentación de agua a la turbina

Para conseguir alimentar la turbina con agua, se necesita captar primero el fluido en una estructura hidráulica denominado represa o dique captador. Esto permite derivar una parte del

caudal del río a un canal. Es utilizada con fines específicos como utilizar el agua en irrigación, generación de energía eléctrica, o en el abastecimiento de agua potable (Zevallos Anchahua, 2011).

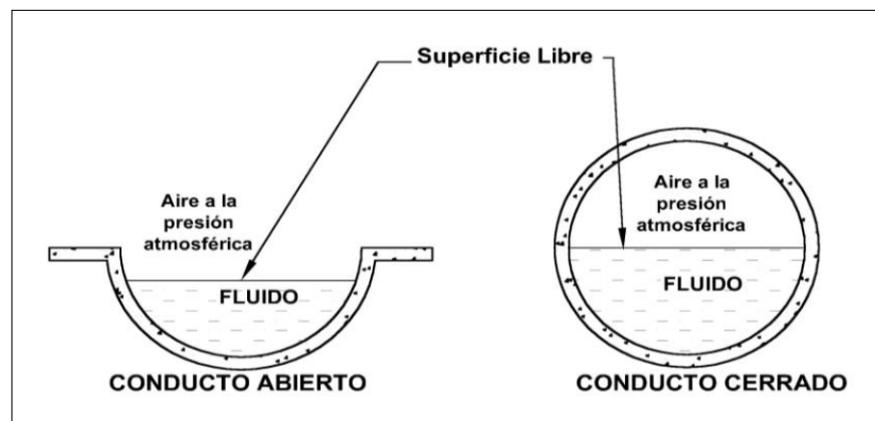
Los canales son conductos abiertos o cerrados en los cuales el agua circula debido a la acción de la gravedad y sin ninguna presión, pues la superficie libre del líquido está en contacto con la atmósfera, estableciendo que el agua fluye impulsada por la presión atmosférica y de su propio peso (Ruíz, 2008).

Para este proyecto es necesario un revestimiento de hormigón debido a que las superficies estarán en contacto con el agua. Al proteger las canales mediante revestimientos, reducimos las perdidas por filtración exigiendo mayor eficiencia, admite mayores velocidades, evita el peligro de deslizamientos de cajeros o fugas con arrastre de tierras y facilita las operaciones de conservación y limpieza (Blázquez, 2007).

En la Figura 5.23 se visualiza los dos tipos de conductos posibles para la alimentación de la turbina.

**Figura 5.23**

*Esquemas de conductos hidráulicos para la conducción de agua.*



**Nota:** Vista de corte de canales abiertos y cerrados, tomado de (Ruíz, 2008).

El canal a considerar en un proyecto hidroeléctrico es un canal artificial que usualmente se diseñan con formas geométricas regulares (prismáticos). Un canal construido con una sección transversal invariable y una pendiente de fondo constante.

El término sección de canal se refiere a la sección transversal tomando en forma perpendicular a la dirección del flujo. Las secciones transversales más comunes son las siguientes:

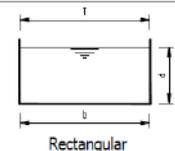
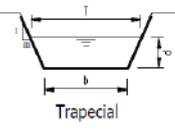
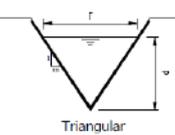
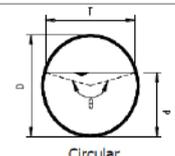
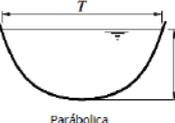
- Sección trapezoidal.

- Sección rectangular.
- Sección triangular.
- Sección parabólica.
- Sección circular.
- Sección parabólica.

Existen varios tipos de canales dependiendo de su sección y aplicabilidad. En la Figura 5.4 se observan los elementos geométricos de las distintas secciones transversales.

**Tabla 5.4**

*Elementos geométricos de las secciones transversales de los canales hidráulicos.*

SECCIÓN	ÁREA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	ANCHO SUPERFICIAL	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA
 <p>Rectangular</p>	$b \cdot d$	$b + 2d$	$\frac{bd}{b + 2d}$	T	d
 <p>Trapezoidal</p>	$b \cdot d + md^2$	$b + 2d \sqrt{1 + m^2}$ O también : $b + 2d \sqrt{1 + \cot g \theta^2}$	$\frac{bd + md^2}{b + 2d \sqrt{1 + m^2}}$	$b + 2md$	$\frac{bd + md^2}{b + 2md}$
 <p>Triangular</p>	$md^2$	$2d \sqrt{1 + m^2}$ O también	$\frac{md}{2\sqrt{1 + m^2}}$	$2md$	$\frac{d}{2}$
		$2d \sqrt{1 + \cot g \theta^2}$			
 <p>Circular</p>	$\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$	$\frac{D\theta}{2}$	$\left(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}\right) \frac{D}{4}$	$\left(\frac{\text{sen}\theta}{2}\right)D$ $2\sqrt{d(D-d)}$	$\frac{1}{8} \left(\frac{\theta - \text{sen}\theta}{\text{sen} \frac{1}{2}\theta}\right) D$
 <p>Parabólica</p>	$\frac{2}{3}Td$	$T + \frac{8}{3} \frac{d^2}{T}$	$\frac{2T^2d}{3T^2 + 8d^2}$	$\frac{3}{2} \frac{A}{d}$	$\frac{2}{3}d$

**Nota:** Parámetros geométricos para los distintos tipos de secciones transversales de los canales, adaptado de (Ruíz, 2008).

### 5.2.3.1. Consideraciones para el dimensionado del canal de conducción a la turbina

Para el diseño de un canal de conducción para la microcentral, primero debemos tener en cuenta que sección transversal vamos a considerar. Para esta microcentral lo mas conveniente es utilizar una sección rectangular por costos y criterios. Para proyectos de generación lo recomendado es que sea un canal abierto.

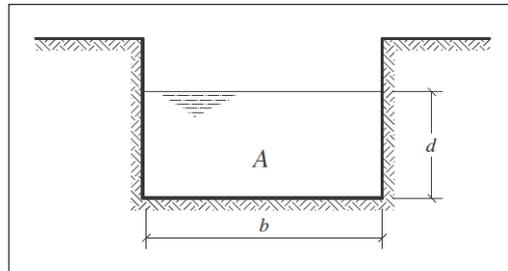
El ingeniero irlandés Robert Manning ha presentado una ecuación para determinar el valor del coeficiente de resistencia  $C$ , en función del radio hidráulico y la rugosidad del material de que se construya el canal (Ruíz, 2008).

- Sección Rectangular.

Las dimensiones necesarias para el diseño del canal de conducción se pueden observar en la Figura 5.24.

**Figura 5.24**

*Sección rectangular del canal hidráulico.*



**Nota:** Se puede observar las dimensiones de la sección rectangular, tomado de (Ruíz, 2008).

Las relaciones geométricas para una sección rectangular son las siguientes:

$$A = b \cdot d \quad (49)$$

$$P = b + 2d \quad (50)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (51)$$

donde:

$A$	Área hidráulica del canal, en $[m^2]$
$b$	Ancho de plantilla del canal $[m]$
$d$	Tirante del agua en el canal $[m]$
$P$	Perímetro mojado $[m]$
$R$	Radio hidráulico $[m]$

- Coeficiente de resistencia  $C$ .

El ingeniero irlandés Robert Manning presenta una ecuación para determinar el valor de  $C$ , en función del radio hidráulico la rugosidad del material de que se construya el canal. La ecuación en el sistema métrico se expresa como:

$$C = \frac{1.486R^{1/6}}{n} \quad (52)$$

- Velocidad en Canales Abiertos y Cerrados.

Al reemplazar la Ecuación 51 para determinar el valor de  $C$  en la ecuación de Chezy para calcular la velocidad, se obtiene:

$$V = C\sqrt{SR} = \text{Ecuación de Chezy}$$

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (53)$$

donde:

$V$	Velocidad media del agua en canales con régimen uniforme $[m/s]$
$n$	Coefficiente de rugosidad de Manning $[xx]$
$R$	Radio hidráulico $[m]$
$S$	Pendiente hidráulica $[xx]$

- Coeficiente de Manning.

Se debe considerar el coeficiente de Manning que es una de las formas de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces naturales o artificiales. El  $n$  de Manning es muy variable, dependiendo de varios factores como la rugosidad del perímetro húmedo del cauce, vegetación, rugosidad, curso, sedimentos y socavación, obstrucciones, nivel y caudal del agua, cambios estacionales (Fernandez, León, y Martínez, 2018).

En la Tabla 5.5 se pueden observar los valores mínimos, normales y máximos de Manning. Para los proyectos hidroeléctricos es conveniente realizar los canales y tomas de agua de hormigón y con un acabado liso. Esto nos permite tener un coeficiente de Manning de 0.013.

**Tabla 5.5***Valores del coeficiente  $n$  de Manning.*

Material	Valores		
	Mínimo	Normal	Máximo
Arroyo de montaña con muchas piedras.	0.035	0.040	0.050
Tepetate (liso y uniforme).	0.025	0.035	0.040
Tierra en buenas condiciones.	0.017	0.020	0.025
Tierra libre de vegetación.	0.020	0.025	0.033
Mampostería seca.	0.025	0.030	0.033
Mampostería con cemento.	0.017	0.020	0.025
Concreto.	0.013	0.017	0.020
Asbesto cemento.	0.09	0.010	0.011
Polietileno y PVC.	0.007	0.008	0.009
Fierro fundido (Fo. Fo).	0.011	0.014	0.016
Acero.	0.013	0.015	0.017
Vidrio, cobre.	0.009	0.010	0.010

**Nota:** Se puede observar los diferentes valores que se le da a  $n$  dependiendo del material, tomado de (Ruíz, 2008).

- Gasto en el diseño de canales.

Se le considera gasto hidráulico a la cantidad o volumen de fluido que atraviesa un conducto o canal y el tiempo en que este tarda en fluir.

Para el cálculo del gasto en el diseño de una canal, se debe plantear la siguiente ecuación:

$$Q = A \cdot V \quad (54)$$

En la ecuación anterior se reemplaza la Ecuación 52 y obtenemos la ecuación del gasto hidráulico.

$$Q = A \cdot \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (55)$$

Y al ordenar los términos anteriores, la ecuación general para el diseño hidráulico de canales en el sistema métrico queda como:

$$\frac{Q \cdot n}{S^{1/2}} = A \cdot R^{2/3} \quad (56)$$

donde:

$Q$	Gasto hidráulico [ $m^3/s$ ]
$n$	Coefficiente de rugosidad de Manning [ $xx$ ]
$A$	Área Hidráulica del canal [ $m^2$ ]
$S$	Pendiente hidráulica [ $xx$ ]
$R$	Radio hidráulico [ $m$ ]

Podemos reemplazar la Ecuación 51 en la Ecuación 55 para obtener la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{(A)^{5/3} \cdot \sqrt{S}}{n \cdot (P)^{2/3}} \quad (57)$$

Asumiendo que:

$$\begin{aligned} A &= 2d^2 \\ P &= b + 2d \end{aligned}$$

Reemplazamos en la Ecuación 57 y obtenemos la siguiente ecuación que nos permitirá hallar las dimensiones del canal necesarias para cierto gasto y pendiente:

$$Q = \frac{(2d^2)^{5/3} \cdot \sqrt{S}}{n \cdot (4d)^{2/3}} \quad (58)$$

- Borde libre.

Se le denomina borde libre a la distancia vertical desde la superficie del agua hasta la parte superior del canal. Este factor es muy importante en el diseño de canales, ya que debe ser lo suficientemente grande para prevenir que ondas o fluctuaciones en la superficie del agua causen reboses por encima de los lados.

No existe una regla en específico para el cálculo del borde libre, sin embargo, en canales revestidos, el borde libre puede ser la quinta parte del tirante.

$$B_L = \frac{d}{5} \quad (59)$$

(Ruíz, 2008, Pág. 44)

Existen otros criterios para designar el valor del borde libre. Con la Tabla 5.6 se puede designar el valor en relación con el caudal:

**Tabla 5.6**

*Borde libre en relación con el caudal.*

Caudal	Borde Libre
Menores que 0.50	0.3
Mayores que 0.50	0.4

**Nota:** La Tabla presenta al caudal en metros cúbicos y al borde libre en metros, adaptado de (Sierra y cols., 2011).

Con ayuda de la Tabla 5.7 se puede designar el valor en relación con la base del canal:

**Tabla 5.7**

*Borde libre en relación con la base del canal.*

Ancho de solera	Borde Libre
Hasta 0.80	0.4
De 0.80 a 1.50	0.5
De 1.50 a 3.00	0.6
de 3.00 a 20.00	1

**Nota:** La Tabla presenta al ancho de solera y al borde libre en metros, adaptado de (Sierra y cols., 2011).

### **5.2.3.2. Consideraciones para el dimensionado del desarenador**

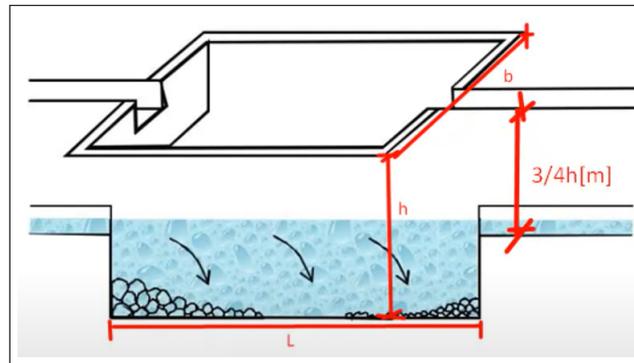
- Desarenador.

El desarenador es una obra hidráulica que tiene como función la separación y remoción del material sólido que lleva el agua de un canal. Estos materiales son perjudiciales para la vida útil de la turbina a instalarse.

La arena arrastrada por el fluido hacia las turbinas desgasta las mismas cuanto mayor es la velocidad, significando una disminución del rendimiento y exigiendo mantenimientos frecuentes y costosas. En las Figuras 5.25 y 5.26 se puede observar las dimensiones del desarenador.

**Figura 5.25**

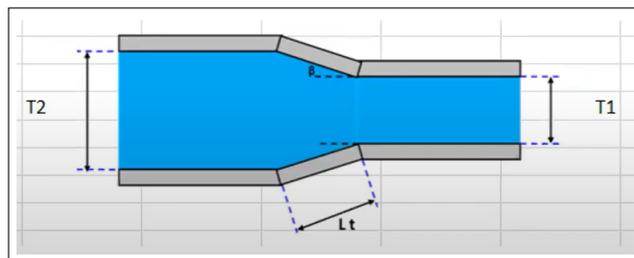
*Dimensiones del desarenador para el canal de conducción.*



**Nota:** Se observan las dimensiones a determinar del desarenador. Las unidades de medida son en milímetros, tomado de (Vergara y Collao, 2020).

**Figura 5.26**

*Vista superior del desarenador.*



**Nota:** Se observa las dimensiones de los anchos del desarenador y el canal de conducción a la salida, tomado de (Vergara y Collao, 2020).

- Diámetro de las partículas.

Primero se debe ir considerando el diámetro de las partículas. Para lograr eso, en la Tabla 5.8 se aprecia distintos valores para el diámetro de partícula que se desea sedimentar.

**Tabla 5.8**

*Tiempo necesario para la sedimentación de distintas partículas.*

Diámetro partícula, mm	Orden de tamaño	Area superficie total	Tiempo necesario sedimentar 30 cm
10	Grava	3,142 cm <sup>2</sup>	0,3 s
1	Arena gruesa	31,42 cm <sup>2</sup>	3 s
0,1	Arena fina	314,2 cm <sup>2</sup>	38 s
0,01	Limo	0,31 m <sup>2</sup>	33 min
0,001	Bacterias	3,14 m <sup>2</sup>	55 hrs
0,0001	Partículas coloidales	3,17 m <sup>2</sup>	230 días
0,00001	Partículas coloidales	2.833 m <sup>2</sup>	6,3 años
0,000001	Partículas coloidales	28.328 m <sup>2</sup>	Mín 63 años

**Nota:** Se observa el tiempo necesario para la sedimentación de diferentes tipos de materiales según sus diámetros, tomado de (Vergara y Collao, 2020).

Con referencia a la Tabla 5.8 se pretende eliminar partículas con diámetro superior a 1mm. Se procede a escoger la constante  $a$  utilizando la Figura 5.27.

**Figura 5.27**

*Constante  $a$  en función del diámetro.*

$a$	$d$ (mm)
51	0.1
44	0.1 – 1
36	1

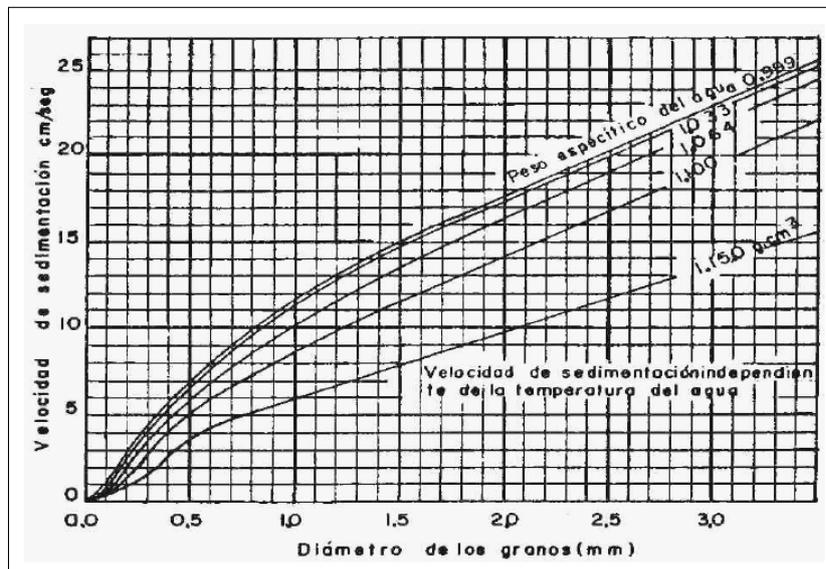
**Nota:** Se observan los distintos valores de la constante  $a$  en función del diámetro, tomado de (Vergara y Collao, 2020).

- Velocidad de Sedimentación  $W$ .

Existen varios métodos para determinar la velocidad de sedimentación. La primera es utilizando el método de Sudry como se observa en la Figura 5.28:

**Figura 5.28**

*Determinación de velocidad de sedimentación usando la experiencia generada por Sudry.*

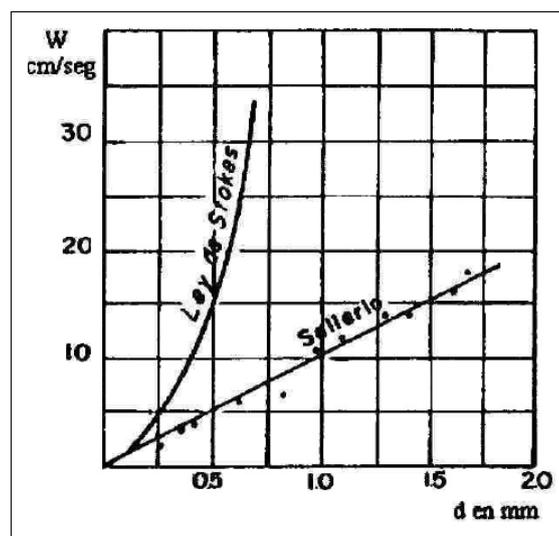


**Nota:** Se observa la comparación del diámetro de los granos respecto a la velocidad de sedimentación, tomado de (Sparrow, 2008).

La segunda es utilizando la experiencia generada por Sellerio como se observa en la Figura 5.29:

**Figura 5.29**

*Determinación de velocidad de sedimentación usando la experiencia generada por Sellerio.*



**Nota:** Se observa la comparación del diámetro de los granos respecto a la velocidad de sedimentación, tomado de (Sparrow, 2008).

La tercera es utilizando la tabla preparada por Arkhangelski representada en la Figura 5.30:

**Figura 5.30**

*Determinación de velocidad de sedimentación usando la tabla generada por Arkhangelski.*

<b>d (mm)</b>	<b>w (cm/s)</b>
0.05	0.178
0.10	0.692
0.15	1.560
0.20	2.160
0.25	2.700
0.30	3.240
0.35	3.780
0.40	4.320
0.45	4.860
0.50	5.400
0.55	5.940
0.60	6.480
0.70	7.320
0.80	8.070
1.00	9.44
2.00	15.29
3.00	19.25
5.00	24.90

**Nota:** Se observa las velocidades de sedimentación calculado por Arkhangelski en función del diametro de partículas, tomado de (Sparrow, 2008).

Una vez obtenido las velocidades de sedimentación usando los 3 métodos, se promedia los resultados. El valor final es la velocidad de sedimentación  $W$  a utilizar para el diseño.

- Velocidad de escurrimiento  $V_e$ .

Para determinar la velocidad de escurrimiento debemos utilizar la siguiente ecuación:

$$V_e = a\sqrt{d_p} \quad (60)$$

donde:

- $V_e$  Velocidad de escurrimiento [ $m/s$ ]
- $a$  Constante que se observa en la Figura 5.27 [ $xx$ ]
- $d_p$  Diámetro de la partícula, en [ $m$ ]

- Altura del desarenador  $h_d$ .

Según la Figura 5.25 nuestra altura del desarenador es el siguiente:

$$h_d = \frac{4}{3} \cdot h_c \quad (61)$$

donde:

$$\begin{array}{ll} h_d & \text{Altura del desarenador [m]} \\ h_c & \text{Altura del canal de conducción [m]} \end{array}$$

- Ancho del desarenador  $b_d$ .

El ancho del desarenador se determina mediante la siguiente ecuación:

$$b_d = \frac{Q_d}{h_d \cdot V_e} \quad (62)$$

donde:

$$\begin{array}{ll} b_d & \text{Ancho del desarenador [m]} \\ Q_d & \text{Caudal de diseño del canal [m}^3\text{/s]} \end{array}$$

- Largo del desarenador  $L_d$ .

El largo del desarenador se determina mediante la siguiente ecuación:

$$L_d = \frac{h_d \cdot V_e}{W} \quad (63)$$

donde:

$$\begin{array}{ll} L_d & \text{Largo del desarenador [m]} \\ W & \text{Velocidad de sedimentación [m/s]} \end{array}$$

- Tiempo de sedimentación  $T_s$ .

El tiempo de sedimentación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$T_s = \frac{h_d}{W} \quad (64)$$

donde:

$$T_s \quad \text{Tiempo de sedimentación [s]}$$

- Volumen necesario del desarenador  $V_1$ .

El volumen necesario del desarenador para cumplir los parámetros iniciales se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$V_1 = Q_d \cdot T_s \quad (65)$$

donde:

$$V_1 \quad \text{Volumen necesario [m}^3\text{]}$$

- Volumen dimensionado del desarenador  $V_2$ .

El volumen del desarenador utilizando los datos calculados anteriormente se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$V_2 = L_d \cdot h_d \cdot b_d \quad (66)$$

donde:

$$V_2 \quad \text{Volumen dimensionado [m}^3\text{]}$$

- Verificación de dimensiones.

Se debe comprobar que el desarenador cumpla los requisitos necesarios. Esto se analiza comparando el volumen dimensionado con el necesario.

Si:

$$V_1 < V_2$$

Entonces si cumple la condición.

- Transición de salida  $L_t$ .

Se debe calcular la longitud de la transición del desarenador hacia el canal de conducción como lo muestra la Figura 5.26 mediante la siguiente ecuación:

$$L_t = \frac{\frac{b_d}{2} - \frac{b}{2}}{\sin(\beta_2)} \quad (67)$$

donde:

$$\begin{aligned} b & \quad \text{Ancho del canal de conducción [m]} \\ b_d & \quad \text{Ancho del desarenador [m]} \\ \beta_2 & \quad \text{Ángulo de la transición de salida [°]} \end{aligned}$$

- Velocidad de salida  $V_s$ .

Se determina la velocidad en que el agua sale por el desarenador se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{Q_{hidráulico}}{A_s} \quad (68)$$

donde:

$$\begin{array}{ll} V_s & \text{Velocidad de salida [m/s]} \\ A_s & \text{Área de salida [m}^2\text{]} \end{array}$$

Este valor obtenido de la velocidad de salida se debe comparar con el límite erosivo para el material de construcción y debe ser menor que este último para que se cumpla.

Si:

$$V_s < \text{Límite erosivo del material}$$

Si cumple la condición.

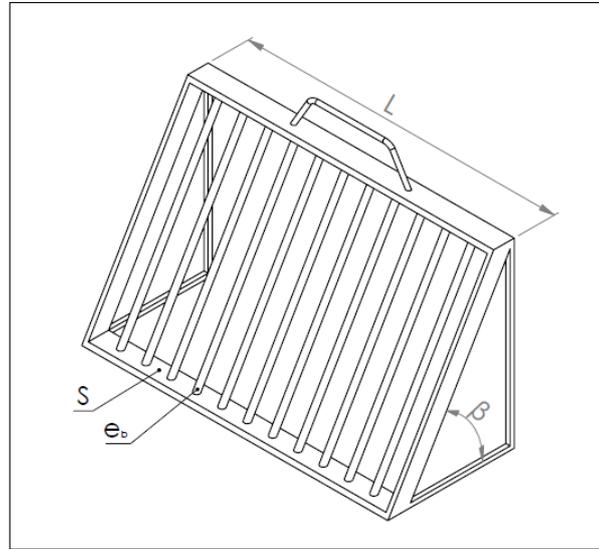
(Vergara y Collao, 2020) (Sparrow, 2008)

### 5.2.3.3. Consideraciones para el dimensionado de la rejilla para sólidos

Para el diseño de la rejilla de sólidos no se limita a muchas condiciones. Se debe considerar la cantidad de barrotes, el diámetro de los barrotes y la altura para empezar calculando sus espacios entre barrotes. Estas rejillas se las deben diseñar manuales con una manija para tener accesibilidad en retirar la rejilla y con un ángulo de inclinación para rastrillar fácilmente los sólidos que se queden atrapados ahí. Este ángulo por lo general es de 60° según bibliografía. A continuación en las Figuras 5.31 y 5.32 se observan los parámetros de lo que sería la rejilla para sólidos a instalarse en el canal de entrada:

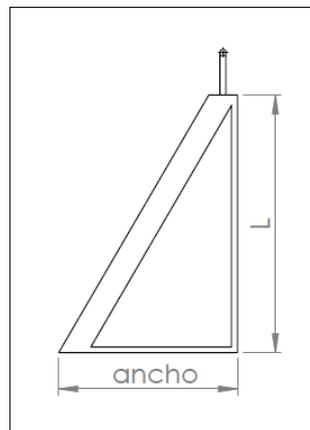
**Figura 5.31**

*Vista isométrica de la rejilla para sólidos.*



**Figura 5.32**

*Vista lateral de la rejilla para sólidos.*



- Espesor total de barrotes  $e_{Tb}$ .

Debemos hallar la medida total que suman los espesores de todos los barrotes:

$$e_{Tb} = N_{\text{barrotes}} \cdot e_b \quad (69)$$

donde:

$N_{barrotes}$	Cantidad de barrotes [ $xx$ ]
$e_b$	Espesor de barrote [ $mm$ ]

- Separación Total.

Debemos restar el valor del espesor total de barrotes para el ancho de la parte hueca de la rejilla. En este caso el ancho de la parte hueca es igual al ancho del canal menos el espesor de la rejilla en ambos lados.

$$ancho_{hueco} = b_c \cdot e_{rejilla} \quad (70)$$

$$Separación_{total} = e_{Tb} - ancho_{hueco} \quad (71)$$

donde:

$b_c$	Ancho del canal [ $mm$ ]
$e_{rejilla}$	Espesor de la rejilla con un valor de [ $10mm$ ]

- Separación entre barrotes S.

Dividimos el valor de la separación obtenido para la cantidad de espacios que existen entre los barrotes.

Para saber cuantos espacios existen, se suma el número de barras más uno.

$$N_{espacios} = N_{barrotes} + 1 \quad (72)$$

$$S = \frac{Separación_{total}}{N_{espacios}} \quad (73)$$

(Joaquin, 2021) (J. Aguilar, 2022)

#### 5.2.4. Sistema de transmisión

La caja de cambios es un mecanismo que consta de un conjunto de engranajes mediante los cuales la velocidad de salida se mantiene cercana a la ideal para el funcionamiento del generador de una manera muy segura y eficiente (SoporteDeveloper, 2020).

De esta manera, la caja de cambios tiene el efecto de reducir la velocidad del motor o, en otras palabras, reducir el desgaste de la batería gracias a un menor desgaste del motor y un mayor par. Sin este reductor, tendríamos que buscar un motor específico para cada aparato. La caja de cambios se usa no solo para reducir la velocidad que se aproxima, sino también para aumentar la velocidad (SoporteDeveloper, 2020).

Para su óptimo rendimiento se recomienda lo siguiente:

- Refrigeración adecuada.
- Lubricación constante.
- Mantenerla siempre cerrada para que ningún objeto extraño pueda obstruir los dientes y causar un desastre.
- Debe anclarse a una superficie debido a las altas vibraciones.

#### **5.2.4.1. Criterios de diseño del sistema de transmisión**

Para realizar el diseño de una caja reductora de velocidad debemos considerar una gran cantidad de requisitos a controlar.

Los parámetros utilizados para caracterizar las operaciones específicas de una caja reductora de velocidad son:

- Velocidad y Potencia: El rango de velocidad y potencia sobre los que la operación del motor es satisfactoria.
- Torque: Es la fuerza de giro que realiza un motorreductor, por lo que debemos preguntarnos ¿Cuál es el par requerido de carga?
- Ciclo de vida: Dependiendo del mínimo que establezcamos en cuanto a nivel del ciclo de vida, tenemos que elegir ciertos materiales. Además, el trato que reciban también será muy diferente. Medir las horas del motor en nuestra aplicación es muy importante para que nuestra caja reductora no se desgaste rápidamente.
- Coste: Otro aspecto fundamental a considerar en el diseño de una caja reductora de velocidad es el presupuesto del que se dispone. Muchas opciones de diseño, materiales y selección de tratamiento superficiales varían y condicionan el coste total del producto.
- Temperatura de funcionamiento: Lo ideal es hacer comprobaciones de temperatura cuando el motor esté bajo un funcionamiento de condiciones normales y cruzar estos datos con la temperatura que alcanza en condiciones extremas, aquellas susceptibles de darse en la máquina.
- Ambiente de funcionamiento: Si el motorreductor va a operar en ambientes húmedos, deberemos tomar ciertas medidas de estanqueidad. Por otro lado, en ambientes de trabajo sucios como el sector ganadero, debemos tener muy en cuenta los niveles de polvo, ya que la acumulación de las partículas en ciertas partes del motorreductor puede entorpecer el funcionamiento y contribuir al deterioramiento prematuro.

- Espacio: Su importancia radica en la necesidad de ajustarse dentro de un área específica y ofrecer una correcta transmisión sin que exista una merma en sus prestaciones.

(Compañía Levantina de Reductores, 2017)

#### **5.2.4.2. Criterios de selección de sistema de transmisión**

Para la selección de una caja reductora de velocidad se debe tener en cuenta los siguientes criterios (Roydisa, 2017):

- Características del proceso industrial:
  - Información del motor: Potencia, número de polos, frecuencia y tensión de alimentación.
  - Ambiente de la instalación y grado de protección del entorno de trabajo, en función de la humedad, temperatura, sociedad, corrosión.
  - Velocidad en RPM de entrada y de salida de reductor .
  - Torque (par) máximo/medio.
  
- Características del trabajo a realizar:
  - Duración de servicio horas/día.
  - Arranques por hora, inversión de marcha.
  - Tipo de carga: uniforme, con choque, continua, discontinua, entre otras.
  - Tipo de acople entre el motor eléctrico y reductor: directa, acoplamiento, correa, cadena. Tanto del eje de entrada como el de salida.
  - Eje de salida horizontal, vertical, etc.
  
- Factor de la potencia:
  - Por lo tanto, la potencia requerida por la máquina a controlar debe multiplicarse por el factor de trabajo o servicio ( $F_s$ ), que tiene en cuenta las características del trabajo a realizar. El resultado se denomina Potencia de selección ( $P_s$ ), que se utiliza para determinar el tamaño de la caja reductora de velocidades en las tablas de selección.

(Roydisa, 2017)

Los factores de servicio en los motores eléctricos se especifican en la Figura 5.33:

**Figura 5.33**

*Factores de servicio en motores eléctricos.*

Horas de Funcionamiento/Día	Carga uniforme	Carga uniforme	Carga con choques
2	0,9	1	1,25
10	1	1,25	1.50
20	1,25	1,5	1,75

**Nota:** Se observa una tabla donde se especifica los factores de servicio en los motores eléctricos, tomado de (Roydisa, 2017).

### 5.2.5. Generador eléctrico

Se define así a un equipo que tiene la capacidad de transformar energía mecánica en energía eléctrica y este proceso es realizado mediante el rotor (pieza que gira) y el estator (pieza estática). Cuando este equipo está en movimiento, genera una efusión magnética, haciendo que la otra parte se convierta en electricidad (GSL Industrias, 2021).

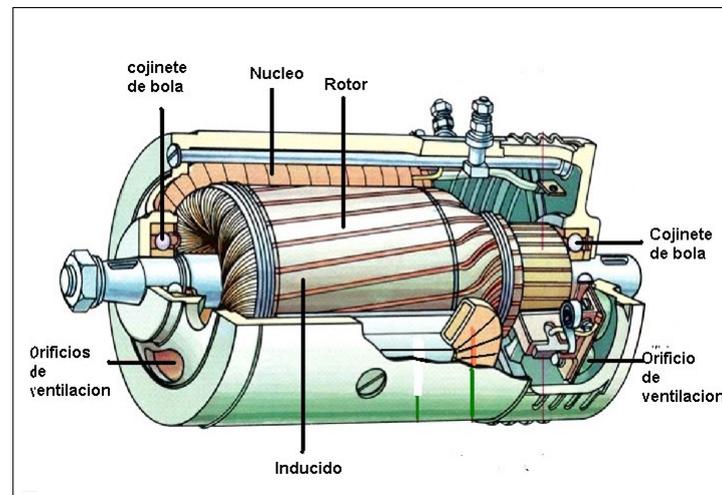
Existen generadores síncronos y asíncronos, pero en nuestro caso utilizaremos el generador síncrono.

#### 5.2.5.1. Generador Síncrono

También conocido como alternador, esta máquina eléctrica tiene la capacidad de transformar energía mecánica en forma rotativa en energía eléctrica. Se encargan de generar la mayor parte de la energía consumida en la red. La razón por la que se le denomina síncrono a este generador es porque el generador girará a la velocidad del campo magnético. A esta igualdad de frecuencias se le denomina sincronismo. Cuando un generador de este tipo está cometido a carga, la tensión que se induce sufrirá cambios, necesitando equipos auxiliares para garantizar una óptima operación del mismo. (E. Aguilar y Aprile, 2022). En la Figura 5.34 se observa como está conformado esta máquina eléctrica.

**Figura 5.34**

*Esquema de generador síncrono de imanes permanentes.*



**Nota:** Se observa en la Figura una máquina sincrónica con las partes que la conforman, tomado de (Alvarez, Ávalos, y Cruz, 2018).

Los electroimanes o polos generadores del campo magnético se encuentran en la parte giratoria o mejor conocido como rotor del generador eléctrico. El rotor de un generador eléctrico puede estar conformado por imanes permanentes, rotor de polos salientes o rotor cilíndrico (Alvarez y cols., 2018) .

El generador síncrono de rotor cilíndrico se utilizan en aplicaciones de alta velocidad (2 y 4 polos), turbo alteradores, en cambio, el de polos salientes es más apropiada para bajas velocidades (alto número de polos) se aplica en hidro-generadores o turbinas hidráulicas. Los imanes permanentes representan la configuración más simple, ya que evita el uso de anillos rozantes para alimentar el rotor, sin embargo, su aplicación a altas potencias se encuentra limitada, ya que las densidades de flujo magnético de los imanes no es, por lo general, alta (Alvarez y cols., 2018).

### **Características de un generador síncrono**

Las características principales de un generador eléctrico síncrono son las siguientes:

- El motor síncrono puede construirse con un alto rendimiento en una amplia gama de velocidades, ofreciendo así ahorros de energía significativos con una amplia variedad de cargas.

- Se puede conectar directamente con una red de alta tensión sin necesidad de transformadores.
- La velocidad de un generador síncrono se queda fija siempre, sin que influya la carga. Esto puede resultar ser una ventaja considerable para algunas aplicaciones.
- Una ventaja del generador síncrono es su mejor estabilidad en aplicaciones con variadores de frecuencia. El motor síncrono con variador de velocidad se recomienda para aplicaciones de alto par, baja velocidad y una amplia gama de regulación de la velocidad.

(ComercialMendez, 2020)

### **5.2.5.2. Principio de funcionamiento del generador síncrono**

El funcionamiento del generador eléctrico se basa en el cambio de flujo magnético cuando pasa por una hélice. A este principio se le denomina la Ley de Faraday. Podemos decir que funciona mediante las espirales que se encuentran en las bobinas, que cuando están en movimiento cortan la inducción magnética produciendo a su vez corriente. Al final, las escobillas revelan la energía eléctrica creada.

Al operar como generador, la es suministrada a la máquina por la aplicación de un torque y por la rotación del eje de la misma, una fuente de energía mecánica puede ser, por ejemplo, una turbina hidráulica, a gas o a vapor. Una vez estando el generador conectado a la red eléctrica, su rotación es dictada por la frecuencia de la red, pues la frecuencia de la tensión trifásica depende directamente de la velocidad de la máquina(E. Aguilar y Aprile, 2022).

### **5.2.5.3. Criterios de selección de un generador eléctrico**

Antes de adquirir un generador eléctrico, es necesario calcular la cantidad de energía necesaria para cubrir las necesidades energéticas requeridas. Para ello se debe determinar el total de vatios de todos los dispositivos que se ejecutarán al mismo tiempo, tomando en cuenta las siguientes consideraciones (GoToYard, 2023):

- Potencia nominal.
- Velocidad nominal de rotación.
- Número de polos según su velocidad de rotación.
- Eficiencia.

## 6. Marco metodológico

### 6.1. Metodología de la Investigación

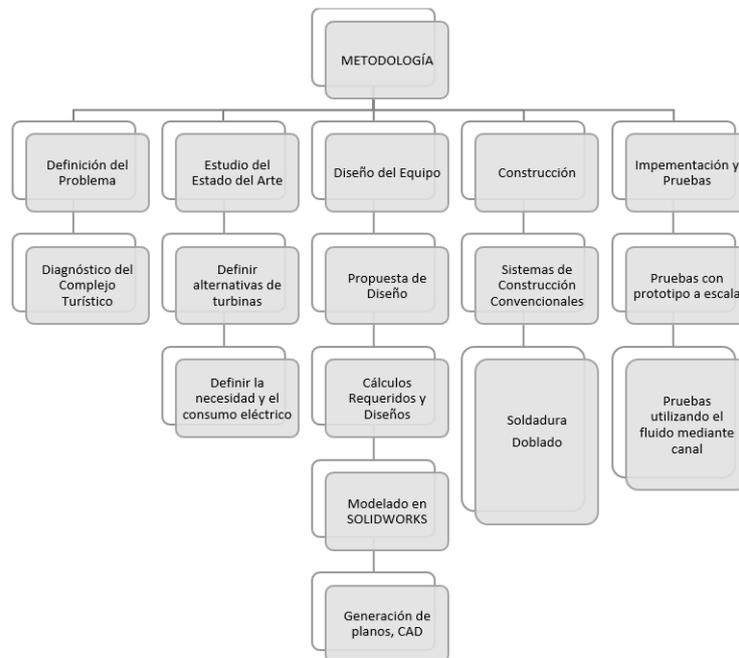
El trabajo de titulación tiene un enfoque cuantitativo porque se basará en datos numéricos obtenidos del cuerpo de agua como es el caudal, la altura de caída de agua, entre otros, además es de tipo aplicada, ya que la misma presenta una realidad de una central hidroeléctrica y finalmente un alcance descriptivo, debido a que se aplicaran conceptos teóricos ya definidos para realizar los cálculos respectivos del diseño.

### 6.2. Metodología del Proceso

En la Figura 6.1 se pueden observar las fases de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto.

**Figura 6.1**

*Fases de la metodología del proceso.*



**Nota:** Clasificación de las distintas fases del proceso de desarrollo del proyecto.

## 6.2.1. Datos de partida para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes

### 6.2.1.1. Determinación de dimensiones del cuerpo de agua

A continuación, en la figura 6.2 se presenta el cuerpo de agua donde se encuentra la presa o captación del agua:

**Figura 6.2**

*Complejo turístico Huachito del cantón Morona.*



**Nota:** Se puede observar el complejo turístico Huachito en donde se realizó el estudio para el diseño de la microcentral.

### 6.2.1.2. Determinación del caudal de diseño

Es fundamental la elección de un caudal de diseño adecuado para definir el equipamiento a instalar, de forma que la energía producida sea la máxima posible en función de la hidrología. Se construirá la curva de caudales clasificados. Esta proporciona una valiosa información

gráfica sobre el volumen de agua existente, el volumen turbinado y el volumen vertido por servidumbre, mínimo técnico o caudal ecológico.

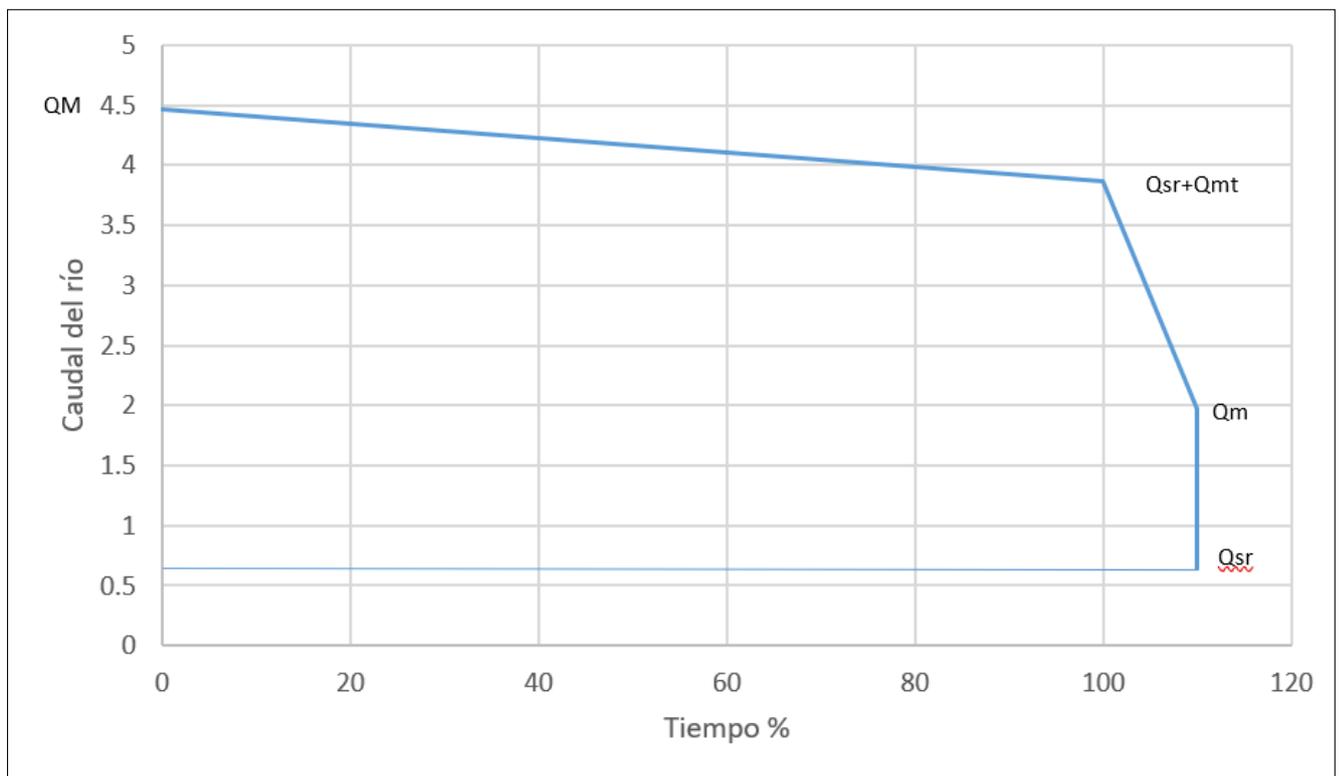
Para elaborar esta curva, se requieren los siguientes parámetros:

- QM: Caudal máximo alcanzado en el año o caudal de crecida.
- Qm: Caudal mínimo alcanzado en el año o caudal de estiaje.
- Qsr: Caudal de servidumbre que es necesario dejar en el río por su cauce normal. Incluye el caudal ecológico y el necesario para otros usos. El caudal ecológico lo fija el Organismo de cuenca, si no se conociera, una primera estimación es considerarlo igual al 10% del caudal medio interanual.
- Qmt: Caudal mínimo técnico. Es aquel directamente proporcional al caudal de equipamiento con un factor de proporcionalidad "K" que depende del tipo de turbina.

Una vez analizado los caudales correspondientes obtenemos la siguiente curva de la Figura 6.3:

**Figura 6.3**

*Curva de caudales del río Jurumbaino.*

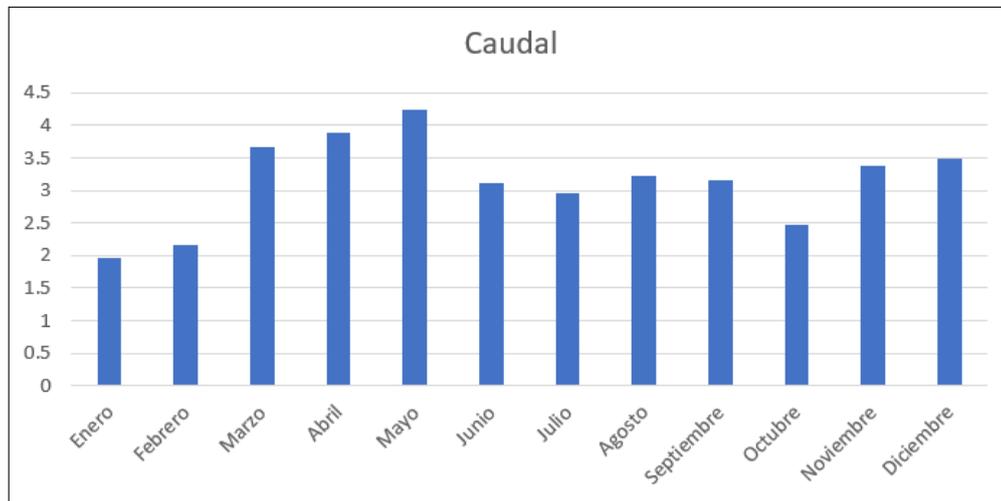


**Nota:** En la Figura se observa que todo el tiempo existirá un caudal de 0.625 metros cúbicos siendo este el caudal necesario para el cauce normal del río.

Así mismo se ha obtenido una gráfica del caudal del río Jurumbaino en los doce meses del año. En la Figura 6.4

### Figura 6.4

*Valores del caudal mensual del río Jurumbaino en el año 2023.*



**Nota:** En la Figura se observa una estadística de los valores mensuales del caudal existente en el río Jurumbaino. Esto nos permite saber cuando existe estiaje o crecidas.

### Método del flotador

Este método depende de la medición de la velocidad media de la corriente y del área de la sección transversal del canal. Una manera sencilla y fácil de calcular la velocidad consiste en utilizar un objeto flotante y medir el tiempo que tarda en recorrer, corriente abajo, una distancia conocida y establecida. Este método depende de la medición de la velocidad media de la corriente y del área de la sección transversal del canal. Una manera sencilla y fácil de calcular la velocidad consiste en utilizar un objeto flotante y medir el tiempo que tarda en recorrer, corriente abajo, una distancia conocida y establecida.

### Caudal Mínimo

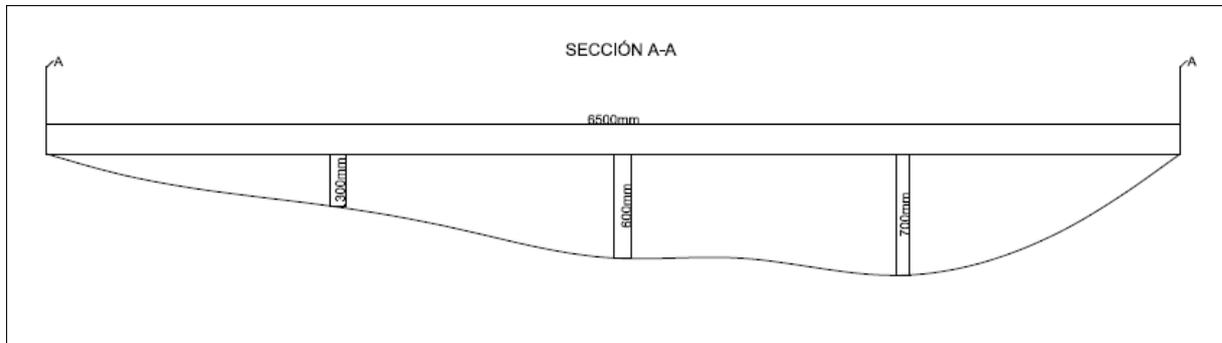
a) Cálculo de la sección transversal media del río.

En el tramo A-A y el tramo B-B las secciones transversales serán distintos y se deben medir 3 veces la profundidad del agua en metros a distancias iguales a través del ancho del río en los puntos A-A y B-B.

En la Figura 6.5 se observa la sección transversal A-A cuando el caudal es mínimo.

### Figura 6.5

Sección transversal A-A del río Jurumbaino en estiaje.

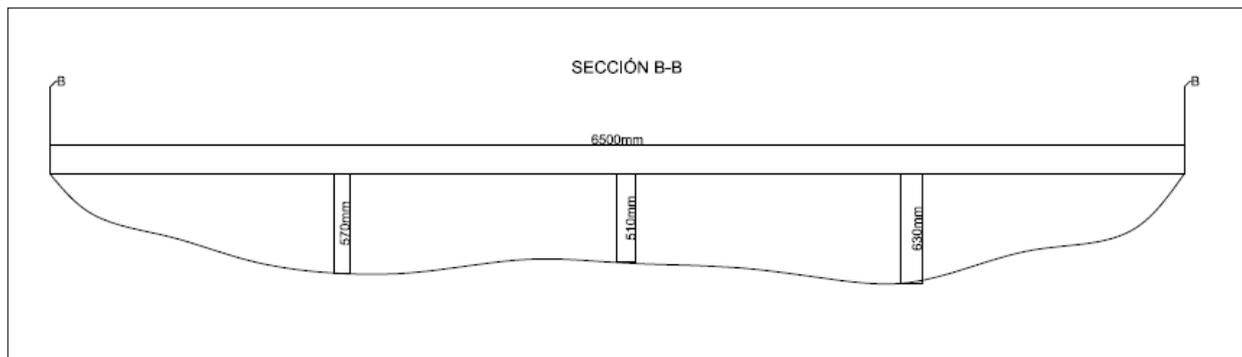


**Nota:** Se observa la sección transversal A-A cuando el caudal es mínimo en el río. Las unidades son en milímetros.

En la Figura 6.6 se observa la sección transversal B-B cuando el caudal es mínimo.

### Figura 6.6

Sección transversal B-B del río Jurumbaino en estiaje.



**Nota:** Se observa la sección transversal B-B cuando el caudal es mínimo en el río. Las unidades son en milímetros.

Una vez determinadas las medidas en los puntos A-A y B-B, se deben sumar las 3 cifras de la profundidad de cada punto y dividirlo para 3.

De esta manera hallamos la profundidad media del agua en aquel punto.

$$\begin{aligned}
P_{1AA} &= 0.30,m \\
P_{2AA} &= 0.60,m \\
P_{3AA} &= 0.70,m \\
P_{1BB} &= 0.57,m \\
P_{2BB} &= 0.51,m \\
P_{3BB} &= 0.63,m
\end{aligned}$$

$$P_{AA} = P_{1AA} + P_{2AA} + P_{3AA} \quad (74)$$

$$P_{BB} = P_{1BB} + P_{2BB} + P_{3BB} \quad (75)$$

$$\begin{aligned}
P_{AA} &= 1.6,m \\
P_{BB} &= 1.71,m
\end{aligned}$$

$$ProfundidadMedia_{AA} = \frac{P_{AA}}{3} \quad (76)$$

$$ProfundidadMedia_{BB} = \frac{P_{BB}}{3} \quad (77)$$

$$\begin{aligned}
ProfundidadMedia_{AA} &= 0.533,m \\
ProfundidadMedia_{BB} &= 0.57,m
\end{aligned}$$

La sección transversal es la profundidad media multiplicada por el ancho del arroyo.

$$\begin{aligned}
Ancho_{AA} &= 6.50,m \\
Ancho_{BB} &= 6.50,m
\end{aligned}$$

$$Sección_{AA} = ProfundidadMedia_{AA} \cdot Ancho_{AA} \quad (78)$$

$$Sección_{BB} = ProfundidadMedia_{BB} \cdot Ancho_{BB} \quad (79)$$

$$\begin{aligned}
Seccion_{AA} &= 3.467,m^2 \\
Seccion_{BB} &= 3.705,m^2
\end{aligned}$$

La sección transversal media es la suma de las dos secciones transversales AA y BB y dividido para dos.

$$SecciónMedia = \frac{Seccion_{AA} + Seccion_{BB}}{2} \quad (80)$$

$$SeccionMedia = 3.586, m^2$$

b) Cálculo de la velocidad media del agua.

Para determinar la velocidad media del agua que fluye, se debe utilizar un flotador y tomar el tiempo que tarda en recorrer desde el punto AA hasta el punto BB. Luego se divide la distancia que existe desde el punto AA hasta el punto BB para el tiempo medio calculado.

Este proceso es necesario realizarlo por lo menos tres veces y luego calcular el tiempo sumando las medidas y dividiendo por el número de medidas tomadas. Entre más medidas se toma, es más exacto el resultado

$$\begin{aligned} t_1 &= 14.06, s \\ t_2 &= 15.30, s \\ t_3 &= 13.47, s \\ t_4 &= 14.02, s \\ t_5 &= 14.30, s \\ L_{AB} &= 7.80, m \end{aligned}$$

$$TiempoMedio = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5} \quad (81)$$

$$VelocidadMedia = \frac{L_{AB}}{TiempoMedio} \quad (82)$$

$$\begin{aligned} TiempoMedio &= 14.23, s \\ VelocidadMedia &= 0.548, m/s \end{aligned}$$

c) Cálculo del caudal mínimo del agua.

Para hallar el caudal del agua es necesario multiplicar la velocidad media del agua por la sección transversal media.

$$Q_m = SecciónMedia \cdot VelocidadMedia \quad (83)$$

$$Q_m = 1.966, m^3/s$$

### **Caudal Máximo**

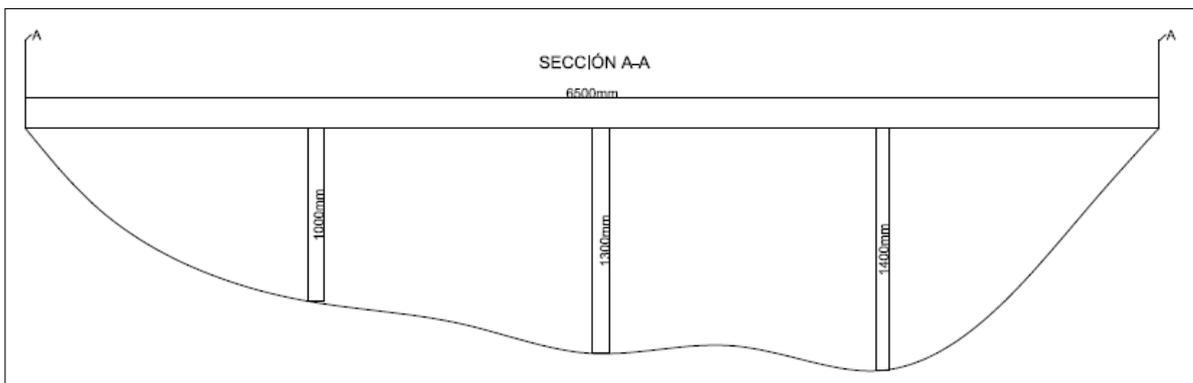
a) Cálculo de la sección transversal media del río.

En el tramo A-A y el tramo B-B las secciones transversales serán distintos y se deben medir 3 veces la profundidad del agua en metros a distancias iguales a través del ancho del río en los puntos A-A y B-B.

En la Figura 6.7 se observa la sección transversal A-A cuando el caudal es máximo.

**Figura 6.7**

*Sección A-A del río Jurumbaino en crecida.*

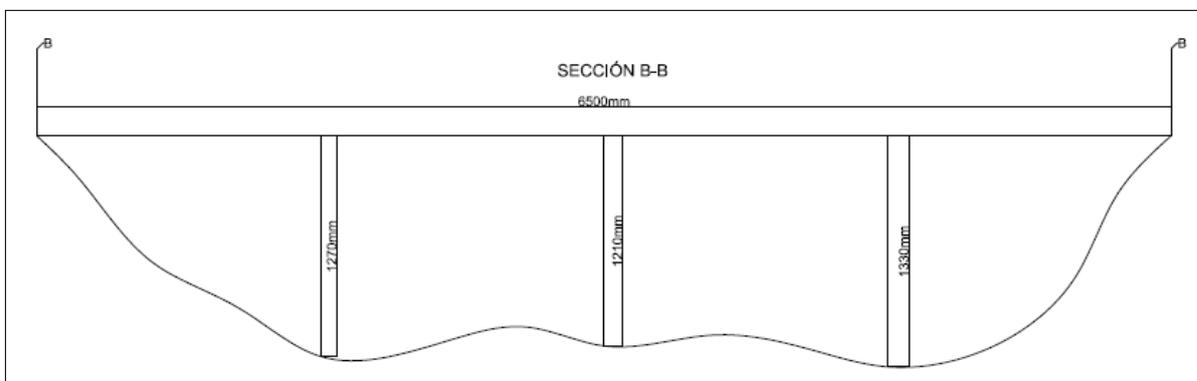


**Nota:** Se observa la sección transversal A-A cuando el caudal es máximo. Las unidades son en milímetros.

En la Figura 6.8 se observa la sección transversal B-B cuando el caudal es máximo.

**Figura 6.8**

*Sección B-B del río Jurumbaino en crecida.*



**Nota:** Se observa la sección transversal B-B cuando el caudal es máximo. Las unidades son en milímetros.

Una vez determinadas las medidas en los puntos A-A y B-B, se deben sumar las 3 cifras de la profundidad de cada punto y dividirlo para 3.

De esta manera hallamos la profundidad media del agua en aquel punto.

$$\begin{aligned}
 P_{1AA} &= 1,m \\
 P_{2AA} &= 1.3,m \\
 P_{3AA} &= 1.4,m \\
 P_{1BB} &= 1.27,m \\
 P_{2BB} &= 1.21,m \\
 P_{3BB} &= 1.33,m
 \end{aligned}$$

$$P_{AA} = P_{1AA} + P_{2AA} + P_{3AA} \quad (84)$$

$$P_{BB} = P_{1BB} + P_{2BB} + P_{3BB} \quad (85)$$

$$\begin{aligned}
 P_{AA} &= 3.7,m \\
 P_{BB} &= 3.81,m
 \end{aligned}$$

$$ProfundidadMedia_{AA} = \frac{P_{AA}}{3} \quad (86)$$

$$ProfundidadMedia_{BB} = \frac{P_{BB}}{3} \quad (87)$$

$$\begin{aligned}
 ProfundidadMedia_{AA} &= 1.23,m \\
 ProfundidadMedia_{BB} &= 1.27,m
 \end{aligned}$$

La sección transversal es la profundidad media multiplicada por el ancho del arroyo.

$$\begin{aligned}
 Ancho_{AA} &= 6.50,m \\
 Ancho_{BB} &= 6.50,m
 \end{aligned}$$

$$Sección_{AA} = ProfundidadMedia_{AA} \cdot Ancho_{AA} \quad (88)$$

$$Sección_{BB} = ProfundidadMedia_{BB} \cdot Ancho_{BB} \quad (89)$$

$$\begin{aligned}
 Seccion_{AA} &= 8.017,m^2 \\
 Seccion_{BB} &= 8.255,m^2
 \end{aligned}$$

La sección transversal media es la suma de las dos secciones transversales AA y BB y dividido para dos.

$$SecciónMedia = \frac{SecciónAA + SecciónBB}{2} \quad (90)$$

$$SecciónMedia = 8.136, m^2$$

b) Cálculo de la velocidad media del agua.

Para determinar la velocidad media del agua que fluye, se debe utilizar un flotador y tomar el tiempo que tarda en recorrer desde el punto AA hasta el punto BB. Luego se divide la distancia que existe desde el punto AA hasta el punto BB para el tiempo medio calculado.

Este proceso es necesario realizarlo por lo menos tres veces y luego calcular el tiempo sumando las medidas y dividiendo por el número de medidas tomadas. Entre más medidas se toma, es más exacto el resultado

$$t_1 = 14.06, s$$

$$t_2 = 15.30, s$$

$$t_3 = 13.47, s$$

$$t_4 = 14.02, s$$

$$t_5 = 14.30, s$$

$$L_{AB} = 7.80, m$$

$$TiempoMedio = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5} \quad (91)$$

$$VelocidadMedia = \frac{L_{AB}}{TiempoMedio} \quad (92)$$

$$TiempoMedio = 14.23, s$$

$$VelocidadMedia = 0.548, m/s$$

c) Cálculo del caudal máximo del agua.

Para hallar el caudal del agua es necesario multiplicar la velocidad media del agua por la sección transversal media.

$$Q_m = SecciónMedia \cdot VelocidadMedia \quad (93)$$

$$Q_M = 4.46, m^3/s$$

## Caudal a utilizarse para el dimensionado de la turbina

- Caudal Medio del Río

$$Q = \frac{Q_M + Q_m}{2} \quad (94)$$

$$Q = 3.213, m^3/s$$

- Caudal a utilizarse en el dimensionado de la turbina

Debemos considerar el caudal ecológico que debe permanecer en el arroyo para no afectar el cauce normal. El caudal de diseño que tomaremos será el 5% del caudal medio del agua del río.

$$Q_T = Q \cdot (0.05) \quad (95)$$

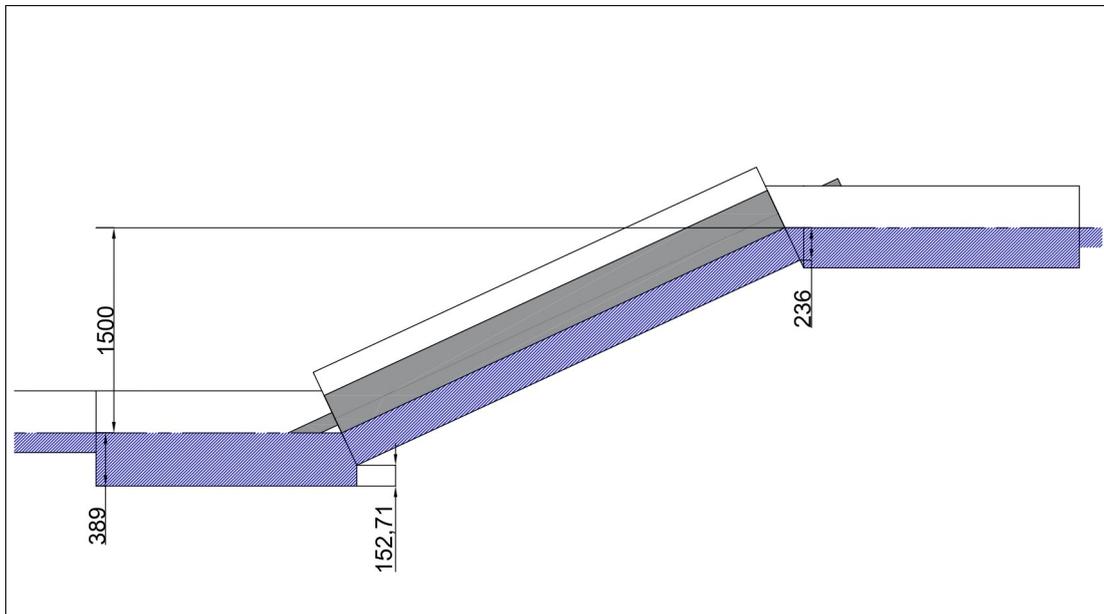
$$Q_T = 0.161, m^3/s$$

### 6.2.1.3. Determinación del salto aprovechable

El salto es la otra magnitud fundamental para el diseño de una minicentral hidroeléctrica. Deberá ser el máximo permitido por la topografía del terreno, teniendo en cuenta los límites que marcan la afección al medio ambiente y la viabilidad económica de la inversión. En la Figura 6.9 se observa el salto existente en la entrada y la salida del agua del terreno considerado en este proyecto.

**Figura 6.9**

*Salto desde la toma de agua hasta la descarga de agua al río.*



**Nota:** Las unidades de medida son en milímetros.

Primero calcularemos la pendiente que tiene el sitio donde se realizará la obra.

$$H_{max} = 1,5,m$$

$$H_{min} = 0,m$$

$$L_{obra} = 8,5,m$$

$$Pendiente = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{obra}} \quad (96)$$

$$Pendiente = 0,176$$

La diferencia de altura entre la cota máxima de agua en captación y la cota mínima de la instalación de la turbina será nuestro salto

$$H = 1,5, m$$

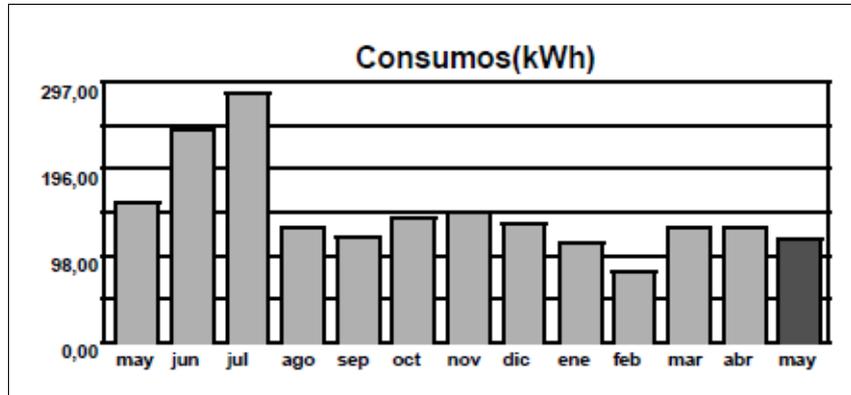
#### **6.2.1.4. Determinación de la potencia aproximada de funcionamiento**

La potencia hidroeléctrica es otro factor muy importante a considerar, ya que debemos conocer cuanto es el consumo eléctrico que debemos abastecer para poder saber la potencia a generar por la turbina hidráulica. Debemos conocer el consumo anual si es posible y considerar la temporada con el máximo consumo eléctrico para usar el valor más desfavorable.

En la Figura 6.10 se puede observar los consumos a lo largo del año y se aprecia el máximo consumo eléctrico en el mes de julio con un valor de 297kWh.

**Figura 6.10**

*Consumo eléctrico mensual del complejo turístico Huachito durante el año 2022-2023.*



**Nota:** Se observa el consumo eléctrico máximo del complejo en el mes de Julio, fecha en la cual toda la gente se encuentra de vacaciones, adaptado de (Centrosur, 2023)

Dependiendo el sector, existen perspectivas de expansión en caso de un posible incremento de consumo y así no realizar una mala inversión. Para saber la potencia necesaria de instalación, debemos dividir el consumo en kWh para el tiempo de consumo considerado en la planilla. En este caso el consumo es mensual así que dividimos para 730 horas.

El consumo máximo del complejo turístico es de 297kWh, por lo que esto dividimos para 730h.

$$P = \frac{297kW.h}{730h} \quad (97)$$

Por lo que la potencia mínima que debemos generar es de:

$$P = 0.407 \text{ kW}$$

Un factor a considerar es la perspectiva de expansión del lugar o sitio a instalar la micro central. En nuestro caso se considera generar un 50% de potencia extra.

$$P_{50} = 0.407kW \cdot 0.5 \quad (98)$$

Por lo que:

$$P_{50} = 0.2035 \text{ kW}$$

Ahora la potencia total mínima a generar es la suma de las potencias antes obtenidas.

$$P = 0.6105 \text{ kW}$$

### 6.2.2. Diseño mecánico e hidráulico de la micro central de tornillo de Arquímedes.

Para una micro central hidroeléctrica existen muchas alternativas de turbinas, pero las más recomendables son las ruedas hidráulicas y las turbinas de tornillo de Arquímedes. Esto por su eficiencia respecto al bajo caudal y salto. Un valor también a considerar es el costo de fabricación y la versatilidad al operarlos. Son turbinas con una intervención más segura y fácil. Considerando el salto, potencia y caudal se realiza una matriz de ponderación demostrando la opción más factible en porcentaje como se indica en la Figura 6.11.

**Figura 6.11**

*Matriz de ponderación para selección de turbina hidráulica.*

Opción	Potencia (25%) Máx (1000kW)	Rendimiento (25%) Máx (100%)	Caudal (25%) Máx (10m <sup>3</sup> /s)	Salto (25%) Máx (12m)	Total (100%)
Turbina de Arquímedes	500kW (12.5%)	90 (22.5%)	10 (25%)	9 (18.75)	78.75%
Ruedas hidráulicas	50kW (1.25%)	75 (18.75%)	5 (12.5%)	11 (22.9)	55.4%

**Nota:** Se puede observar las diferencias en valores según los valores máximos de ambas turbinas.

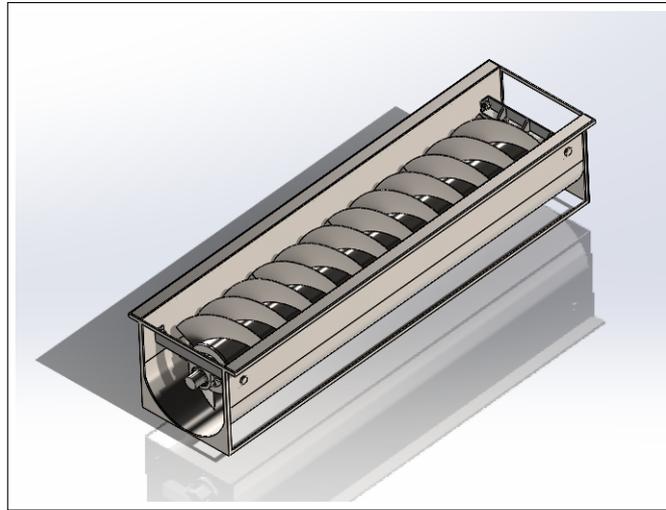
#### 6.2.2.1. Dimensionado del diseño del tornillo de Arquímedes

##### Proceso para el dimensionado de turbina tipo tornillo de Arquímedes

Tras haber establecido las condiciones de diseño, se propone un paso a paso del proceso de diseño de la turbina de Arquímedes. En la Figura 6.12 se observa la idea del modelo de la turbina de Arquímedes que se plantea dimensionar:

## Figura 6.12

Modelo de la turbina de Arquímedes.



**Nota:** Se puede apreciar el modelo deseado de la turbina de Arquímedes a diseñar.

1. Determinar las propiedades del emplazamiento: El caudal del agua disponible  $Q$ , salto o cabeza  $H$ .
2. Definir el ángulo de inclinación de la turbina  $\beta$ , mismo que se recomienda ser de entre  $22^\circ$  a  $30^\circ$ , el número de hélices  $N$ , se recomienda usar 3, y la correlación de radios  $\rho_R$ .

$$\beta = 25^\circ$$

$$N = 3$$

$$\rho_r = 0.5$$

3. Utilizar la Ecuación 1 para determinar la longitud del tornillo de Arquímedes.

$$L_T = 3.55 \text{ m}$$

4. Estime el diámetro exterior  $D_{e1}$  del tornillo usando la Ecuación 2. Luego seleccione el diámetro exterior  $D_{e2}$  utilizando la Tabla 5.20 y promedie ambos diámetros.

$$D_{e1} = 0.736 \text{ m}$$

$$D_{e2} = 0.760 \text{ m}$$

$$D_e = 0.750 \text{ m}$$

5. Calcule el diámetro interior  $D_i$  del tornillo usando la Ecuación 3 y el paso usando la Ecuación 4.

$$D_i = 0.375 \text{ m}$$

$$S = 0.75 \text{ m}$$

6. Calcule la velocidad de rotación  $n$  usando la Ecuación 10.

$$n_{max} = 60.571 \text{ rpm}$$

7. Calcule el volumen  $V_C$  usando la Ecuación 5 y el caudal de fuga entre las hélices y la canaleta de contención según Nagel  $Q_{f1}$  usando la Ecuación 6 y el caudal de fuga según Muysken  $Q_{f2}$  usando la Ecuación 17.

Primero calculamos  $A_b$  que corresponde a la anchura de la brecha entre las hélices y la canaleta de contención. Esto lo hallamos mediante la Ecuación 18.

$$A_b = 0.0039 \text{ m}$$

$$Q_{f1} = 0.0063 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{f2} = 0.0070 \text{ m}^3/\text{s}$$

Consideramos el valor obtenido de la ecuación de Muysken por su precisión.

El punto de diseño óptimo no debe tener fugas por desbordamiento, para garantizar la potencia óptima del tornillo se debe considerar  $l=1$ .

$$l = 1$$

$$V_C = 0.051 \text{ m}^3$$

8. Calcule el caudal nominal  $Q_n$  usando la Ecuación 9.

$$Q_n = 0.154 \text{ m}^3/\text{s}$$

9. Calcular las pérdidas de torque por fricción viscosa del agua usando las Ecuaciones 31, 40 y el par total entregado por cada hélice mediante la Ecuación 43.

Primero calculamos las fuerzas de fricción generadas en cada caso.

La fuerza de fricción en el canal usando la Ecuación 20:

$$F_c = 7.263 \text{ N}$$

La fuerza de fricción en el núcleo del tornillo debido a la viscosidad del fluido usando la Ecuación 28, para este cálculo es necesario utilizar la Ecuación 29 para determinar el área húmeda del núcleo del tornillo.

$$A_n = 2.091 \text{ m}^2$$

$$F_n = 12.94 \text{ N}$$

El par de frenado debido a la fricción del agua en el núcleo del tornillo se calcula con la 31

$$T_{fn} = 2.426 \text{ N.m}$$

El par de frenado total se calcula con la Ecuación 39.

$$T_h = 1.430 \text{ N.m}$$

El par debido a fricción del fluido en la superficie de las palas usando la Ecuación 40.

$$T_{fp} = 20.306 \text{ N.m}$$

El par teórico suministrado por el tornillo se calcula usando la Ecuación 42.

$$T = 222.216 \text{ N.m}$$

10. Calcular las pérdidas de potencia usando las Ecuaciones 19, 27, 31, 40.

Debemos considerar la densidad del agua que es el fluido y la gravedad.

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m}^2/\text{s}$$

La pérdida de potencia debido a la fuga entre el canal y las hélices se obtiene mediante la Ecuación 19.

$$P_f = 103.005 \text{ W}$$

La pérdida de potencia debido a la fricción en la canaleta se obtiene mediante la Ecuación 27.

$$P_{al} = 2.033 \text{ W}$$

La pérdida de potencia debido a la fricción en el núcleo del tornillo se obtiene mediante la Ecuación 32.

$$P_{fn} = 14.246 \text{ W}$$

La pérdida de potencia debido a la fricción del agua en la superficie de las palas se obtiene mediante la Ecuación 41.

$$P_{fp} = 128.80 W$$

11. Calcular el nivel de agua al ingreso  $h_{in}$  con la Ecuación 12, el nivel de agua a la salida  $h_{sal}$  con la Ecuación 15 y la inmersión del tornillo de Arquímedes  $l$  mediante la Ecuación 16.

Empezamos calculando el factor de pérdidas hidráulicas utilizando la Ecuación 13:

$$\zeta = 0.0001399$$

El nivel de agua al ingreso es:

$$h_{in} = 0.236 m$$

El nivel de agua a la salida es:

$$h_{sal} = 0.381 m$$

Por otra parte, la inmersión del tornillo es:

$$I = 0.561$$

12. Calcular el torque total usando la Ecuación 43.

El torque total generado por el tornillo de Arquímedes es el siguiente:

$$T_{total} = 199.484 N.m$$

13. Calcular la potencia mecánica  $P_{mec}$  utilizando la Ecuación 45.

La potencia mecánica entregada por el tornillo es la siguiente:

$$P_{mec} = 1265.32W$$

14. Calcular la potencia hidráulica disponible  $P_{hid}$  utilizando la Ecuación 46.

La potencia hidráulica disponible es la siguiente:

$$P_{hid} = 2369.115 W$$

15. Calcular el rendimiento hidráulico mediante la Ecuación 47.

El rendimiento hidráulico del tornillo de Arquímedes se calcula restando las pérdidas de potencia antes calculadas.

$$\eta h = 0.895$$

16. Calcular el rendimiento global  $\eta$  mediante la Ecuación 48.

El rendimiento está directamente relacionado con las pérdidas de carga que inevitablemente se perderán en la turbina debido a fugas y fricción viscosa entre ciertas superficies del tornillo y el fluido.

$$\eta_{global} = 0.534$$

El rodamiento que se considera es el rodamiento axial de bolas de simple efecto 51220 de SKF. Este rodamiento se lo monta dentro de las chumaceras encontradas en los ejes laterales que están anclados en la turbina. En la Figura 6.13 se puede apreciar las propiedades del rodamiento.

### Figura 6.13

*Rodamiento axial de bolas SKF.*

Dimensiones		Rendimiento	
Diámetro interno	100 mm	Capacidad de carga dinámica básica	119 kN
Diámetro exterior	150 mm	Capacidad de carga estática básica	325 kN
Espesor	38 mm	Velocidad de referencia	1 800 r/min
		Velocidad límite	2 400 r/min
Propiedades			
Capacidad de carga axial	De simple efecto		
Cantidad de hileras	1		
Jaula	Chapa metálica		
Tipo de arandela del soporte	Planos		
Clase de tolerancia	Normal		
Material, rodamiento	Acero para rodamientos		
Recubrimiento	Sin		

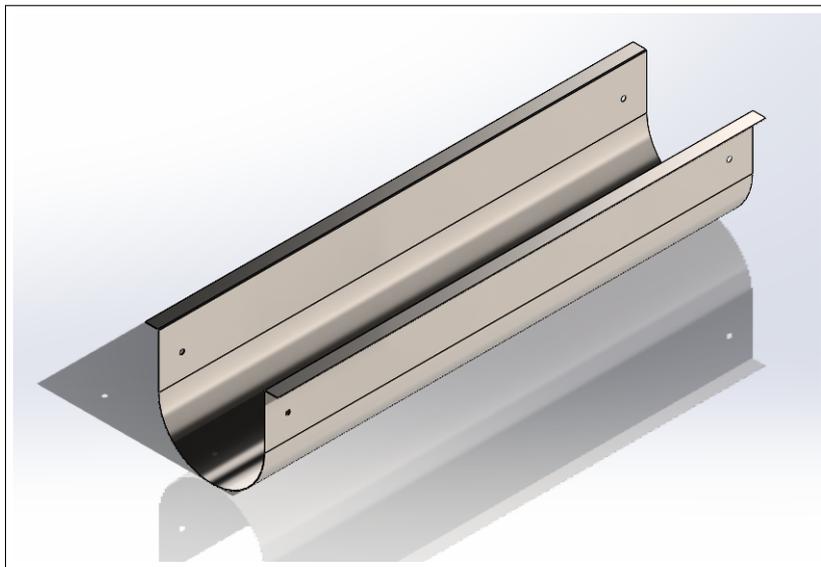
**Nota:** Se aprecian las dimensiones, el rendimiento y las propiedades mecánicas del rodamiento 51220 escogido, tomado de (SKF, 2023).

### 6.2.2.2. Dimensionado de la canaleta

Para el dimensionado no se ha realizado un cálculo específico para su diseño. Tan solo se consideró el espacio que debe tener respecto a las hélices para evitar la fuga del caudal. En la figura 6.14 se observa el modelo de la canaleta de contención, el cual tiene una brecha respecto al diámetro de las hélices para que pueda rotar sin inconvenientes.

**Figura 6.14**

*Esquema de la canaleta de contención del tornillo de Arquímedes.*



**Nota:** Se puede apreciar el modelo deseado de la canaleta de contención que servirá de apoyo para la turbina de Arquímedes y para evitar fuga excesiva del caudal.

Esta brecha entre las hélices y la canaleta de contención se calcula con la Ecuación 18.

$$Ab = 0.0039, m$$

Para hallar el radio de la canaleta se debe sumar el radio exterior de las hélices con el doble producto de la anchura de la brecha.

$$R_{canaleta} = R_e + 2 \cdot Ab \quad (99)$$

$$R_{canaleta} = 0.3828, m$$

Por lo tanto, el diámetro es:

$$D_{canaleta} = 2 \cdot R_{canaleta} \quad (100)$$

$$D_{canaleta} = 0.7656, m$$

Para hallar la dimensión del espesor de la canaleta de contención consideramos utilizar la tabla de estandarización 7.2:

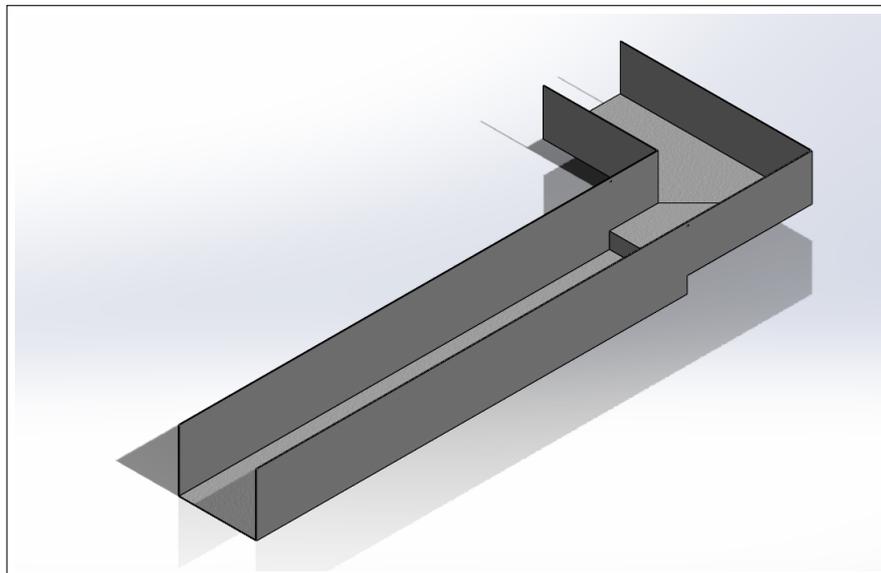
$$e_{canaleta} = 4, mm$$

### 6.2.2.3. Dimensionado del canal de conducción

Tras haber establecido las condiciones de diseño, se propone un paso a paso del proceso de diseño del canal de conducción. En la figura 6.15 se observa una idea de como se supone que debe ser el canal de conducción a la entrada de la turbina.

**Figura 6.15**

*Esquema del canal de conducción a la entrada de la turbina.*

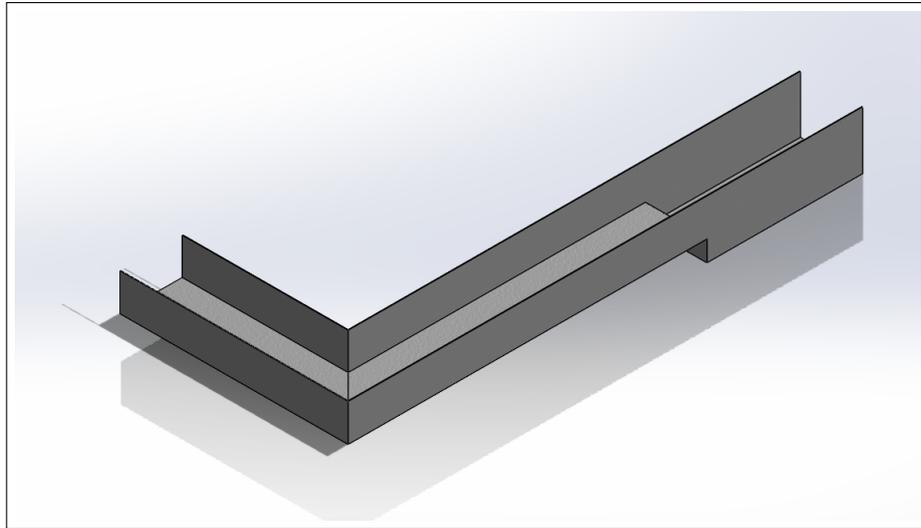


**Nota:** Se puede apreciar el modelo deseado del canal de conducción en la entrada de la turbina en donde se conducirá el agua para alimentarlo. Este canal de conducción a la entrada ya contiene un desarenador que servirá para sedimentar las partículas que puedan generar atascos en el funcionamiento de la turbina.

En la figura 6.16 se observa una idea de como se supone que debe ser el canal de conducción a la salida de la turbina. Cabe señalar que existe un cambio en la altura del canal de salida por el resultado del cálculo realizado para determinar el nivel de agua en la salida de la turbina.

**Figura 6.16**

*Esquema del canal de conducción a la salida de la turbina.*



**Nota:** Se puede apreciar el modelo deseado del canal de conducción en la salida de la turbina en donde se conducirá el agua para devolverlo al cuerpo de agua.

### **Proceso para el dimensionado del canal de conducción a la turbina**

Tras haber establecido las condiciones de diseño, se propone un paso a paso del proceso de diseño del canal de conducción:

1. Determinar las propiedades hidráulicas necesarias para el diseño, como el gasto hidráulico  $Q$  necesario para la alimentación en la turbina y la pendiente longitudinal del canal  $S$ . La pendiente la consideramos tan solo del canal de conducción, por lo que:

$$Pendiente = \frac{H_{max} - H_{min}}{L_{obra}} \quad (101)$$

Donde:

$$\begin{aligned} H_{max} &= 0.1, m \\ H_{min} &= 0, m \\ L_{obra} &= 05.38, m \end{aligned}$$

Entonces:

$$Pendiente = 0.019$$

El caudal hidráulico es el mismo que consideramos para uso de diseño de la turbina:

$$Q_{hidráulico} = 0.161, m^3/s$$

2. Utilizar la Ecuación 57 para determinar la tirante del agua en el canal.

Considerando los siguientes datos como condiciones iniciales, logramos despejar la tirante:

$$\begin{aligned} A &= 2d^2 \\ P &= b + 2d \\ b &= 0.750, m \end{aligned}$$

3. Despejar la  $d$  de la ecuación anterior.

Se recomienda utilizar la función SOLVE de una calculadora fx-570ES PLUS para resolver la Ecuación 57 y despejarla.

$$d = 0.143, m$$

4. Una vez obtenido el valor de la tirante del agua, se calcula el perímetro asumiendo que  $P = b + 2d$ .

$$P = 1.036, m$$

5. Determinamos el área del canal de conducción asumiendo que  $A = b * d$ .

$$A = 0.107, m^2$$

6. Con el valor del perímetro y la tirante del agua determinado, reemplazamos los datos en la Ecuación 50 para calcular y comprobar el valor de la base del canal de sección rectangular.

$$b_c = 0.750, m$$

7. Una vez obtenido el valor de la base y la tirante de agua, calculamos o establecemos la altura del borde libre del canal, el cual está por encima de la tirante del agua. Esto se lo determina con la Ecuación 59 o mediante las relaciones establecidas en las Figuras 5.6 y 5.7 a consideración de cada diseñador.

Hemos considerado el borde libre según el caudal como lo indica la Figura 5.6, ya que mediante la Ecuación 59 nos da un valor demasiado bajo.

$$B_L = 0.30, m$$

8. A esta altura del borde libre  $B_L$  la sumamos con la altura de la tirante del agua  $d$  y obtenemos la altura total del canal  $h_c$ . Toca aproximar a un valor entero para su fácil construcción

$$h_c = 0.45, m$$

#### 6.2.2.4. Dimensionado del desarenador

1. Para el cálculo del desarenador primero hay que considerar el diámetro de las partículas que se requiere eliminar. En este caso, según bibliografía y tablas, el diámetro máximo admitido es de 0.25 mm para las centrales hidroeléctricas. En nuestro caso consideraremos un diámetro de partícula a eliminar de 1 mm.

$$d_p = 1, mm$$

2. Determinar la constante  $a$  mediante la Figura 5.27.

$$a = 36$$

3. Se calcula la velocidad de sedimentación  $W$  utilizando los tres métodos de Sudry, Sellerio y Arkhangelski. La  $W$  de Sudry mediante la Figura 5.28, la  $W$  de Sellerio mediante la figura 5.29 y la  $W$  de Arkhangelski mediante la 5.30.

$$W_{Sudry} = 0.12, m/s$$

$$W_{Sellerio} = 0.11, m/s$$

$$W_{Arkhangelski} = 0.0944, m/s$$

Una vez obtenido las tres velocidades de sedimentación, se promedia los valores y este último será la velocidad de sedimentación  $W$  a utilizarse para el diseño.

$$W_{sedimentacion} = 0.108, m/s$$

4. La velocidad de escurrimiento se determina utilizando la Ecuación 60.

$$V_c = 0.36, m/s$$

5. La altura del desarenador se obtiene mediante la Ecuación 61.

$$h_d = 0.6, m$$

6. El ancho del desarenador se obtiene utilizando la Ecuación 62.

$$b_d = 0.745, m$$

7. El largo del desarenador se determina utilizando la Ecuación 63.

$$L_d = 2, m$$

8. El tiempo de sedimentación se calcula mediante la Ecuación 64.

$$T_s = 5.549, s$$

9. El volumen necesario del desarenador se determina utilizando la Ecuación 65. Esto es necesario para luego compararlo con el volumen dimensionado del desarenador y comprobar que el desarenador cumpla los requisitos.

$$V_1 = 0.893, m^3$$

10. El volumen del desarenador se calcula utilizando los datos obtenidos anteriormente y mediante la Ecuación 66. Este volumen calculado es necesario compararlo con el volumen necesario para el desarenador.

$$V_2 = 0.9, m^3$$

11. Se debe verificar los volúmenes anteriores. Si el volumen necesario es menor o igual al volumen dimensionado, entonces si cumple con la condición.

12. Se calcula la longitud de la transición del desarenador hacia el canal de conducción que llevará el agua sedimentada hacia la turbina. Esto se lo calcula mediante la Ecuación 67.

$$L_{transición} = 0, m$$

En este caso no existe una diferencia de anchura entre el canal de conducción y el desarenador. Tan solo en altura.

13. La velocidad en la que el agua sale por el desarenador se calcula mediante la Ecuación 68.

$$V_s = 0.358, m/s$$

14. El valor de la velocidad de salida obtenido anteriormente se debe comparar con el límite erosivo del material de construcción. El valor de la velocidad de salida debe ser menor al límite erosivo para que se cumpla la condición

$$LímiteErosivodelHormigón = 6, m/s$$

Y:

$$V_s < LímiteErosivodelHormigón$$

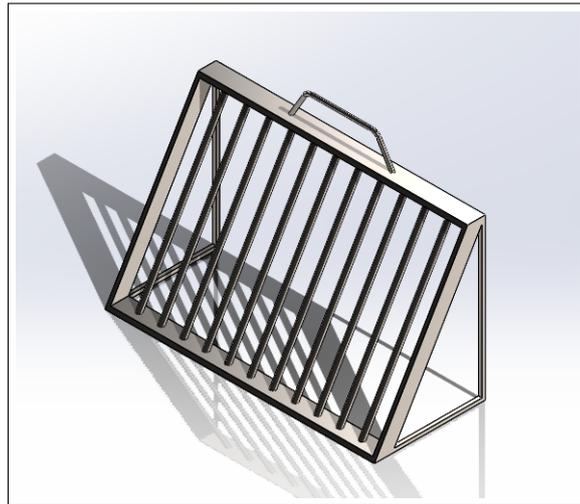
. Entonces si cumple la condición.

### 6.2.2.5. Dimensionado de la rejilla para sólidos

En la Figura 6.17 se aprecia una idea de como se supone debe quedar la rejilla para detener los sólidos u objetos flotantes que podrían ingresar a la turbina afectando su funcionamiento.

**Figura 6.17**

*Esquema de la rejilla para los sólidos.*



**Nota:** Se puede observar el modelo de la rejilla que va a servir para detener los sólidos flotantes.

1. Para el cálculo de la rejilla primero debemos establecer cuantos barrotes y el espesor de estos para detener los sólidos.

$$\begin{aligned}N_{\text{barrotes}} &= 11 \\e_b &= 15, \text{ mm}\end{aligned}$$

Luego hallamos el espesor total de todos los barrotes juntos utilizando la Ecuación 69.

$$e_{Tb} = 165, \text{ mm}$$

2. Hallamos el ancho de la parte hueca de la rejilla con la Ecuación 70. Luego determinamos la separación total mediante la Ecuación 71.

$$\begin{aligned}\text{ancho}_{\text{hueco}} &= 730, \text{ mm} \\ \text{Separación}_{\text{total}} &= 565, \text{ mm}\end{aligned}$$

3. Para hallar la separación entre cada barrote, utilizamos la Ecuación 73.

$$S_b = 47.083, \text{ mm}$$

### 6.2.2.6. Selección del sistema de transmisión

La caja multiplicadora de velocidades seleccionada es una de ejes paralelos con engranes helicoidales de la marca Bezares, código 601399 (Bezares S.A., 2023). En la Figura 6.18 se observa la caja multiplicadora seleccionada.

**Figura 6.18**

*Fotografía de la caja multiplicadora de velocidades seleccionada.*



**Nota:** Se observa la caja multiplicadora de ejes paralelos seleccionada, tomado de (Bezares S.A., 2023).

Los parámetros que se ha considerado para la selección del multiplicador de velocidades son los siguientes:

- Requerimos que se pueda variar la velocidad según la relación de transmisión.
- Requerimos que sea efectiva para sistemas de altas potencias.
- Que sea de ejes paralelos y de engranajes helicoidales.
- Que pueda ser acoplado por el eje de la turbina en la entrada y por el generador síncrono en la salida.

Dado el hecho que tenemos una velocidad de entrada de 60rpm y requerimos una velocidad de salida de 100rpm para el generador síncrono, se halla la relación de transmisión con la siguiente fórmula:

$$i = \frac{n_1}{n_2} \quad (102)$$

Donde:

$$i = \text{Relación de Transmisión}$$

$$n_1 = 60, \text{ rpm}$$

$$n_2 = 100, \text{ rpm}$$

Entonces, se conoce que cuando el engrane motriz da una vuelta, el engrane conducido da 1.67 vueltas.

Para apreciar las características y detalles técnicos de la caja seleccionada, en la Figura 6.19 se especifica cada uno de ellos.

**Figura 6.19**

*Características técnicas de la caja multiplicadora de velocidades.*

caja gearbox **Multiplicadora alta potencia**  
High power Gear Up Box

Alta potencia  
High power (Heavy Duty)



**Descripción Description**

Caja Multiplicadora de alta potencia disponible en diferentes relaciones internas. Diferente sentido de giro a la entrada y salida.

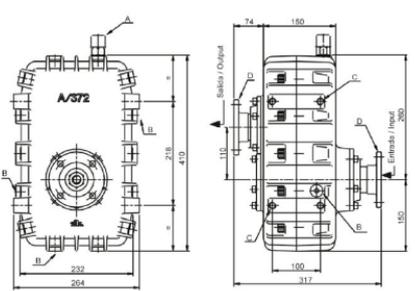
High Power gear up box with different internal ratios available. Different rotation input and output.

Datos Principales Main Data	
Par máximo de entrada Maximum torque (Nm) Cont	940
Potencia máxima continua Max. power continuous	130 C.V. // 97 Kw
Peso en seco Weight (kg)	59
Capacidad Max. Nivel Aceite Max. Oil Level Capacity	2 L
Sentido de giro en entrada y salida Rotation input - output	Opuesto Opposite

Códigos y Combinaciones Part Numbers and Combinations						
Relación Ratio	1: 1.11	1: 1.20	1: 1.75	1: 1.90	1: 2.44	1: 2.92
Código Part Number	603799	601599	601399	604299	601499	604099

**Multiplicadora alta potencia** caja gearbox  
High power Gear Up Box

Alta potencia  
High power (Heavy Duty)



Notas Notes			
A	Desvaporizador	A	Oil vent
B	Tapones de llenado, vaciado y nivel de aceite	B	Oil charging, drain, and level plugs
C	Taladros de anclaje. (M14x2)	C	Fitting holes (M14x2)
D	Platos de transmisión	D	Flanges drive

Tipo de aceite: SAE 80W 90 Oil type: SAE 80W 90

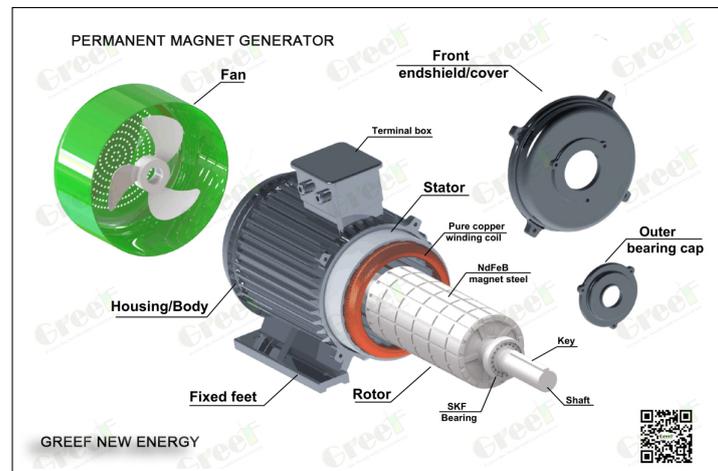
**Nota:** Se puede observar las características técnicas de la caja multiplicadora de dejes paralelos seleccionada (Bezares S.A., 2023).

### 6.2.2.7. Selección del generador eléctrico síncrono

El generador eléctrico que optamos por seleccionar es un generador síncrono de imanes permanentes de la marca Greef del modelo PMG el mismo que se muestra en la Figura 6.20.

**Figura 6.20**

*Esquema del generador síncrono de imanes permanentes.*



**Nota:** En la Figura se puede apreciar los componentes que conforman al generador síncrono de imanes permanentes escogido (GreefEnergy., 2023).

Los parámetros que se ha considerado para seleccionar el generador son los siguientes:

- Requerimos que arranque a bajas velocidades y el diseño mecánico debe ser resistente a la vibración y fuerza de torsión.
- Que sea acoplable directamente al sistema multiplicador de velocidades.
- Que tenga una alta resistencia al medioambiente corrosivo, en caso contrario construir una estructura que lo proteja de las precipitaciones.
- Que tenga una alta eficiencia y mínimas pérdidas de energía.
- Que tenga una excelente disipación del calor por su continuo funcionamiento.
- Que tenga una larga vida útil considerando los parámetros anteriores.

A continuación en la Figura 6.21 se aprecian los detalles del generador seleccionado. Se cumple la potencia y requerimos una caja reductora/multiplicadora de velocidades para adaptarlo a la rotación del eje de la turbina. Debido a que es un generador de baja potencia, es más fácil seleccionar una caja multiplicadora para la adaptación de la velocidad de rotación del eje de la turbina a la del generador.

**Figura 6.21**

*Características técnicas del generador síncrono.*

<b>Detalles rápidos</b>			
Lugar del origen:	Shandong, China	Marca:	GreeF
Número de Modelo:	PMG	Garantía:	3 años
Certificación:	ce	Modificado para requisitos particulares:	Sí
Energía tasada:	1.5kW	Type:	Wind Power Generator
Rated power:	1.5kW	Rated rotor speed:	100RPM
Generator type:	3 Phase AC Permanent-magnet	Generator material:	100% Copper wire+Nd-Fe-B
Portection grade:	IP 54	Bearing brand:	SKF
Wending Method:	Star/Y	Life time:	20 Years
Application:	Wind/Water Turbine		

**Nota:** Se observa los detalles generales del generador eléctrico (GreefEnergy., 2023).

### **6.2.3. Estudio presupuestario para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.**

En este apartado se realiza el estudio presupuestario de cada uno de los tres subsistemas que conforman la micro central hidroeléctrica, analizando el costo de los equipos, herramientas, materiales, transporte y mano de obra. Esto es necesario para poder asegurar la viabilidad económica del proyecto y así poder optimizarlo.

### 6.2.3.1. Costos unitarios de obra civil

En la siguiente Tabla 6.1 se puede apreciar una aproximación de los precios unitarios de cada elemento, material y equipo necesario para realizar la obra civil en donde será instalada la micro central hidroeléctrica.

**Tabla 6.1**

*Costos unitarios de la obra civil para instalación de la turbina de Arquímedes.*

PROYECTO: Microcentral con turbina de Arquímedes					
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
NOMBRE DEL OFERENTE:		John Farez			
PROYECTO:		Microcentral con turbina de Arquímedes			
ITEM:		1			
DESCRIPCION:		Obra Civil			
UNIDAD:		u			
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>					
DESCRIPCION	CANTIDAD A	TARIFA HORA B	RENDIMIENTO HORAS/U C	COSTO TOTAL D=A*B*C	
Herramienta menor (Taladro, brocas, llaves de boca, dados, etc)	3%MO			48.64	
Pala Excavadora	1	30.00	1	30.00	
Concreteira	1	2.00	40	80.00	
			<b>PARCIAL M</b>	<b>156.64</b>	
<b>MATERIALES</b>					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO/U B	COSTO TOTAL C=A*B	
Cemento Holcim Fuerte Tipo GU	qq	35	17.76	621.60	
Ripio (Piedra Homogeneizada)	m3	10	12.50	125.00	
Piedra Bola	m3	5	20.00	100.00	
Alambre de amarre	rollo	1	44.10	44.10	
Tablas de encofrado (Monte)	u	50	2.50	125.00	
Sika Impermeabilizante	galón	1	11.14	11.14	
Vanillas Anti-Sísmicas 10mm	u	12	1.08	12.96	
				0.00	
				0.00	
			<b>PARCIAL N</b>	<b>1039.80</b>	
<b>TRANSPORTE</b>					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA/U B	DISTANCIA C	COSTO TOTAL D=A*B*C
					0.00
					0.00
			<b>PARCIAL O</b>		<b>0.00</b>
<b>MANO DE OBRA</b>					
DESCRIPCION	CANTIDAD A	S.R.H. B	RENDIMIENTO HORAS/U C	COSTO TOTAL D=A*B*C	
Ayudante mecanico	1	3.22	180	515.20	
Ingeniero Mecanico	1	3.58	180	572.80	
Maestro albañil	1	1.04	180	186.72	
Ayudantes albañiles	3	0.83	180	300.00	
			<b>PARCIAL P</b>	<b>1554.72</b>	
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)</b>					
					<b>2751.16</b>
<b>INDIRECTOS Y UTILIDAD</b>				20.00%	<b>550.23</b>
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO</b>					
<b>VALOR PROPUESTO</b>					<b>3301.39</b>

### 6.2.3.2. Costos unitarios de sistema mecánico de la micro central hidroeléctrica

En la siguiente Tabla 6.2 se puede apreciar una aproximación de los precios unitarios de cada elemento, material y equipo necesario para realizar la turbina de Arquímedes junto a su soporte y los componentes de anclaje.

**Tabla 6.2**

*Costos unitarios del sistema mecánico.*

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS						
NOMBRE DEL OFERENTE:		John Farez				
PROYECTO:		Microcentral con turbina de Arquímedes				
ITEM:		2				
DESCRIPCION:		Sistema Mecánico				
UNIDAD:		u				
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>						
DESCRIPCION		CANTIDAD A	TARIFA HORA B	RENDIMIENTO HORAS/U C	COSTO TOTAL D=A*B*C	
Herramienta menor (Taladro, brocas, llaves de boca, dados, etc)		3%MO			32.64	
				PARCIAL M	32.64	
<b>MATERIALES</b>						
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO/U		COSTO TOTAL C=A*B	
Turbina hidráulica tipo tornillo de Arquímedes	u	1	10500.00		10500.00	
Soporte para la turbina	u	1	2350.00		2350.00	
Rodamientos 51220 SKF	u	2	390.88		781.72	
Pernos y Tuercas M16	u	20	6.50		130.00	
Pernos y Tuercas M30	u	14	8.50		119.00	
					0.00	
					0.00	
					0.00	
					0.00	
				PARCIAL N	13880.72	
<b>TRANSPORTE</b>						
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA/U B	DISTANCIA C	COSTO TOTAL D=A*B*C	
Camion Cuenca - Macas (Turbina)		1	350.00	1	350.00	
				PARCIAL O	350.00	
<b>MANO DE OBRA</b>						
DESCRIPCION		CANTIDAD A	S.R.H. B	RENDIMIENTO HORAS/U	COSTO TOTAL D=A*B*C	
Ayudante mecanico		1	3.22	160	515.20	
Ingeniero Mecanico		1	3.58	160	572.80	
					0.00	
				PARCIAL P	1088.00	
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)</b>						
					15351.36	
<b>INDIRECTOS Y UTILIDAD</b>					20.00%	3070.27
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO</b>						
<b>VALOR PROPUESTO</b>						18421.63

### 6.2.3.3. Costos unitarios de sistema eléctrico y de transmisión

En la siguiente Tabla 6.3 se puede apreciar una aproximación de los precios unitarios de cada elemento, material y equipo necesario para el sistema de generación que consta de la caja multiplicadora de velocidades para sincronizar la velocidad de rotación de la turbina al generador síncrono el cual nos va a generar la energía eléctrica.

**Tabla 6.3**

*Costos unitarios del sistema eléctrico y de transmisión.*

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
NOMBRE DEL OFERENTE:		John Farez			
PROYECTO:		Microcentral con turbina de Arquímedes			
ITEM:		3			
DESCRIPCION:		Sistema Eléctrico y de Transmisión			
UNIDAD:		u			
<b>EQUIPO Y HERRAMIENTA</b>					
DESCRIPCION		CANTIDAD A	TARIFA HORA B	RENDIMIENTO HORAS/U C	COSTO TOTAL D=A*B*C
Herramienta menor (Taladro, brocas, llaves de boca, dados,etc)		3%MO			32.64
				PARCIAL M	32.64
<b>MATERIALES</b>					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECI/U		COSTO TOTAL C=A*B
Caja Multiplicadora de Velocidades Bezares 601399	u	1	475.00		475.00
Generador Síncrono PMG Greef 1.5kW	u	1	369.00		369.00
Soporte para la caja y el generador	u	1	1130.00		1130.00
Pemos y tuercas M12	u	8	4.25		34.00
				PARCIAL N	2008.00
<b>TRANSPORTE</b>					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA/U B	DISTANCIA C	COSTO TOTAL D=A*B*C
Camion Gye - Macas (Generador y Caja de Velocidades)		1	500.00	1	500.00
				PARCIAL O	500.00
<b>MANO DE OBRA</b>					
DESCRIPCION		CANTIDAD A	S.R.H. B	RENDIMIENTO HORAS/U	COSTO TOTAL D=A*B*C
Ayudante mecanico		1	3.22	160	515.20
Ingeniero Mecanico		1	3.58	160	572.80
					0.00
				PARCIAL P	1088.00
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)</b>					
					3628.64
<b>INDIRECTOS Y UTILIDAD</b>				20.00%	725.73
<b>COSTO TOTAL DEL RUBRO</b>					
<b>VALOR PROPUESTO</b>					4354.37

## 7. Resultados

A partir de los cálculos realizados en la metodología del proceso, obtuvimos los datos requeridos para el diseño de la microcentral hidroeléctrica considerada. Se subdivide los resultados en dos secciones que corresponden a los parámetros iniciales necesarios para iniciar con el dimensionamiento de la micro central hidráulica y los parámetros principales y dimensiones de cada subsistema con sus respectivos elementos que los conforman.

### 7.1. Parámetros iniciales para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes

Mediante un levantamiento topográfico, cálculos del caudal y análisis de consumo eléctrico mensual, se obtuvieron los parámetros iniciales para el diseño de la micro central hidroeléctrica. En la Tabla 7.1 se especifica las variables, sus valores, las unidades en las que son medidas y sus nomenclaturas. También se puede observar que los valores son adecuados para el uso de una turbina tipo tornillo de Arquímedes, porque el salto se encuentra en el rango de 0 a 2m y el caudal supera los  $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ , cumpliendo con los requerimientos para el diseño propuesto

**Tabla 7.1**

*Parámetros iniciales para el diseño de la micro central hidroeléctrica.*

<b>Parámetros Iniciales</b>			
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Caudal	0.161	$\text{m}^3/\text{s}$	$Q_T$
Salto	1.5	m	$H$
Potencia	0.6105	kW	$P$

**Nota:** En la Tabla se puede apreciar los valores iniciales utilizados para el diseño de la turbina de Arquímedes.

### 7.2. Diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes

Tras los cálculos realizados se obtuvieron los parámetros para el diseño de la turbina tipo tornillo de Arquímedes, considerado en el estudio el elemento principal de la micro central

hidroeléctrica. Estos datos serían suficientes para tener una idea de como se va a construir e instalar la turbina en el sitio considerado para la instalación de la micro central hidroeléctrica. En la Tabla 7.2 se especifica las variables, sus valores, las unidades en las que son medidas y sus nomenclaturas.

**Tabla 7.2**

*Parámetros principales para el diseño de la turbina de Arquímedes.*

<b>Parámetros principales de la Turbina de Arquímedes</b>			
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Ángulo de inclinación de la turbina	25	Grados (°)	$\beta$
Número de hélices	3	N/A	$N$
Correlación de radios	0.5	N/A	$\rho_r$
Longitud roscada de la turbina	3000	mm	$L_R$
Longitud total de la turbina	3550	mm	$L_T$
Diámetro exterior	750	mm	$D_e$
Diámetro interior	375	mm	$D_i$
Paso del tornillo de Arquímedes	750	mm	$S$
Velocidad de rotación	60.571	rpm	$n_{max}$

**Nota:** Se puede observar los parámetros obtenidos tras realizar los cálculos para el dimensionado de la turbina de Arquímedes. Con estos parámetros es posible el diseño de la turbina de Arquímedes.

Los resultados de los cálculos realizados anteriormente para determinar las fuerzas y pérdidas mecánicas existentes son importantes para determinar las potencias y rendimientos que va a tener la turbina tipo tornillo de Arquímedes. En la Tabla 7.3 se especifica las variables, sus valores, las unidades en las que son medidas y sus nomenclaturas.

**Tabla 7.3**

*Parámetros mecánicos para el diseño de la turbina de Arquímedes.*

<b>Parámetros mecánicos de la Turbina de Arquímedes</b>			
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Fuerza de fricción en el canal	7.263	N	$F_c$
Fuerza de fricción en el núcleo	12.940	N	$F_n$
Par de frenado debido a la fricción en el núcleo del tornillo	2.426	Nm	$T_{fn}$
Par de frenado debido a la fricción en la superficie de las palas	20.306	Nm	$T_{fp}$
Par teórico suministrado por el tornillo	222.216	Nm	$T$
Torque total generado por el tornillo	199.484	Nm	$T_{total}$
Pérdida de potencia debido a la fuga entre el canal y las hélices	103.005	W	$P_f$
Pérdida de potencia debido a la fricción en la canaleta de contención	2.033	W	$P_{al}$
Pérdida de potencia debido a la fricción en el núcleo del tornillo	14.246	W	$P_{fn}$
Pérdida de potencia debido a la fricción en la superficie de las palas	128.800	W	$P_{fp}$
Potencia mecánica	1265.32	W	$P_{mec}$
Potencia hidráulica	2369.115	W	$P_{hid}$
Rendimiento Hidráulico	0.895	N/A	$\eta_{hid}$
Rendimiento Global	0.534	N/A	$\eta_{global}$

**Nota:** Se puede observar los valores del par de frenado debido a fricción los cuales afectan a la potencia mecánica generada. Por otra parte se observa las pérdidas de potencia debido a la fuga de agua en distintos sitios de la turbina, siendo estas las que afectan al rendimiento hidráulico.

En la siguiente Tabla 7.4 se observan los resultados de los cálculos realizados anteriormente para determinar las pérdidas hidráulicas y el nivel de agua en la entrada y salida de la turbina

tipo tornillo de Arquímedes utilizando las condiciones iniciales de diseño. En la siguiente tabla se especifica las variables, sus valores, las unidades en las que son medidas y sus nomenclaturas.

**Tabla 7.4**

*Parámetros hidráulicos para el diseño de la turbina de Arquímedes.*

<b>Parámetros hidráulicos de la Turbina de Arquímedes</b>			
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Caudal de fuga entre hélices y canaleta	0.007	m <sup>3</sup> /s	$Q_f$
Volumen de agua entre dos hélices	0.051	m <sup>3</sup>	$V_C$
Caudal nominal	0.154	m <sup>3</sup> /s	$Q_n$
Nivel de agua al ingreso	236	mm	$h_{in}$
Nivel de agua a la salida	381	mm	$h_{sal}$
Inmersión del tornillo	0.561	N/A	I

**Nota:** Se puede observar los valores de la fuga existente dentro del diseño de la turbina de Arquímedes. Estas fugas son causadas por una brecha entre la canaleta y la turbina. También esta determinado el nivel de agua en el ingreso y salida de la turbina.

En la Tabla 7.5 se aprecia los parámetros para el diseño de la canaleta de contención que va a sostener la turbina de Arquímedes evitando la fuga sin medida del caudal.

**Tabla 7.5**

*Parámetros principales para el diseño de la canaleta de contención.*

<b>Parámetros principales de la Canaleta de Contención</b>			
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Brecha entre hélices y canaleta	0.0039	m	$A_b$
Diámetros de la canaleta	0.7656	m	$D_{canaleta}$
Radio de la canaleta	0.3828	m	$R_{canaleta}$
Espesor de la canaleta	4	mm	$e_{canaleta}$

**Nota:** Se pueden observar las dimensiones necesarias para el diseño y construcción de la canaleta de contención sobre la cual estaría apoyado y anclado la turbina de Arquímedes.

En las Tablas 7.6 y 7.7 se aprecian los parámetros para el diseño del sistema de alimentación, las cuales se conforman del canal de entrada de agua para la turbina, el desarenador para la sedimentación de partículas y el canal de salida.

**Tabla 7.6**

*Parámetros principales para el diseño del canal de conducción.*

<b>Parámetros principales del Canal de Conducción</b>			
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Pendiente	0.019	N/A	* <i>Pendiente</i>
Caudal Hidráulico	0.161	m <sup>3</sup> /s	<i>Q<sub>hidráulico</sub></i>
Área del canal	0.107	m <sup>2</sup>	<i>A</i>
Perímetro	1.036	m	<i>P</i>
Tirante del agua	0.143	m	<i>d</i>
Base del canal	0.75	m	<i>b<sub>c</sub></i>
Borde libre	0.3	m	<i>B<sub>L</sub></i>
Altura del canal	0.45	m	<i>h<sub>c</sub></i>

**Nota:** Se pueden observar las dimensiones necesarias para el diseño y construcción del canal de conducción este siendo dividido en canal de entrada y canal de salida.

**Tabla 7.7**

*Parámetros principales para el diseño del desarenador.*

<b>Parámetros principales del Desarenador</b>			
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Diámetro de partículas	1	mm	<i>d<sub>p</sub></i>
Velocidad de sedimentación	0.108	m/s	<i>W<sub>sedimentación</sub></i>
Velocidad de escurrimiento	0.36	m/s	<i>V<sub>c</sub></i>
Altura del desarenador	0.6	m	<i>h<sub>d</sub></i>
Ancho del desarenador	0.745	m	<i>b<sub>d</sub></i>
Largo del desarenador	2	m	<i>L<sub>d</sub></i>
Tiempo de sedimentación	5.549	s	<i>T<sub>s</sub></i>
Volumen del Desarenador	0.9	m <sup>3</sup>	<i>V<sub>d</sub></i>
Velocidad de salida del fluido	0.358	m/s	<i>V<sub>s</sub></i>

**Nota:** Se pueden observar las dimensiones del desarenador necesario para sedimentar las partículas que pueden generar disturbios en el funcionamiento de la turbina. Este desarenador se lo debe considerar como parte del canal de entrada siendo la salida del desarenador la que se une con la turbina de Arquímedes.

En la Tabla 7.8 se aprecia los parámetros para el diseño de la rejilla para sólidos que evitará el paso de objetos flotantes muy grandes que puedan generar un disturbio en el

funcionamiento de la turbina.

**Tabla 7.8**

*Parámetros principales para el diseño de la rejilla para sólidos.*

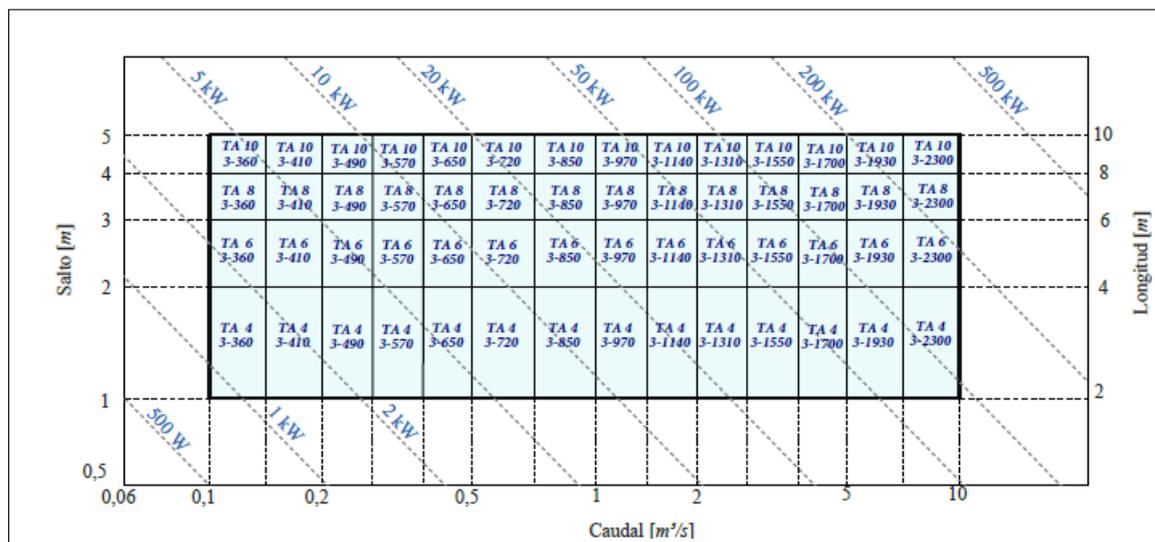
<b>Parámetros principales de la Rejilla para Sólidos</b>			
<b>Variable</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nomenclatura</b>
Número de barrotos	11	N/A	$N_{barrotos}$
Espesor de los barrotos	15	mm	$e_b$
Espesor total de los barrotos	165	mm	$e_{Tb}$
Separación entre cada barrote	47.08	mm	$S_b$

**Nota:** Se pueden observar las dimensiones de la rejilla de sólidos necesaria para evitar el paso de objetos flotantes que puedan afectar el flujo del caudal e interrumpir el funcionamiento de la turbina de Arquímedes.

A continuación, en la Figura 7.1 observamos una gráfica en donde se puede determinar el tipo de turbina de Arquímedes según el salto y el caudal.

**Figura 7.1**

*Estandarización de turbinas de Arquímedes.*



**Nota:** En la Figura se dividen los tipos de turbinas en 3 categorías; TA4, TA6, TA8 y TA10 dependiendo del salto y caudal del sitio de instalación de la central hidroeléctrica. Se puede determinar la turbina y validarla considerando la potencia necesaria para abastecer el consumo del complejo turístico (Benavides y Gordillo, 2022).

En la Figura 7.2, en cambio, se puede apreciar las distintas dimensiones de la turbina TA4 que corresponde a la turbina diseñada en este proyecto. Utilizando esta figura se compara los valores y dimensiones obtenidos mediante el cálculo y validar la turbina diseñada.

## Figura 7.2

*Parámetros estandarizados de Turbinas de Arquímedes.*

ELEMENTO	TURBINA	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4	TA4
		3-360	3-410	3-490	3-570	3-650	3-720	3-850	3-970	3-1140	3-1310	3-1550	3-1700	3-1930	3-2300
1. Caudal máximo, $Q(m^3/s)$		0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	1.5	2	3	4	5	7.5	10
2. Carga máxima de diseño, $H(m)$		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3. Potencia máxima, $P(kW)$		2.53	3.38	5.06	6.74	8.43	12.65	16.87	25.31	33.75	50.62	67.49	84.37	126.5	168.7
4. Velocidad máxima de rotación, $n(rpm)$		62.24	57.07	50.67	45.82	41.97	39.21	35.10	32.14	28.86	26.31	23.51	22.11	20.31	18.07
5. Torque producido por cada hélice, $T(N \cdot m)$		25.60	41.86	83.38	140.93	216.68	388.60	672.87	1262.5	2176.3	4125.6	7206.2	10495	19577	34584
6. Diámetro exterior de la hélice, $D_e(m)$		0.72	0.82	0.98	1.14	1.3	1.44	1.7	1.94	2.28	2.62	3.10	3.4	3.86	4.6
7. Diámetro del eje central, $D_i(m)$		0.36	0.41	0.49	0.57	0.65	0.72	0.85	0.97	1.14	1.31	1.55	1.7	1.93	2.3
8. Peso eje central, $W_{eje}(kg)$		120	137	163.7	190	217	321	379	540	636	877	1038	1328	2111	2822
9. Peso de las hélices, $W_h(kg)$		81	91	110	127	145	242	286	434	511	734	868	1143	2163	2836
10. Longitud, $L(m)$		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
11. Espesor de la Hélice, $e_h(mm)$		2	2	2	2	2	3	3	4	4	5	5	6	10	11
12. Espesor de la canaleta de retención, $E_c(mm)$		3	3	3	4	4	4	4	5	5	6	6	7	8	9
13. Espesor del eje central, $e_{eje}(mm)$		3	3	3	3	3	4	4	3	3	4	4	4	4	3
14. Diámetro del eje superior, $d_{ejes}(mm)$		42	47	56	62	70	81	91	109	124	146	168	185	215	250
15. Diámetro del eje inferior, $d_{ejei}(mm)$		42	47	56	62	70	81	91	109	124	146	168	185	215	250
16. Momento flector máximo, $M_{max}(N \cdot m)$		15.27	19.13	26.59	32.94	39.05	58.6	71.1	103.3	127.1	185.7	227.7	275.5	410.7	495.9
17. Momento torsor máximo, $M_t(N \cdot m)$		0.61	0.8	1.44	2.08	2.82	4.64	6.67	11.19	16.1	27.03	39.19	52.04	88.08	126.7

**Nota:** Se observan las dimensiones y parámetros estandarizadas de turbinas tipo tornillo de Arquímedes en la categoría TA4 (Benavides y Gordillo, 2022).

Dado que el caudal utilizado para el diseño de este proyecto no se encuentra exacta en la tabla de estandarización, sino entre dos tipos de turbinas, se compara con los datos de ambas, los cuales serían de la turbina de Arquímedes TA4 3-360 y la turbina TA4 3-410.

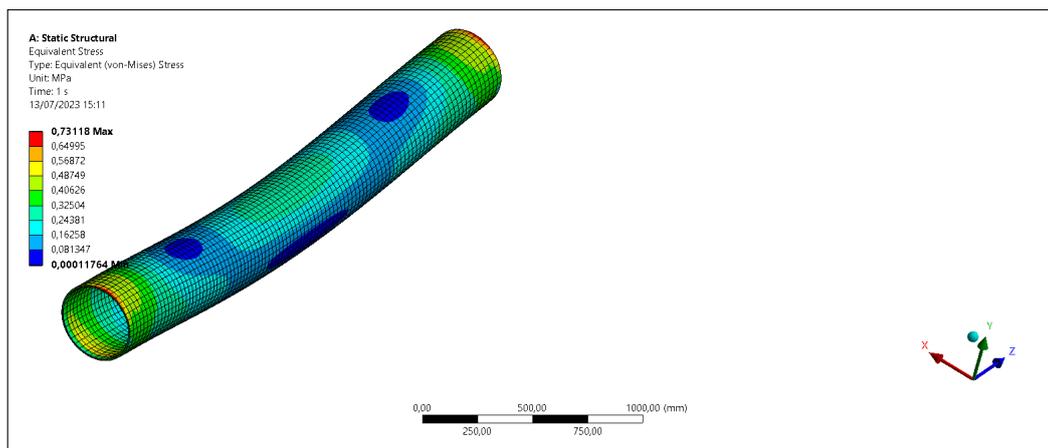
### 7.3. Resultados de la simulación del diseño mecánico e hidráulico de la turbina tipo Tornillo de Arquímedes en Software

Al utilizar el software de ingeniería "Solidworks" para diseñar el modelo de cada uno de los componentes calculados, se ha optado por simular sus esfuerzos y deformaciones en el software de ingeniería "Ansys" mediante el método de elementos finitos y realizando sus respectivos mallados para conseguir un resultado adecuado. Para la simulación se ha optado calcular el esfuerzo de Von - Mises que nos permitirá comparar con el esfuerzo máximo y ver la resistencia del componente respecto a las cargas.

En la Figura 7.3 se puede apreciar que se procede a hallar el esfuerzo de Von - Mises, obteniendo un esfuerzo máximo de 0.73118 MPa. El eje diseñado no tiene problemas con este esfuerzo y los únicos lugares con más concentración de esfuerzos son en los extremos y en el medio.

**Figura 7.3**

*Contornos de esfuerzos Von-Mises en el eje del tornillo de Arquímedes.*

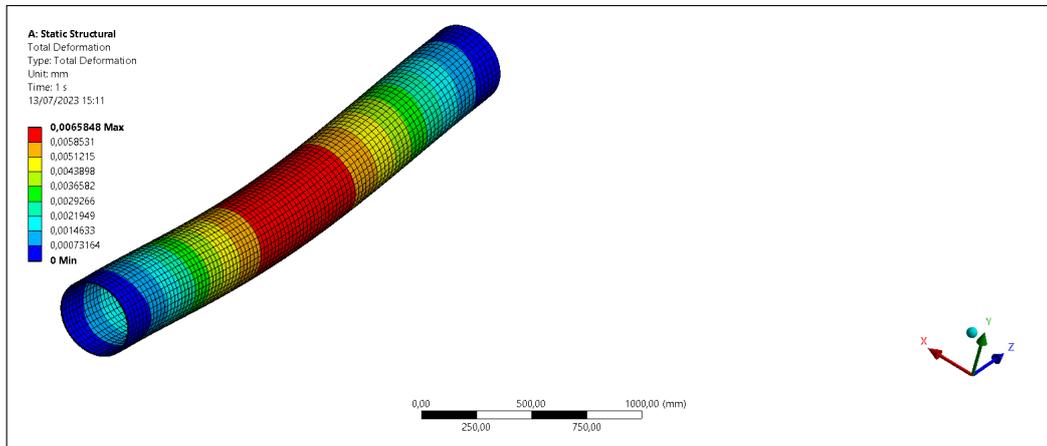


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de esfuerzos realizado en el eje central utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.4 se puede apreciar que existe una deformación máxima de 0.0065 mm en el centro del eje, el cual es algo mínimo. Este software *exagera* la deformación en la simulación para una mejor visualización.

**Figura 7.4**

*Contornos de deformación estructural en el eje del tornillo de Arquímedes.*

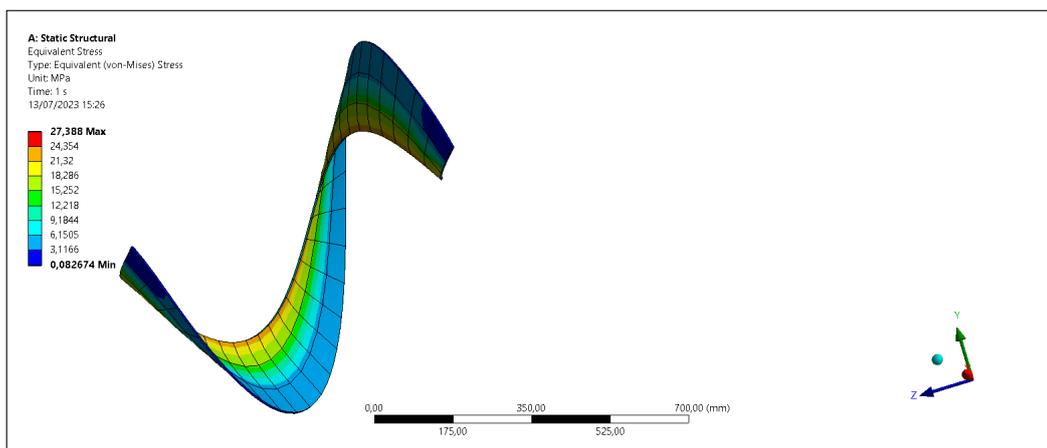


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de deformación realizado en el eje central utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.5 se puede apreciar que se procede a hallar el esfuerzo de Von - Mises, obteniendo un esfuerzo máximo de 27.388 MPa. La hélice diseñada no tiene problemas con este esfuerzo y el lugar con más concentración de esfuerzo es en la parte interior de la hélice en donde se soldará al eje central.

**Figura 7.5**

*Contornos de esfuerzos Von-Mises en las hélices del tornillo de Arquímedes.*



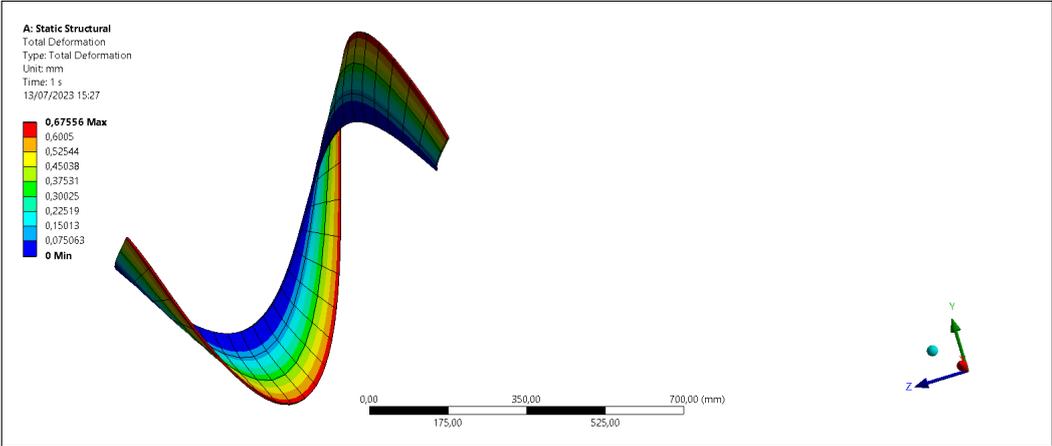
**Nota:** Se puede apreciar la simulación de esfuerzos realizado en las hélices utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.6 se puede apreciar que existe una deformación máxima de 0.675 mm en

la parte exterior de la hélice, el cual es algo mínimo. Este software *exagera* la deformación en la simulación para una mejor visualización.

**Figura 7.6**

*Contornos de deformación estructural en las hélices del tornillo de Arquímedes.*

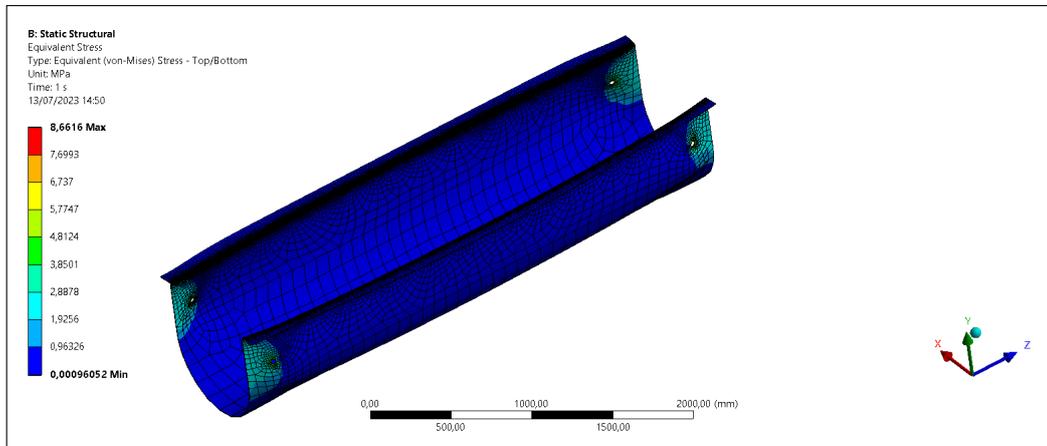


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de deformación realizado en las hélices utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.7 se puede apreciar que se procede a hallar el esfuerzo de Von - Mises, obteniendo un esfuerzo máximo de 8.6616 MPa. La canaleta de contención diseñada no tiene problemas con este esfuerzo y los lugares con más concentración de esfuerzos son en donde se encuentra empernado los soportes para las chumaceras.

**Figura 7.7**

*Contornos de esfuerzos Von-Mises en la canaleta de contención del tornillo de Arquímedes.*

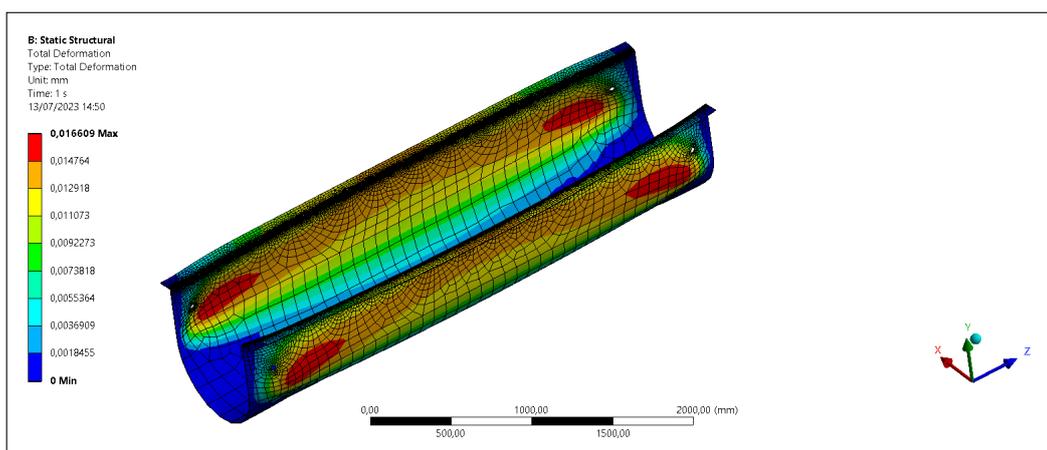


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de esfuerzos realizado en la canaleta de contención utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.8 se puede apreciar que existe una deformación máxima de 0.016 mm en la parte central de la canaleta de contención en donde estaría las hélices con agua entre las celdas, generando un peso. La deformación es mínima. Este software *exagera* la deformación en la simulación para una mejor visualización.

**Figura 7.8**

*Contornos de deformación estructural en la canaleta de contención del tornillo de Arquímedes.*



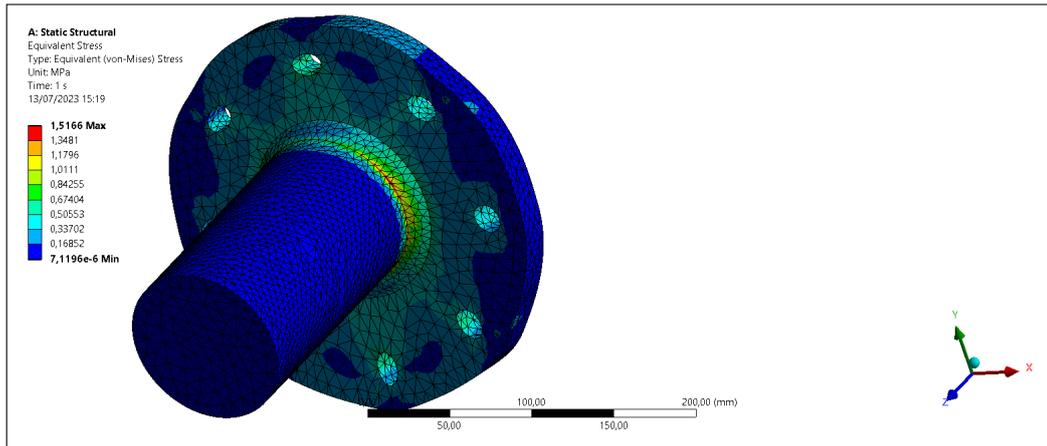
**Nota:** Se puede apreciar la simulación de deformación realizado en la canaleta de contención utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.9 se puede apreciar que se procede a hallar el esfuerzo de Von - Mises,

obteniendo un esfuerzo máximo de 1.5166 MPa. Los ejes laterales diseñados no tienen problemas con este esfuerzo y el lugar con más concentración de esfuerzos es en el ángulo en donde se une el eje con la tapa. También existe un cambio de color en los agujeros taladrados, pero son mínimos los esfuerzos existentes en esos lugares.

### Figura 7.9

*Contornos de esfuerzos Von-Mises en el eje lateral del tornillo de Arquímedes.*

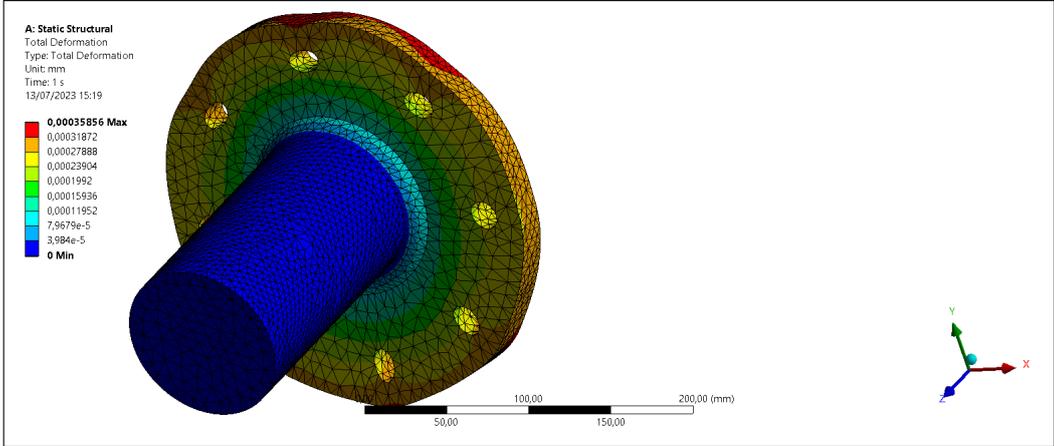


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de esfuerzos realizado en el eje lateral utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.10 se puede apreciar que existe una deformación máxima de 0.0003 mm en la parte trasera de los ejes laterales, en donde estas estarían ancladas con las tapas laterales. Este software *exagera* la deformación en la simulación para una mejor visualización.

**Figura 7.10**

*Contornos de deformación estructural en el eje lateral del tornillo de Arquímedes.*

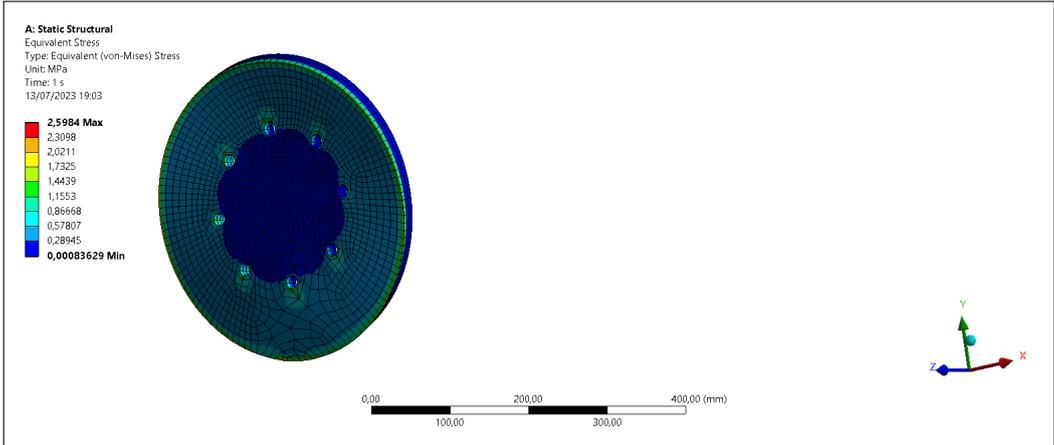


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de deformación realizado en el eje lateral utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.11 se puede apreciar que se procede a hallar el esfuerzo de Von - Mises, obteniendo un esfuerzo máximo de 2.5984 MPa. Las tapas laterales diseñadas no tienen problemas con este esfuerzo y el lugar con más concentración de esfuerzos es en la parte interior.

**Figura 7.11**

*Contornos de esfuerzos Von-Mises en las tapas laterales del tornillo de Arquímedes.*



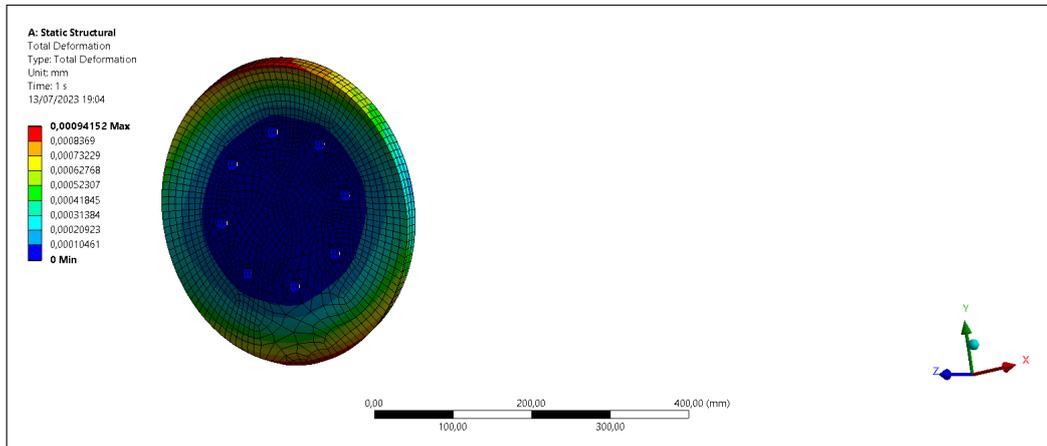
**Nota:** Se puede apreciar la simulación de esfuerzos realizado en las tapas laterales utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.12 se puede apreciar que existe una deformación máxima de 0.0009 mm en

la parte externa, en donde estas estarían soportando el peso del agua. Este software *exagera* la deformación en la simulación para una mejor visualización.

### Figura 7.12

*Contornos de deformación estructural en las tapas laterales del tornillo de Arquímedes.*

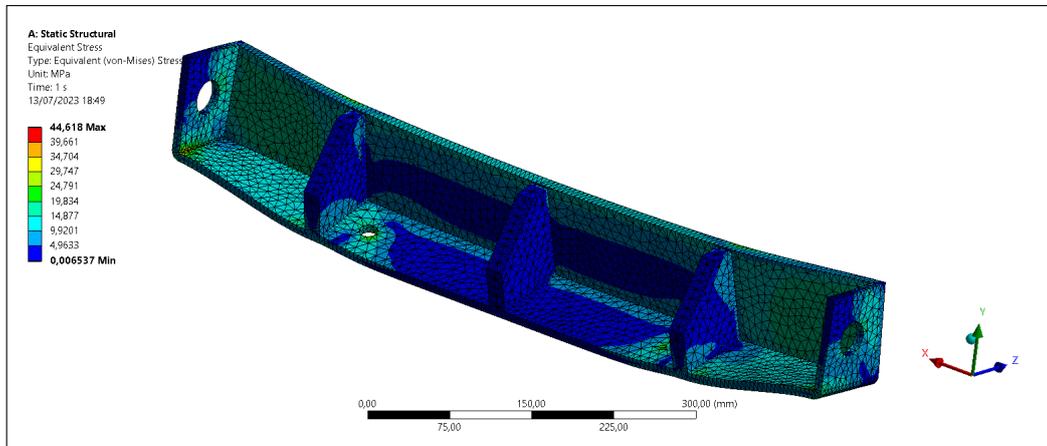


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de deformación realizado en las tapas laterales utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.13 se puede apreciar que se procede a hallar el esfuerzo de Von - Mises, obteniendo un esfuerzo máximo de 44.618 MPa. Los soportes para la chumacera deben soportar bastante carga y ha sido necesario realizar modificaciones añadiendo uniones y ángulos en medio del componente para que soporte sin problema las cargas ejercidas sobre el cuerpo. Los lugares con más concentración de esfuerzos son en los ángulos existentes en las partes externas en donde se ancla a la canaleta.

**Figura 7.13**

*Contornos de esfuerzos Von-Mises en el soporte para la chumacera del tornillo de Arquímedes.*

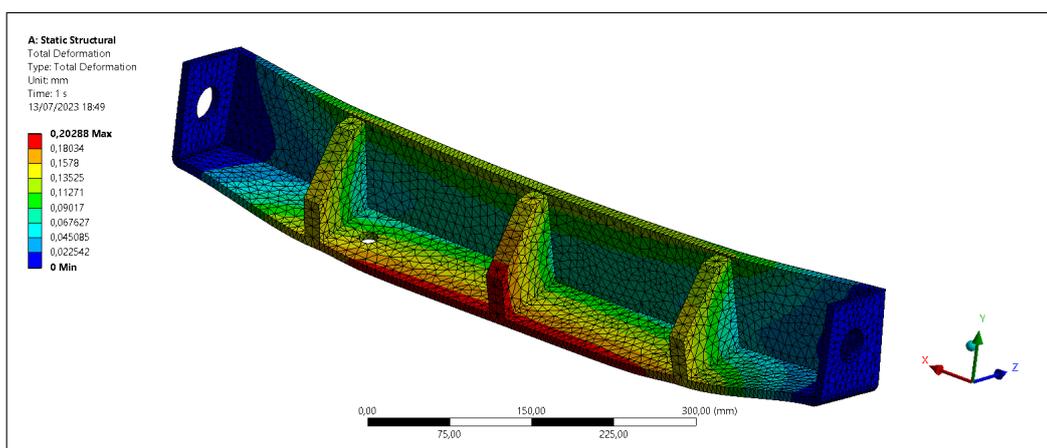


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de esfuerzos realizado en el soporte de la chumacera que sostendrá el eje central utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.14 se puede apreciar que existe una deformación máxima de 0.2028 mm en la parte central/frontal, en donde estas estarían soportando el peso de la chumacera, el rodamiento y la turbina en sí, debido a que el eje estaría dentro de la chumacera. Este software *exagera* la deformación en la simulación para una mejor visualización.

**Figura 7.14**

*Contornos de deformación estructural en el soporte para la chumacera del tornillo de Arquímedes.*



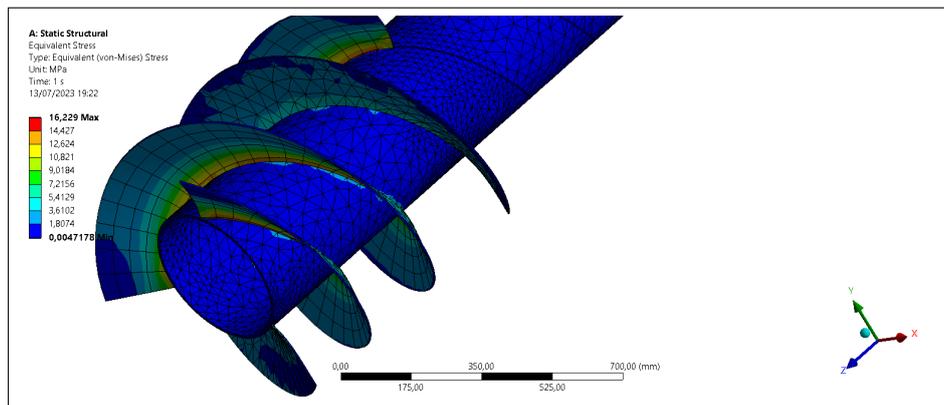
**Nota:** Se puede apreciar la simulación de deformación realizado en el soporte de la chumacera que sostendrá el eje central utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.15 se puede apreciar que se procede a hallar el esfuerzo de Von - Mises,

obteniendo un esfuerzo máximo de 16.229 MPa. Los lugares con más concentración de esfuerzos son en la unión de las hélices con el eje central. Esto se debe a que las hélices son soldadas con el eje y soportan el peso del agua.

**Figura 7.15**

*Contornos de esfuerzos Von-Mises en la turbina de Arquímedes.*

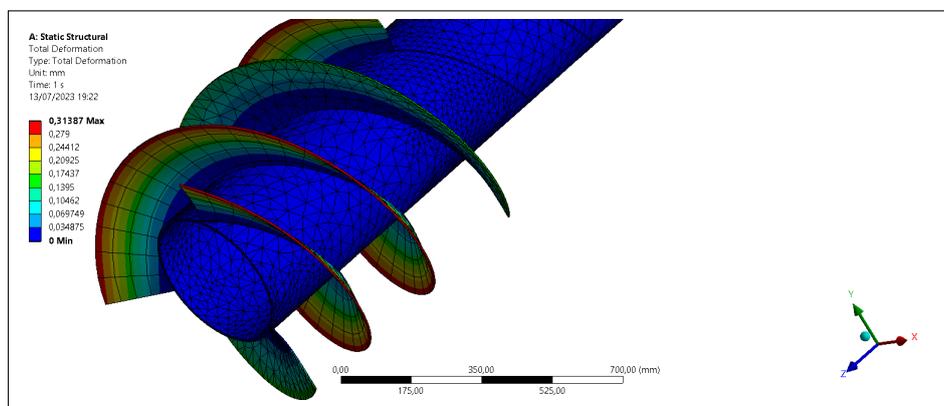


**Nota:** Se puede apreciar la simulación de esfuerzos realizado en la turbina de Arquímedes utilizando el software de ingeniería Ansys.

En la Figura 7.16 se puede apreciar que existe una deformación máxima de 0.31387 mm en las partes exteriores de las hélices, en donde estas estarían soportando el peso del fluido debido a la inclinación de la turbina. Este software *exagera* la deformación en la simulación para una mejor visualización.

**Figura 7.16**

*Contornos de deformación estructural de la turbina de Arquímedes.*



**Nota:** Se puede apreciar la simulación de deformación realizado en la turbina de Arquímedes utilizando el software de ingeniería Ansys.

## 7.4. Costos totales del sistema

En la siguiente Tabla 7.9 se puede apreciar una aproximación de los precios totales para la implementación de la micro central hidroeléctrica con turbina tipo tornillo de Arquímedes. Estos costos son la suma de los costos unitarios calculados en las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3.

**Tabla 7.9**

*Costos totales de la micro central hidroeléctrica.*

<b>ANÁLISIS DE COSTOS TOTALES</b>					
<b>PROYECTO: Microcentral con turbina de Arquímedes</b>					
Fecha:					
N°	Descripción	Unid.	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1	Obra Civil	u	1	3301.39	3301.39
2	Sistema Mecánico	u	1	18421.63	18421.63
3	Caja Multiplicadora de Velocidades Bezares 601399	u	1	4354.37	4354.37
<b>TOTAL</b>					<b>26077.39</b>
<b>Son:</b>					
.....					
<b>Responsable:</b> .....					

**Nota:** Se observa los precios totales de todo el sistema de la micro central hidráulica.

## 8. Conclusiones

- El diseño mecánico e hidráulico se basaron gracias a los parámetros iniciales, especialmente al caudal de  $0.161 \text{ m}^3/\text{s}$ , siendo este el que permitió el dimensionamiento de la turbina. El salto de  $1.5 \text{ m}$  hizo posible determinar el ángulo de inclinación de la turbina de Arquímedes, que es de  $25^\circ$ . La potencia requerida para abastecer el complejo turístico es de  $0.6105 \text{ kW}$  y la turbina genera  $1.2 \text{ kW}$ , siendo suficiente para el suministro del complejo. Al existir una generación de sobra para el complejo, se optó por venderlo a la red eléctrica nacional y luego canjearlo por la energía eléctrica consumida por el complejo turístico.
- Al realizar el diseño mecánico e hidráulico de la micro central de tornillo de Arquímedes, estamos representando un paso esencial en el desarrollo y aplicación de esta innovadora tecnología de micro generación con el uso de un tornillo sin fin. A la turbina se la diseñó con triple hélice para ayudar a la rotación. Gracias al centro de gravedad que existe al optar por tres hilos, el peso de las hélices va a ser la misma que ayude a rotar junto al peso del agua. El rendimiento hidráulico es de  $89\%$  siendo este un valor positivo para una turbina hidráulica. Las pérdidas de potencia por fuga y por fricción se han minimizado gracias a las ecuaciones y los cálculos realizados.
- Para el diseño del canal de conducción se consideró dimensionarlo en función del caudal de diseño. En el canal de entrada es necesario detener los objetos flotantes que puedan perturbar el funcionamiento de la micro central, por lo que se diseñó una rejilla para los sólidos en la entrada del caudal. Esta rejilla consta de 11 barrotes con una separación entre cada uno de  $47 \text{ mm}$  siendo suficiente para detener objetos mayores de  $5 \text{ cm}$  los cuales generaría problemas a la hora que la turbina rote. También se implementó un desarenador en el canal de entrada para poder sedimentar partículas de hasta  $1 \text{ mm}$ . El desarenador no tiene diferencia de ancho respecto al canal pero si una diferencia de altura.
- Se validó el dimensionamiento de la turbina tipo tornillo de Arquímedes comparando los valores con los de una tabla estandarizada y se comprobó que coinciden las dimensiones respecto a los parámetros iniciales. Al ser un caudal de  $0.161 \text{ m}^3/\text{s}$ , este valor no existe en la tabla por lo que se ha considerado caudales de  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  y de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  para la comparación.

- Tras realizar un estudio presupuestario con los costos asociados con el diseño, construcción, instalación y obtención de cada componente que conforma la micro central hidráulica, se llegó a estimar un valor de \$26,077.39, asegurando la viabilidad económica y evitando posibles desviaciones presupuestarias.
- Realizar un estudio presupuestario en este proyecto nos permitirá optimizar los gastos y maximizar el retorno de inversión, asegurando la rentabilidad a largo plazo. Esto podría llamar la atención de inversionistas que quieran aportar con el financiamiento para la realización del proyecto, impulsando el desarrollo de la generación de energía renovable.

## 9. Recomendaciones

- Por otro lado, se recomendaría realizar una evaluación detallada de los posibles impactos ambientales que posiblemente se ha descartado o pasado por alto y así minimizarlos.
- Se sugiere involucrar a la sociedad a participar en estas tecnologías de generación de energía renovable para la mitigación del cambio climático. Así mismo, indagar sobre lugares o sectores en los cuales se podría aprovechar los recursos hídricos para la aplicación de este sistema de generación.
- Buscar maneras de obtener los permisos y autorizaciones necesarias para iniciar la construcción del presente proyecto sin una posible sanción o retraso.
- Proporcionar una capacitación a los posibles trabajadores y operadores del proyecto para asegurar un correcto manejo y mantenimiento de la micro central hidráulica y los componentes que lo conforman.
- Indagar lugares comerciales más económicos para adquirir los materiales, piezas y componentes de cada subsistema.
- Realizar evaluaciones periódicas del desempeño de la micro central hidráulica y la turbina de Arquímedes para hallar oportunidades de optimización en la eficiencia de las mismas.
- Divulgar información sobre los beneficios y oportunidades que brinda el proyecto a la comunidad, promoviendo la concientización sobre la importancia de aplicar estas tecnologías en el país.

## Referencias Bibliográficas

- Aguilar, E., y Aprile, J. (2022). *Generadores síncronos*. [Recuperado de: [https:// www. monografias. com/ trabajos 82/ generadores -sincronos/ generadores -sincronos](https://www.monografias.com/trabajos82/generadores-sincronos/generadores-sincronos); Accedido el: 14 de junio del 2023].
- Aguilar, J. (2022). *Diseño de rejillas de desbaste ptap ptar*. [Recuperado de: [https:// www .youtube .com/ watch ?v= ILOGskIz \\_AQ &t= 1115s](https://www.youtube.com/watch?v=ILOGskIz_AQ&t=1115s); Accedido el : 12 de mayo del 2023].
- Alvarez, I., Ávalos, S., y Cruz, V. (2018). *Maquinas elÉctricas - principio de funcionamiento. clasificaciÓn. partes que lo conforman*. [Recuperado de: [http:// maquinas electricasg3. blogspot. com/p /clasificacion. html](http://maquinaselectricasg3.blogspot.com/p/clasificacion.html); Accedido el: 14 de junio del 2023].
- Barragan, R., y Llanos, E. (2020). *La generaciÓn de energÍa elÉctrica para el desarrollo industrial en el ecuador a partir del uso de las energÍas renovables*. [Recuperado de: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/364/759>; Accedido el: 18 de abril del 2023].
- Benavides, J., y Gordillo, J. (2022). *Propuesta de un manual de diseño, estandarización y fabricación de turbinas tipo tornillo de arquímedes para pequeñas centrales hidroeléctricas*. [Recuperado de: [https:// virtualtour .ups. edu. ec/o/ PDF-Graduado -Grado/ UPS-Datos Graduado-2 36204 -EN- benavides \\_ortiz \\_jonnathan \\_bolivar. pdf](https://virtualtour.ups.edu.ec/o/PDF-Graduado-Grado/UPS-Datos-Graduado-2-36204-EN-benavides_ortiz_jonnathan_bolivar.pdf); Accedido el: 09 de mayo del 2023].
- Bezares S.A. (2023). *Reductor multiplicador de engranaje helicoidal 603799*. [Recuperado de: <https://www.directindustry.es/prod/bezares-sa/product-11598-1243085.html>: 20 de junio del 2023].
- Blázquez, F. (2007). *Canales. generalidades. obras y elementos*. [Recuperado de: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/77679/canales-generalidades-obras-y-elementos>: 20 de junio del 2023].
- Castro, A. (2006). *Minicentrales hidroeléctricas*. [Recuperado de: [https:// www. idae. es/ uploads /documentos/ documentos \\_2.1.7 \\_Minicentrales \\_hidroelectricas \\_125f6 cd9. pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Minicentrales_hidroelectricas_125f6cd9.pdf) : 15 de marzo del 2023].
- Centrosur. (2023). *Planilla de luz del complejo turístico huachito*. [Recuperado de: <https://www.centrosur.gob.ec/consulta-planillas/>: 20 de junio del 2023].
- ComercialMendez. (2020). *Las diferencias entre generadores asíncronos y generadores síncronos*. [Recuperado de: <https://comercialmendez.es/es/blog/noticias/-las-diferencias-entre-generadores-asincronos-y-generadores-sincronos>: 14 de junio del 2023].

- Compañía Levantina de Reductores. (2017). *Consejos en el diseño de una caja reductora de velocidad*. [Recuperado de: [https://Clr.Es/Blog/Es/Consejos -Caja- Reductora -Velocidad/](https://Clr.Es/Blog/Es/Consejos-Caja-Reductora-Velocidad/); Accedido el: 6 de marzo del 2023].
- Correa, F., Gonzalez, D., y Pacheco, J. (2016). *Energías renovables y medio ambiente. su regulación jurídica en Ecuador*. [Recuperado de: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=s2218-36202016000300024](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s2218-36202016000300024); Accedido el: 18 de abril del 2023].
- Dragomirescu, A. (2021). *Design considerations for an archimedean screw hydro turbine*. [Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/664/1/012034/pdf>; Accedido el: 20 de junio del 2023].
- Espinosa, C., Jégat, H., DeLeón, A., y Ramírez, S. (2021). *Guía metodológica para elaborar proyectos de minicentrales hidroeléctricas*. [Recuperado de: [https://acading.org/wp-content/uploads/2023/02/libro\\_guia\\_metodologica\\_para\\_elaborar\\_proyectos\\_de\\_minicentrales\\_hidroelectricas\\_mch\\_espinosa\\_y\\_colaboradores.pdf](https://acading.org/wp-content/uploads/2023/02/libro_guia_metodologica_para_elaborar_proyectos_de_minicentrales_hidroelectricas_mch_espinosa_y_colaboradores.pdf); Accedido el: 25 de abril del 2023].
- Fernandez, C., León, A., y Martínez, P. (2018). *Influencia del método de estimación en el coeficiente de manning para cauces naturales*. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 39(1), 17-31.
- Fernández, P. (2015). *Turbinas hidráulicas*. [Recuperado de: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34923076/turbinas-hidraulicas-libre.pdf?1411986553>; Accedido el: 25 de abril del 2023].
- Fundación Descubre. (2023). *¿qué son las minicentrales hidroeléctricas?* [Recuperado de: <https://descubre.la.energia.fundaciondescubre.es/>; Accedido el: 18 de abril del 2023].
- Google Maps. (2023). *Ubicación del complejo turístico huachito*. [Recuperado de: <https://www.google.com/maps/place/Dique+de+Huachito/@-2.2362835,-78.1417616,15.19z/data=!4m6!3m5!1s0x91d21038d8433d1f:07>; Accedido el: 07 de agosto del 2023].
- GoToYard. (2023). *Criterios de selección para un generador eléctrico*. [Recuperado de: <https://gotoyard.com/criterios-de-seleccion-para-un-generador-electrico/>; Accedido el: 6 de marzo del 2023].
- GreefEnergy. (2023). *1.5kw 100rpm imán permanente generador o hydro de turbina*. [Recuperado de: <https://spanish.alibaba.com/p-detail/1.5kW-60678981505.html>; Accedido el: 20 de junio del 2023].
- GSL Industrias. (2021). *Generador eléctrico*. [Recuperado de: <https://industriasgsl.com/Blogs/Automatizacion/Generador-Electrico>; Accedido el: 6 de marzo del 2023].
- Jnablog. (2019). *¿cuáles son las propiedades del acero inoxidable 316 y 316l?*. [Recuperado de: <https://jnaceros.com.pe/blog/propiedades-acero-inoxidable-316-316l/>; Accedido el: 20 de junio del 2023].
- Joaquin. (2021). *Tres formas diferentes de hacer el reparto de barrotos o espacios sin morir en el intento*. [Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=A89P7QekMgQ> :

- 12 de mayo del 2023].
- Landustrie. (2023). *Landustrie: Water technology*. [Recuperado de: <https://landustrie.nl/es/productos/hidroenergia/hidrotornillos/>; Accedido el: 25 de abril del 2023].
- Lyons, M. (2014). *Lab testing and modeling of archimedes screw turbines*. [Recuperado de: [https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-OGU-8647op=pdf/app=/Library/oclc\\_number=1033224946](https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-OGU-8647op=pdf/app=/Library/oclc_number=1033224946) : 20 de junio del 2023].
- Mejia, J. (2011). *Diseño de una turbina hidráulica basada en el tornillo de arquímedes*. [Recuperado de: [https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1788/1/dise%C3%91O\\_de\\_una\\_turbina\\_hidr%C3%81ulica\\_basada\\_en\\_el\\_tornillo\\_de\\_arqu%C3%8dmedes.pdf](https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1788/1/dise%C3%91O_de_una_turbina_hidr%C3%81ulica_basada_en_el_tornillo_de_arqu%C3%8dmedes.pdf); Accedido el: 25 de abril del 2023].
- ONU. (2023). *Acción por el clima*. [Recuperado de: <https://www.un.org/es/climatechange/>; Accedido el: 18 de abril del 2023].
- Roca, R. (2021). *Físicos de stanford encuentran un nuevo estado de la materia en un gas cuántico gracias a una novedosa versión del tornillo de arquímedes*. [Recuperado de: <https://elperiodico.de.la.energia.com/tag/tornillo-de-arquimedes/>; Accedido el: 25 de abril del 2023].
- Roydisa. (2017). *Elementos principales a la hora de elegir reductores mecánicos*. [Recuperado de: <https://Www.Roydisa.Es/Archivos/3356>; Accedido el: 6 de marzo del 2023].
- Ruíz, P. R. (2008). *Hidráulica de canales*. [Recuperado de: <https://civilgeeks.com/>: 11 de mayo del 2023].
- Santa Cruz Herrera, J. E. (2018). *Análisis energético de un tornillo de arquímedes para canales de riego con una caída de 2m y caudal de 2m<sup>3</sup> /s*. Energías, Pontificia Universidad Católica Del Perú.
- Schwizer, J. (2018). *Map of hydro turbines*. [Recuperado de: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kennfeld\\_Wasserturbinen.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kennfeld_Wasserturbinen.svg); Accedido el: 25 de abril del 2023].
- Sierra, F., Sierra, A., y Guerrero, C. (2011). *Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica*. [Recuperado de: [https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf\\_tec/article/view/22/27](https://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/22/27); Accedido el: 24 de abril del 2023].
- Sinfin Energy. (2019). *Hidrotornillo*. [Recuperado de: <https://Www.Sinfinenergy.Com/Hidrotornillo/>: 6 de marzo del 2023].
- SKF. (2023). *Rodamiento axial de bolas 51220*. [Recuperado de: <https://www.skf.com/co/products/rolling-bearings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/productid-51220>: 20 de junio del 2023].
- SoporteDeveloper. (2020). *Funcionamiento de las cajas reductoras*. [Recuperado de: <https://Inducom-Ec.Com/Cajas-Reductoras/>: 6 de marzo del 2023].
- Sparrow, E. (2008). *El desarenador*. [Recuperado de: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56789886/trabajo\\_de\\_desarenador1\\_tmp4a134267-libre.pdf?1528907609](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56789886/trabajo_de_desarenador1_tmp4a134267-libre.pdf?1528907609); Accedido el: 12 de mayo del 2023].
- Vergara, J., y Collao, J. (2020). *Diseño central hidroeléctrica - diseño desarenador*. [Re-

cuperado de:<https://www.youtube.com/watch?v=bjgMYsuTSqw> : 12 de mayo del 2023].

Vite, T. (2014). *Principio de arquímedes*. Vida Científica, 2(3).

Zevallos Anchahua, A. C. (2011). *Dimensionamiento del canal de derivación*. [Recuperado de: [https:// Es.Scribd. Com/Document/ 515324041/ 3-Dimensionamiento -del-canal -de-derivación](https://Es.Scribd.Com/Document/515324041/3-Dimensionamiento-del-canal-de-derivacion). : 6 de marzo del 2023].

# **ANEXOS**

## Anexo 1: Matriz de Consistencia Lógica

**Tabla 9.1**

*Matriz de consistencia.*

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Será factible diseñar una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Morona?	Diseñar una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Morona.	Se diseñará una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Morona.	- <b>VI</b> : Parámetros. - <b>VD</b> : Diseño.	Diseño mecánico e hidráulico Microcentral Hidroeléctrica de Turbina de Arquímedes
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Será factible determinar los datos de partida para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes?	Determinar los datos de partida para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.	Los datos de partida determinarán el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.	- <b>VI</b> : Parámetros. - <b>VD</b> : Diseño.	Micro Central Hidroeléctrica
¿Es posible realizar el diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes?	Realizar el diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.	Se realizará el diseño mecánico e hidráulico de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.	- <b>VI</b> : Parámetros. - <b>VD</b> : Calidad.	Diseño Mecánico e Hidráulico
¿Se podrá elaborar un estudio presupuestario para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes?	Elaborar un estudio presupuestario para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.	Se elaborará un estudio presupuestario para el diseño de la micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes.	- <b>VI</b> : Parámetros. - <b>VD</b> : Calidad.	Estudio Presupuestario

**Nota:** La matriz de consistencia presentada facilita identificar la relación que existe entre las variables y los objetivos además de como se relaciona con el marco teórico referencial.

## Anexo 2: Propuesta de diseño de la micro central hidroeléctrica tipo tornillo de Arquímedes



A6  
105x148

A5  
148x210

A4  
210x297

A3  
297x420

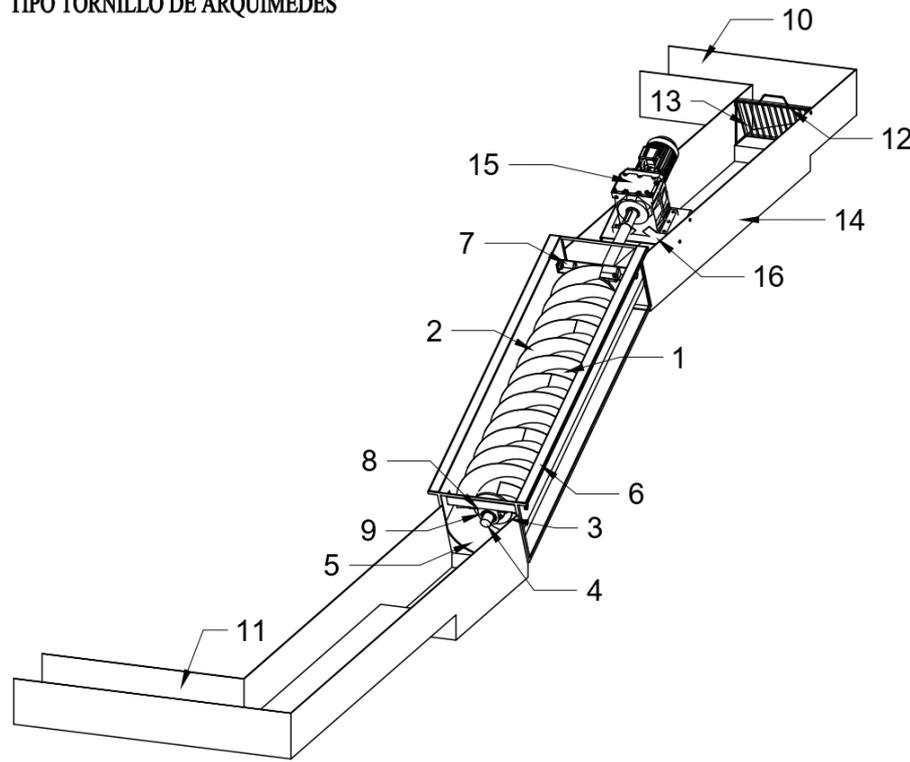
A2  
420x594

A1  
594x841

A0  
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica

### MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES



8	Chumacera	16	Soporte para motorreductor
7	Perfil para la chumacera	15	Motorreductor
6	Soporte para la turbina	14	Desarenador
5	Canaleta de contención	13	Rejilla para sólidos
4	Ejes laterales	12	Perfil para la rejilla
3	Tapas laterales	11	Canal de salida
2	Hélice	10	Canal de entrada
1	Tubo central	9	Rodamiento SKF 51220

VIII CICLO	Fecha	Nombre	 <b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b> SEDE MATRIZ CUENCA  INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecánica		
Dibujado:	08/08/23	John Farez			
Comprobado:	08/08/23	Ing. Fran Reinoso			
<b>Dibujo Industrial</b>			<b>Conjunto: Micro Central Hidroeléctrica con turbina tipo tornillo de Arquímedes</b>		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Escala: 1:1</td> <td style="width: 50%;">Tol. gen.: ISO</td> </tr> </table>	Escala: 1:1	Tol. gen.: ISO	<b>MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA</b>		
Escala: 1:1	Tol. gen.: ISO				
Lámina:	1				

### **Anexo 3: Planos constructivos con vista superior y lateral de la micro central hidroeléctrica**



# MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA CON TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES

A6  
105x148

A5  
148x210

A4  
210x297

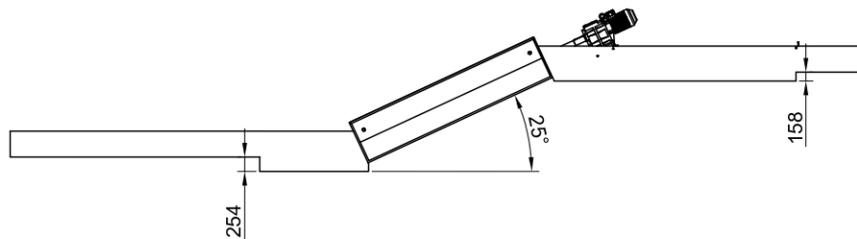
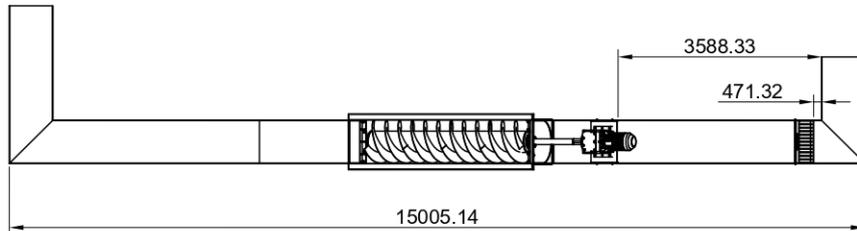
A3  
297x420

A2  
420x594

A1  
594x841

A0  
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica



Unidades en milímetros

VIII CICLO	Fecha	Nombre	<p><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b> SEDE MATRIZ CUENCA</p>
Dibujado:	08/08/23	John Farez	
Comprobado:	08/08/23	Ing. Fran Reinoso	
Dibujo Industrial			<p><b>INGENIERÍAS</b> Carrera de Ingeniería Mecánica</p>
Escala:	Tol. gen.:	Conjunto: Micro Central Hidroeléctrica con turbina tipo tornillo de Arquímedes	
1:1	ISO	<p><b>MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA</b></p>	
Lámina:	2		

## Anexo 4: Planos constructivos de la turbina de Arquímedes



A6  
105x148

A5  
148x210

A4  
210x297

A3  
297x420

A2  
420x594

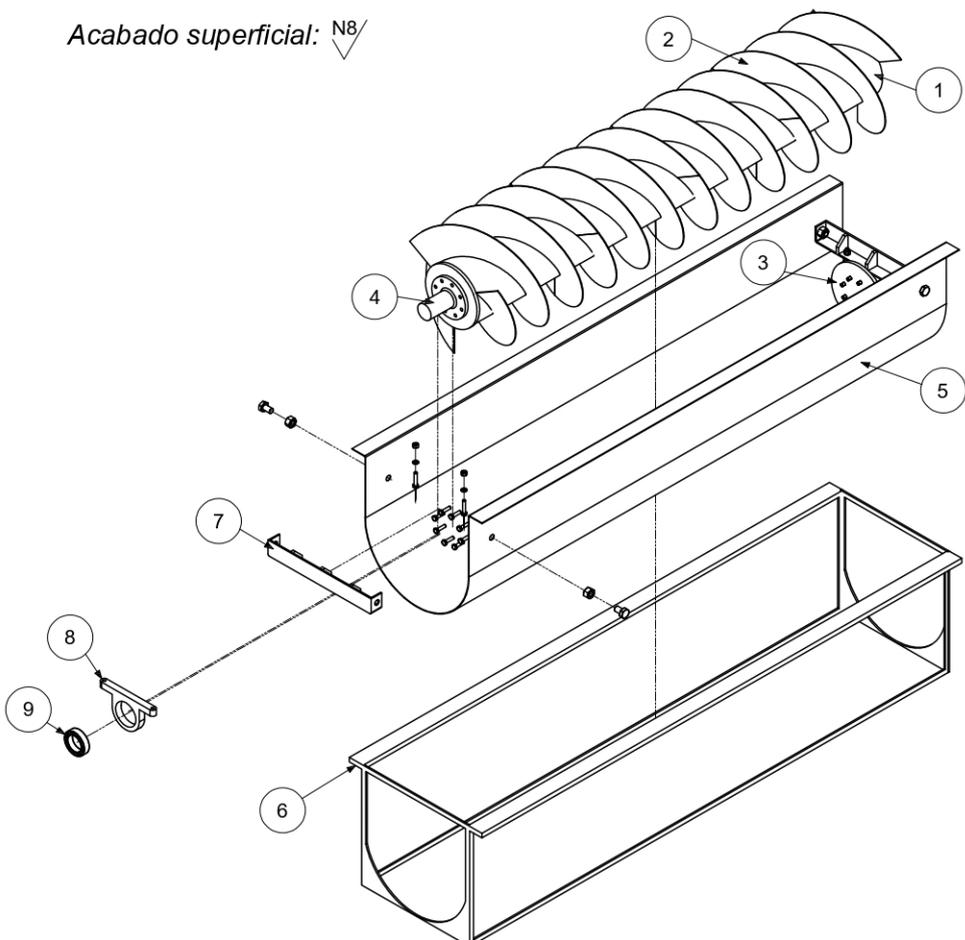
A1  
594x841

A0  
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica

### TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES

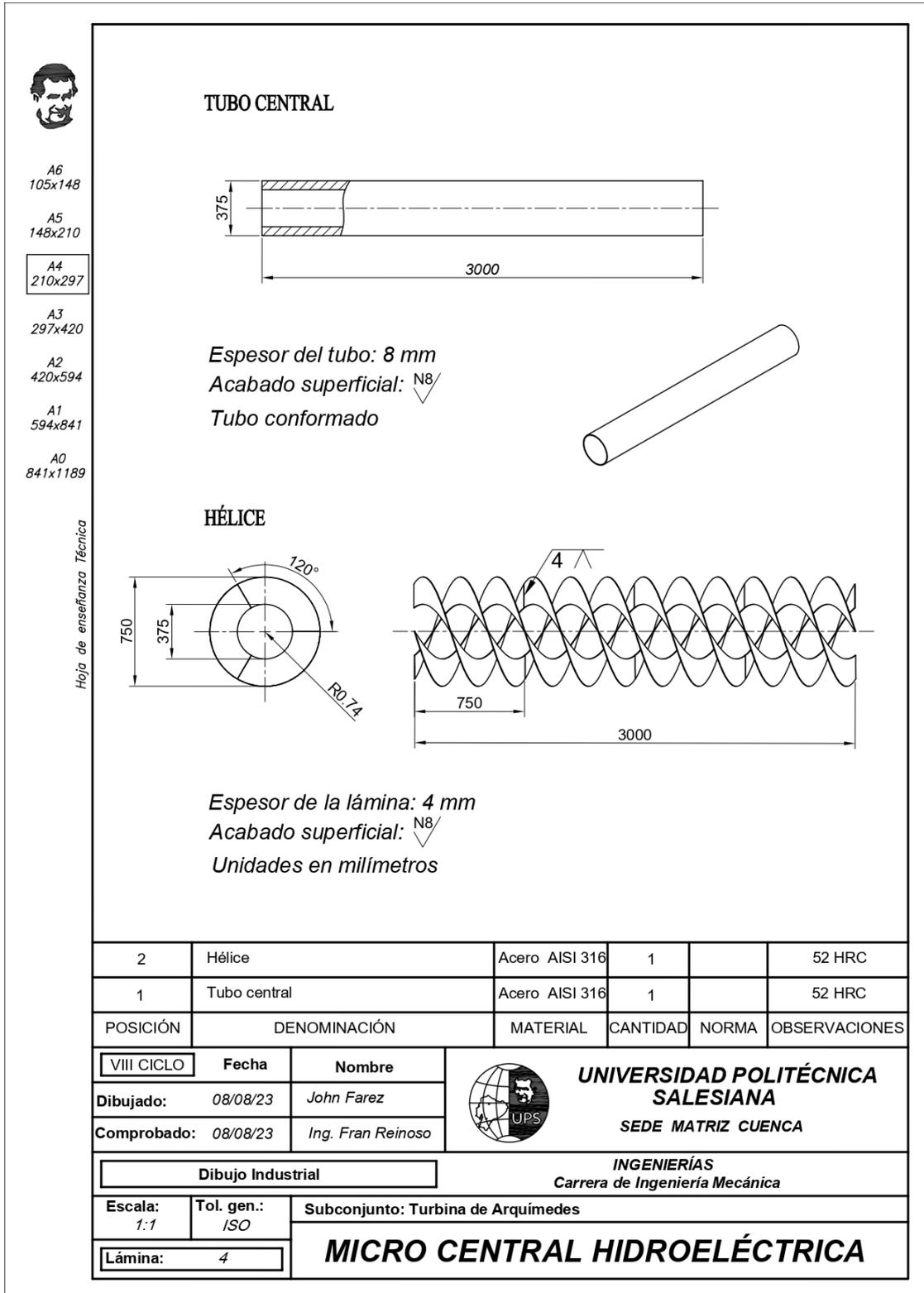
Acabado superficial:  $\nabla N8$



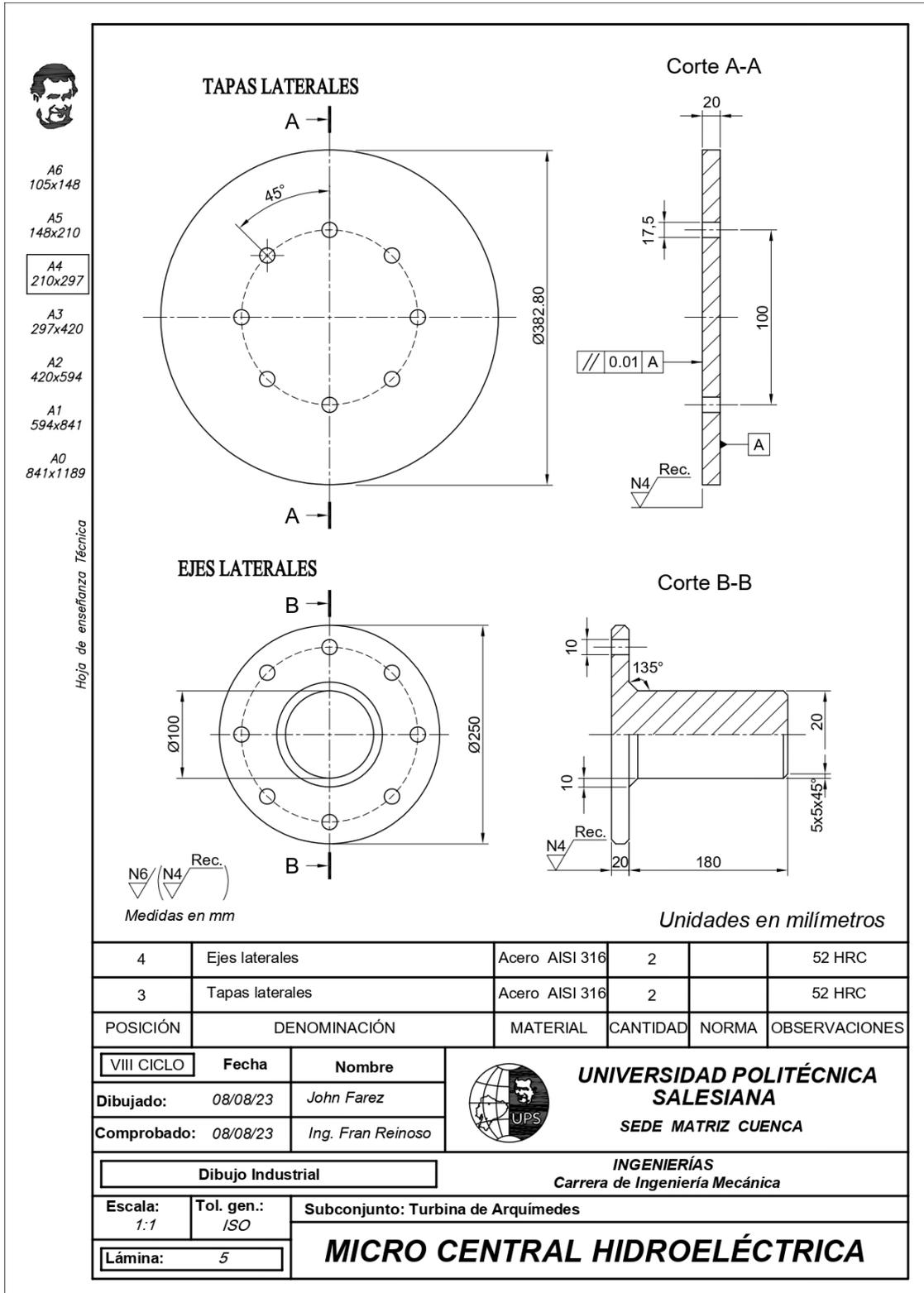
5	Canaleta de contención		
4	Ejes laterales	9	Rodamiento SKF 51220
3	Tapas laterales	8	Chumacera
2	Hélice	7	Perfil para la chumacera
1	Tubo central	6	Soporte para la turbina

VIII CICLO	Fecha	Nombre	
Dibujado:	08/08/23	John Farez	 <p><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b> SEDE MATRIZ CUENCA</p> <p><b>INGENIERÍAS</b> Carrera de Ingeniería Mecánica</p>
Comprobado:	08/08/23	Ing. Fran Reinoso	
Dibujo Industrial			
Escala:	Tol. gen.:	Subconjunto: Turbina de Arquímedes	
1:1	ISO		
Lámina:	3	<b>MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA</b>	

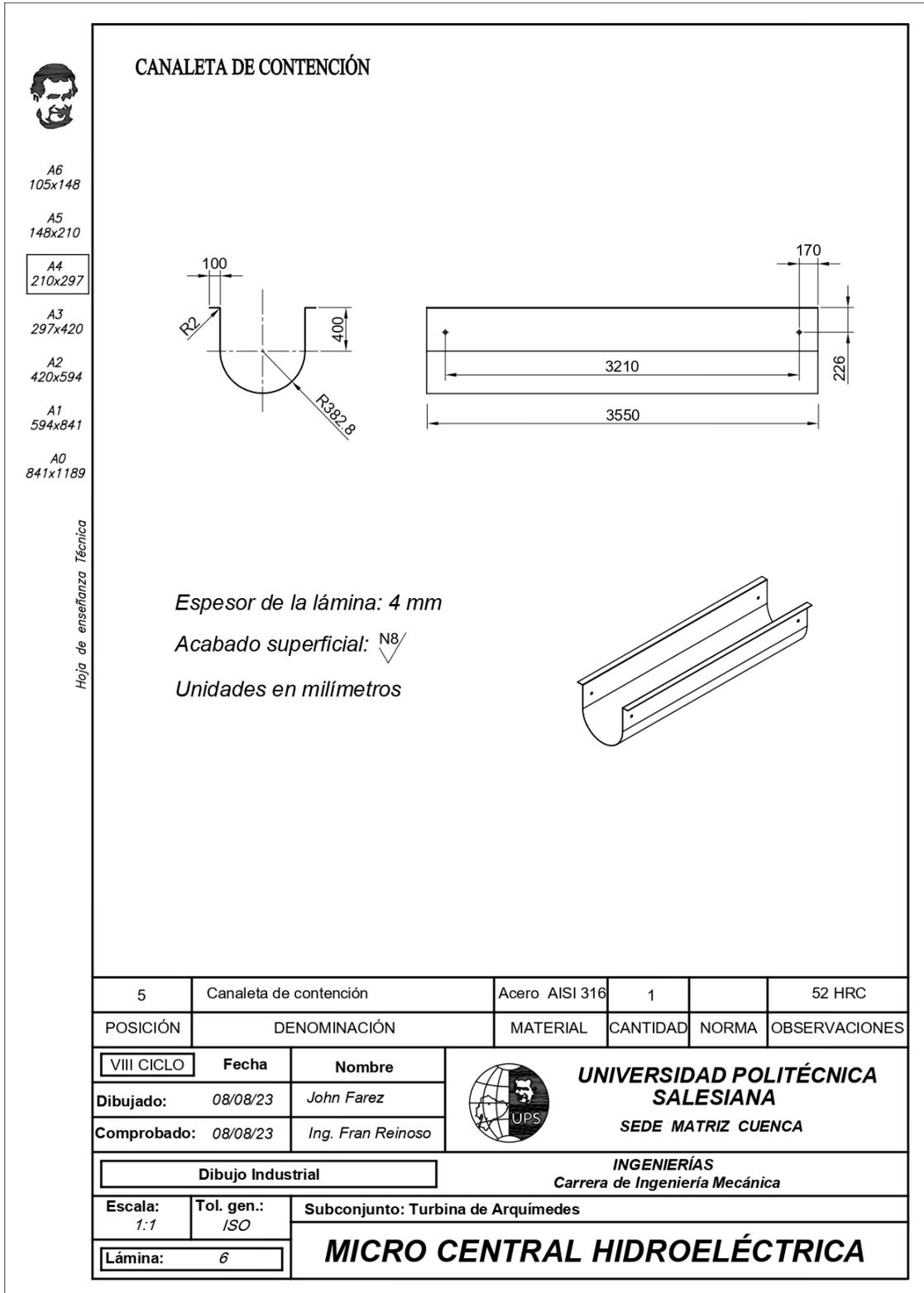
## Anexo 5: Planos constructivos del eje central y las hélices del tornillo de Arquímedes



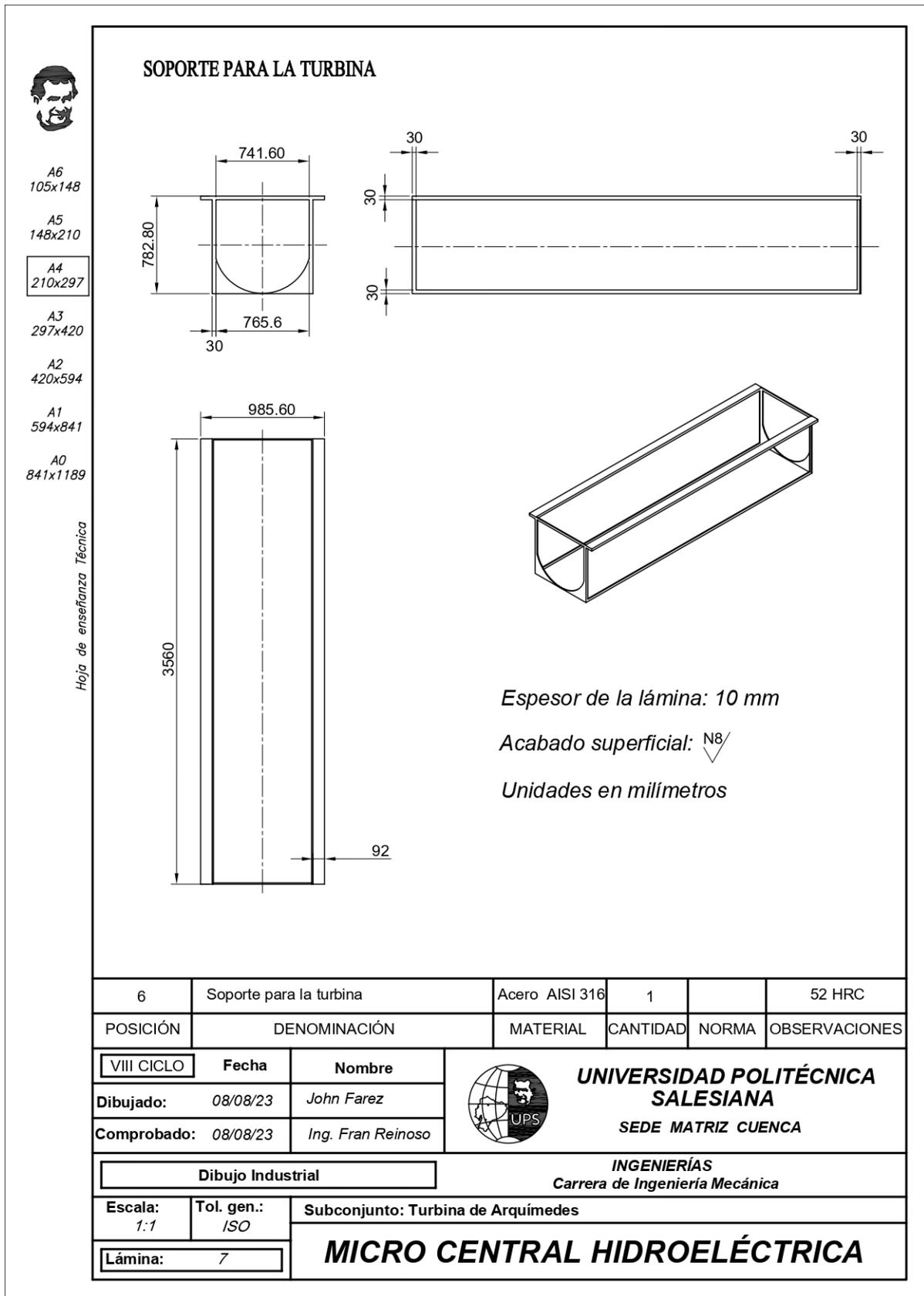
## Anexo 6: Planos constructivos de los ejes y tapas laterales del tornillo de Arquímedes



## Anexo 7: Planos constructivos de la canaleta de contención del tornillo de Arquímedes



## Anexo 8: Planos constructivos del soporte para el tornillo de Arquímedes



# Anexo 9: Planos constructivos del perfil para la chumacera del tornillo de Arquímedes



A6  
105x148

A5  
148x210

A4  
210x297

A3  
297x420

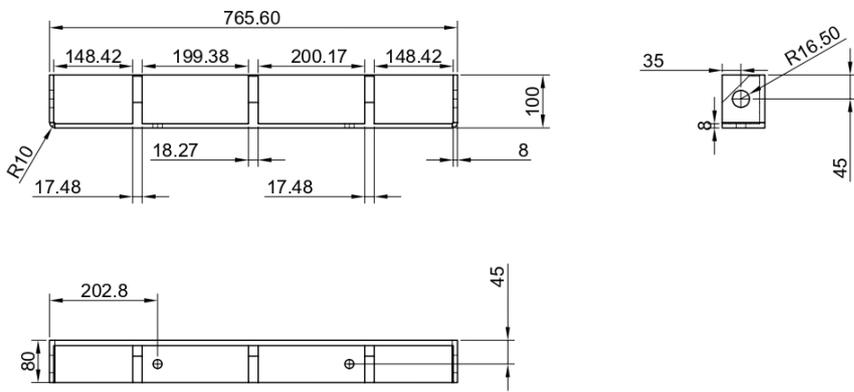
A2  
420x594

A1  
594x841

A0  
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica

## PERFIL PARA LA CHUMACERA

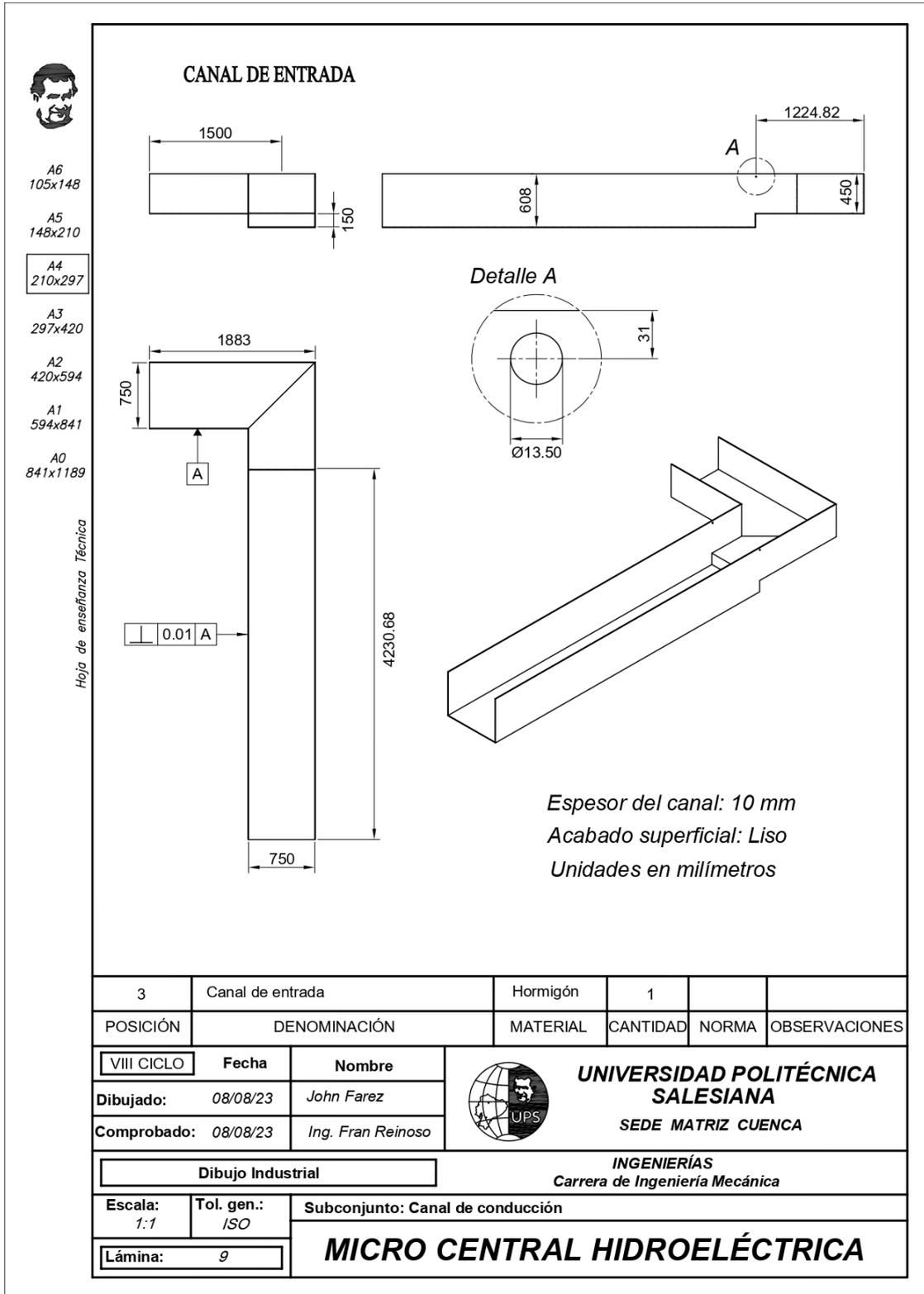


Acabado superficial:  $\nabla N8$

Unidades en milímetros

7	Perfil para la chumacera	Acero AISI 316	2		52 HRC
POSICIÓN	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	NORMA	OBSERVACIONES
VIII CICLO	Fecha	Nombre			
Dibujado:	08/08/23	John Farez			
Comprobado:	08/08/23	Ing. Fran Reinoso			
Dibujo Industrial			 <b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b> SEDE MATRIZ CUENCA		
Dibujo Industrial			INGENIERÍAS Carrera de Ingeniería Mecánica		
Escala:	Tol. gen.:	Subconjunto: Turbina de Arquímedes			
1:1	ISO	<b>MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA</b>			
Lámina:	8				

# Anexo 10: Planos constructivos del perfil y la rejilla para los sólidos del canal de entrada



# Anexo 11: Planos constructivos del canal de entrada hacia la turbina



A6  
105x148

A5  
148x210

A4  
210x297

A3  
297x420

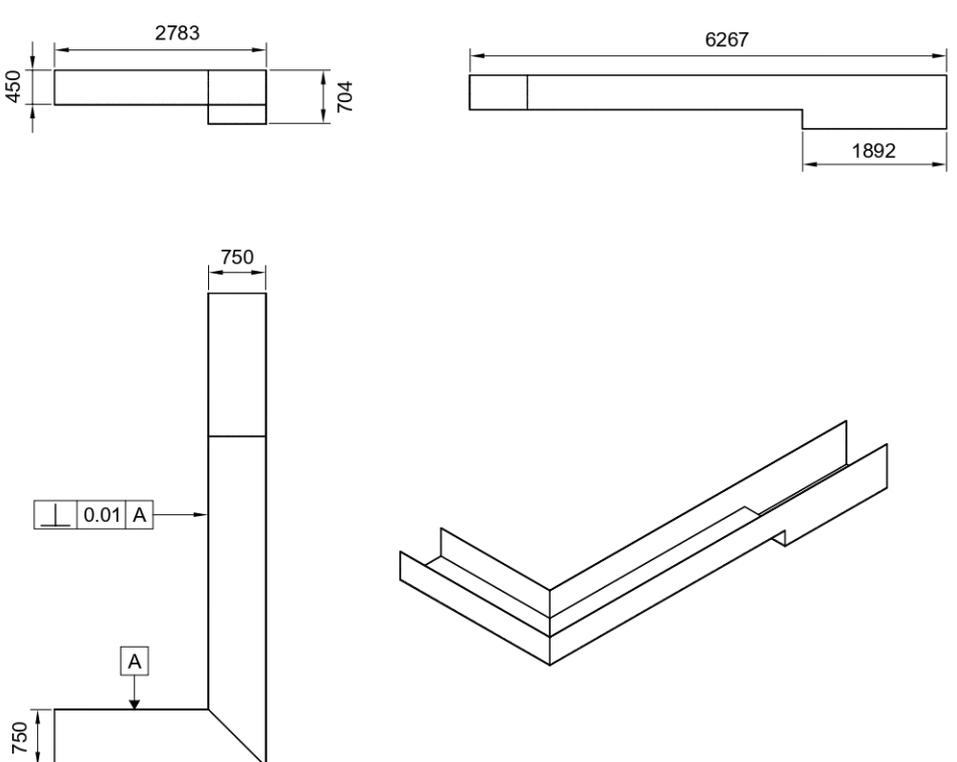
A2  
420x594

A1  
594x841

A0  
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica

## CANAL DE SALIDA



*Espesor del canal: 10 mm*  
*Acabado superficial: Liso*  
*Unidades en milímetros*

4	Canal de salida	Hormigón	1		
POSICIÓN	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	NORMA	OBSERVACIONES
VIII CICLO	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	 <p><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b> SEDE MATRIZ CUENCA</p> <p><b>INGENIERÍAS</b> Carrera de Ingeniería Mecánica</p>		
<b>Dibujado:</b>	08/08/23	John Farez			
<b>Comprobado:</b>	08/08/23	Ing. Fran Reinoso			
Dibujo Industrial					
<b>Escala:</b> 1:1	<b>Tol. gen.:</b> ISO	<b>Subconjunto: Canal de conducción</b>			
<b>Lámina:</b> 10	<b>MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA</b>				

## Anexo 12: Planos constructivos del canal de salida desde la turbina



A6  
105x148

A5  
148x210

A4  
210x297

A3  
297x420

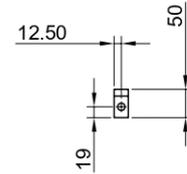
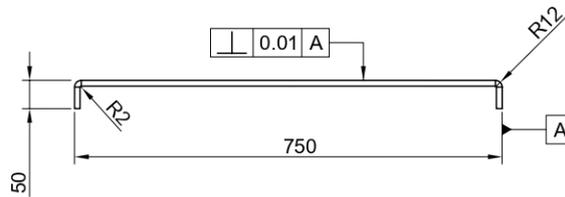
A2  
420x594

A1  
594x841

A0  
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica

### PERFIL PARA LA REJILLA DE SÓLIDOS

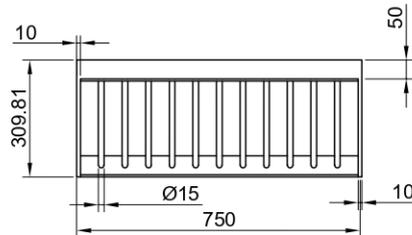
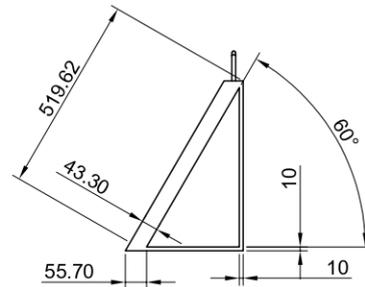
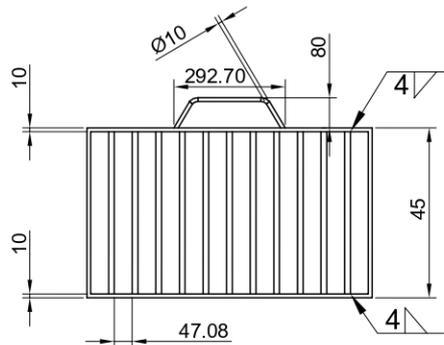


Espesor de la lámina: 10 mm

Acabado superficial: N8

Agujero para perno: M12

### REJILLA PARA SÓLIDOS



Unidades en milímetros

2	Rejilla para sólidos	Acero AISI 316	1		52 HRC
1	Perfil para la rejilla de sólidos	Acero AISI 316	1		52 HRC
POSICIÓN	DENOMINACIÓN	MATERIAL	CANTIDAD	NORMA	OBSERVACIONES

VIII CICLO	Fecha	Nombre
Dibujado:	08/08/23	John Farez
Comprobado:	08/08/23	Ing. Fran Reinoso



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
SALESIANA**  
SEDE MATRIZ CUENCA

Dibujo Industrial

INGENIERÍAS  
Carrera de Ingeniería Mecánica

Escala: 1:1  
Tol. gen.: ISO

Subconjunto: Canal de conducción

Lámina: 11

**MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

# Anexo 13: Planos constructivos de la turbina tipo tornillo de Arquímedes



A6  
105x148

A5  
148x210

A4  
210x297

A3  
297x420

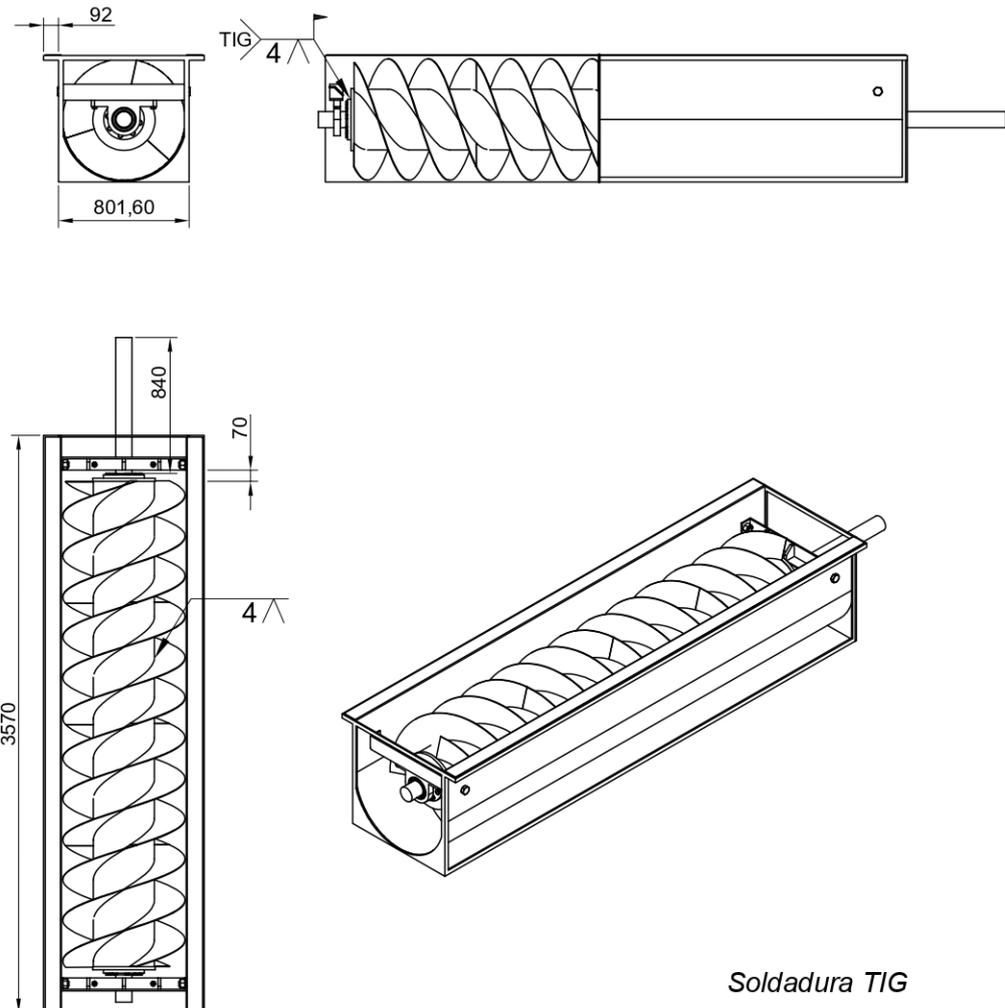
A2  
420x594

A1  
594x841

A0  
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica

## Turbina tipo tornillo de Arquímedes



Soldadura TIG  
Electrodos WL20  
Unidades en milímetros

<b>VIII CICLO</b>	<b>Fecha</b>	<b>Nombre</b>	 <p><b>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b> SEDE MATRIZ CUENCA</p>
<b>Dibujado:</b>	08/08/23	John Farez	
<b>Comprobado:</b>	08/08/23	Ing. Fran Reinoso	
<b>Dibujo Industrial</b>			<b>INGENIERÍAS</b> Carrera de Ingeniería Mecánica
<b>Escala:</b>	<b>Tol. gen.:</b>	<b>Subconjunto: Turbina de Arquímedes</b>	
1:1	ISO	<b>MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA</b>	
<b>Lámina:</b>	12		