UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
IngenieroMecánico

PROYECTO TÉCNICO:

“DISEÑO Y ANÁLISIS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PICO-APROVECHAMIENTO EN GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA”

AUTORES:

EDISON GEOVANNY MEDINA CHALAN

BYRON EDUARDO SIGCHI QUITO

TUTOR:

ING. JOHN IGNACIO CALLE SIGÜENCIA, Ph.D.

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Edison Geovanny Medina Chalan con documento de identificación Nº 1105359952 y Byron Eduardo Sigchi Quito con documento de identificación Nº 0107430027, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **"DISEÑO Y ANÁLISIS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PICO-APROVECHAMIENTO EN GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA"**, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021.

Edison Geovanny Medina Chalan

C.I. 1195359952

Byron Eduardo Sigchi Quito

C.I. 0107430027

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **"DISEÑO Y ANÁLISIS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PICO-APROVECHAMIENTO EN GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA"**, realizado por Edison Geovanny Medina Chalan y Byron Eduardo Sigchi Quito obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitosestipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre de 2021.

Firmado electrónicamente por:
JOHN IGNACIO CALLE SIGUENCIA

Ing. John Ignacio Calle Sigüencia, Ph.D.

C.I. 0102118213

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Edison Geovanny Medina Chalan con documento de identificación Nº 1105359952 y Byron Eduardo Sigchi Quito con documento de identificación Nº 0107430027, autores del trabajo de titulación: **"DISEÑO Y ANÁLISIS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE PICO-APROVECHAMIENTO EN GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA"**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, noviembre de 2021.

Edison Geovanny Medina Chalan

C.I. 1195359952

Byron Eduardo Sigchi Quito

C.I. 0107430027

DEDICATORIA

Dedicado este trabajo a Dios por permitirme vivir y a mis padres porque han sido mi ejemplo a seguir, han hecho lo imposible para que llegara a ser lo que soy actualmente tanto moral como profesional ellos siempre me han brindado su apoyo, amor, consejos, enseñanzas y valores adecuados por lo cual me siento muy orgulloso de tenerlos a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios y a la Virgen del Cisne por haberme guiado durante toda la carrera universitaria, de igual manera a mis padres Ángel y Faviola que siempre estuvieron pendientes de mi para que alcanzara esta meta tan anhelada.

Por otro lado, agradezco a la UPS por abrirme las puertas para mi formación profesional y personal, a cada uno de los docentes quienes me supieron brindar conocimientos valiosos durante el transcurso de la carrera, a mi compañero y amigo del alma que es un ser sincero, respetuoso, honrado y dedicado me ha apoyado mucho en toda la carrera y gracias a todo esto con el pudimos realizar este proyecto de tesis.

Finalmente agradezco a John Calle Ph.D, quien fue tutor de este proyecto ya que gracias a sus conocimientos y habilidades lo pudimos desarrollar.

Medina Chalan Edison Geovany

DEDICATORIA

A mis Padres, Abuela y Hermanos que siempre han estado pendientes en mi crecimiento profesional y personal.

A aquellas personas que siempre han estado a mi lado apoyándome y son parte de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la vida, salud y nunca haber soltado mi mano.

A mis Padres, que me han dado to lo necesario en esta vida para convertirme en una persona de bien.

A mi Abuela Rosa, que ha dedicado su vida para guiarme por el camino correcto.

A mi amigo y compañero de tesis por su dedicación por lograr este objetivo.

A John Calle, Ph.D, por su apoyo y guía en este Proyecto de Titulación.

Sigchi Quito Byron Eduardo

RESUMEN

El propósito de la presente investigación es realizar el diseño y el análisis para la implementación de un sistema de Pico-Aprovechamiento en Generación Hidroeléctrica teniendo presente que la energía eléctrica es de vital importancia para la realización de diversas actividades que permitan el crecimiento socioeconómico y el desarrollo humano de toda sociedad, así como también desempeña un papel determinante en materia de innovación tecnológica.

En el presente estudio se describe el diseño de los componentes que constituyen la Pico Central Hidroeléctrica (PCH), con base en un análisis técnico y partiendo de los parámetros de caudal $Q = 0.13\ {}^{m^3}/_{s}$ y salto hidráulico $H = 8m$ se selecciona una turbina tipo Michell-Banki el cual posee una eficiencia del 80% considerando su funcionamiento en amplio rango de caudal y su bajo costo de fabricación.

Por otro lado en este documento se expone el análisis hidráulico y su comportamiento a las cargas generadas realizadas mediante el programa de simulación numérica AUTODESK INVENTOR, así como también se presenta un diseño de las variaciones del diámetro de la tubería de presión, la potencia hidráulica, mecánica y eléctrica realizada en el programa LABVIEW en donde se determinan las siguientes características nominales $10.2\ kW$ de potencia hidráulica que luego de las eficiencias de la turbina y del generador se obtiene $6.5\ kW$ de potencia eléctrica generados.

Finalmente se realizará un análisis en donde se describe en detalle cómo se llevará a cabo la ejecución en el sitio de cada una de las partes de la PCH y respectivamente un análisis de costos para el desarrollo del proyecto.

Palabras claves: *Pico-Central Hidroeléctrica, Generación Hidroeléctrica, Turbina Michel Banki.*

ABSTRACT

The purpose of this research is to carry out the design and analysis for the implementation of a Pico-Hydroelectric Generation System, bearing in mind that electric energy is of vital importance for the realization of diverse activities that allow the socio-economic growth and human progress of any society, as well as it plays a determining role in technological innovation.

The present study describes the design of the components that constitute the Pico Hydroelectric Power Plant (PCH), based on a technical analysis and starting from the parameters of flow $Q = 0.13\ {}^{m^3}/_{s}$ and hydraulic jump $H = 8m$, a Michell-Banki type turbine is selected, which has an efficiency of 80% considering its operation in a wide range of flow and its low manufacturing cost.

On the other hand, this document presents the hydraulic analysis and its behavior to the loads generated by the numerical simulation program AUTODESK INVENTOR, as well as a design of the variations of the diameter of the pressure pipe, the hydraulic, mechanical and electrical power made in the LABVIEW program where the following nominal characteristics are determined $10.2\ kW$ of hydraulic power that after the efficiencies of the turbine and the generator is obtained $4.9\ kW$ of electrical power generated.

Finally, an analysis will be made describing in detail how the execution of each part of the SHP will be carried out on site and, respectively, a cost analysis for the development of the project.

Key words**:** *Hydroelectric Central Peak, Hydroelectric Generation, Turbine Michel Banki.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

1 Introducción 14
2 Problema 15
2.1 Antecedentes 15
2.2 Importancia y alcances 16
3 Objetivos 16
3.1 Objetivo general 16
3.2 Objetivos específicos 16
4 Marco Teórico 17
4.1 Centrales hidroeléctricas 17
4.1.1 Partes de una Central Hidroeléctrica 17
4.1.2 Características de carga 18
4.2 Pico-Centrales Hidroeléctricas 19
4.2.1 Ventajas de una Pico-Central Hidroeléctrica 20
4.3 Turbinas hidráulicas 21
4.3.1 Clasificación de las Turbinas Hidráulicas 21
4.3.2 Turbinas de Acción 21
4.3.3 Turbinas de Reacción 23
4.4 Turbina Michell-Banki 25
4.4.1 Características de la turbina Michell-Banki 25
4.4.2 Rodete 26
4.4.3 Inyector 26
4.5 Tanque de Captación 27
4.6 Bocatomas 29
4.6.1 Funciones de las bocatomas 29
4.6.2 Clasificación de las bocatomas. 30
4.6.3 Partes de una bocatoma 31
5 Metodología 33
5.1 Tipo de investigación 33
5.2 Diseño de investigación 33
5.3 Parámetros de selección y diseño del tipo de turbina hidráulica 34
5.3.1 Ubicación Geográfica 35
5.3.2 Estudio topográfico 35
5.3.3 Estimación del caudal disponible en el sitio. 36

5.3.4 Parámetros para el diseño de la PCH..... 36
5.3.5 Cálculo de la potencia disponible en el sistema 36
5.4 Selección del tipo de turbina..... 37
5.5 Diseño y cálculo de los mecanismos de la turbina 39
5.5.1 Número óptimo de revoluciones en RPM. 41
5.5.2 Comprobación de la aplicación de la turbina Michel Banki con los parámetros seleccionados..... 41
5.5.3 Diagrama de velocidades..... 42
5.5.4 Número de álabes. 46
5.5.5 Geométrica del rodete..... 47
5.5.6 Geometría del inyector. 49
5.5.7 Diseño y cálculos del rodete..... 51
5.5.8 Cálculo y diseño del eje del rodete..... 54
5.5.9 Selección de la chaveta para el eje del rodete..... 55
5.5.10 Cálculo de la velocidad crítica..... 57
5.5.11 Diseño del eje del álabe directriz..... 58
5.5.12 Selección de la chaveta para el eje del álabe directriz..... 59
5.5.13 Diseño de la carcasa de la turbina 61
5.6 Tubería de presión..... 61
5.6.1 Dimensionamiento del diámetro de la tubería de presión. 61
5.6.2 Dimensionamiento de acuerdo al método tradicional. 62
5.6.3 Ecuación de Fahlbusch 65
5.6.4 Ecuación de Manning 65
5.6.5 Ecuación de Bondschú..... 66
5.6.6 Selección del diámetro de la tubería de presión. 67
5.7 Cámara de carga..... 67
5.7.1 Dimensionamiento de la cámara de carga 69
5.8 Comprobación y análisis de esfuerzos de las partes de la turbina mediante software de Ingeniería..... 70
5.8.1 Simulación de la carcasa..... 70
5.8.2 Simulación del Inyector..... 71
5.8.3 Simulación del Álabe directriz 72
5.8.4 Simulación del álabe del rodete..... 73
5.8.5 Simulación del eje del Rodete 74
5.9 Análisis para la implementación de la Pico Turbina..... 75
5.9.1 Análisis de la implementación de la cámara de carga 75

5.9.2 Análisis para la implementación de la tubería de presión. 78
5.9.3 Análisis para la implementación de la pico-turbina hidráulica 78
5.10 Simulación del funcionamiento de la PCH..... 80
5.11 Análisis de costos de implementación 81
6 Resultados y discusión 86
6.1 Resultados para los parámetros de selección. 86
6.2 Resultados del diseño, modelamiento y simulación. 86
6.3 Resultados del análisis de costos y de la implementación. 88
7 Conclusiones. 89
8 Recomendaciones. 89
9 Referencias. 90
ANEXOS…… 93
ANEXO 1: Planos…… 94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Central Hidroeléctrica **17**
Figura 2. Partes de una central hidroeléctrica **18**
Figura 3. Funcionamiento de un sistema Pico-generación hidroeléctrica **20**
Figura 4. Turbina Pelton **22**
Figura 5. Turbina Michell-Banki **23**
Figura 6. Turbina Francis **24**
Figura 7. Turbina Kaplan **25**
Figura 8. Esquema de la turbina Michell-Banki **25**
Figura 9. Rodete de la turbina tipo Michell-Banki **26**
Figura 10. Funcionamiento del inyector de una turbina tipo Michell-Banki **27**
Figura 11. Tanque de Captación **28**
Figura 12. Modelo de Bocatoma **29**
Figura 15. Necesidad de una barraje en una bocatoma **31**
Figura 16. Modelo de Desarenador adaptada de Ortiz **33**
Figura 17. Diagrama de procesos para el desarrollo de una Pico-central **34**
Figura 18. Ubicación de la laguna reservorio. **35**
Figura 19. Relación salto vs. caudal para diferentes turbinas **38**
Figura 20. Diagrama Turbina Michell-Banki **40**
Figura 21. Gráfico para la determinación del triángulo de velocidades **42**
Figura 22. Cotas dimensionales del rodete **47**
Figura 23. Cotas dimensionales para el inyector de la turbina **50**
Figura 24. Diseño del rodete de la turbina. **53**
Figura 25. Diseño de eje del rodete de la turbina. **54**
Figura 26. Chaveta de soporte para el eje del rodete **56**
Figura 27. Diseño de la carcasa de la turbina **61**
Figura 28. Diagrama de Moody **63**
Figura 29. Diseño del tanque de captación **68**
Figura 30. Principales esfuerzos, Carcasa Turbina Michell Banki. **71**
Figura 31. Campo de deformaciones de la carcasa Turbina Michell Banki **71**
Figura 32. Esfuerzos Principales, Inyector Turbina Michell Banki. **72**
Figura 33. Campo de deformaciones del inyector Turbina Michell Banki. **72**
Figura 34. Esfuerzos Principales, Álabe directriz Turbina Michell Banki. **73**
Figura 35. Campo de deformaciones del álabe directriz Turbina Michell Banki. **73**
Figura 36. Esfuerzos Principales, Álabe del rodete de la Turbina Michell Banki **74**

Figura 37. Campo de formaciones del álabe del rodete de la Turbina Michell Banki. .. **74**
Figura 38. Principales esfuerzos del eje del rodete. **74**
Figura 39. Campo de deformaciones en el eje del Rodete. **75**
Figura 40. Modelo *en 3D* de la cámara para la PCH. **76**
Figura 41. Modelo dimensional de la cámara de carga diseñada para la PCH. **77**
Figura 42. Instalación de la tubería de presión para la PCH. **78**
Figura 43. Instalación de la turbina en la casa de máquinas. **79**
Figura 44. Sistema de transmisión de potencia al generador. **80**
Figura 45. Ventada de programación en el módulo de Mathscript. **81**
Figura 46. Ventana DCC de interfaz para el usuario. **81**
Figura 47. Plano Topográfico. **86**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de cargas para diferentes tipos de Centrales Hidroeléctricas 19
Tabla 2. Matriz de ponderación para la selección del tipo de turbina adecuada..... 39
Tabla 3. Aplicación de los diferentes tipos de turbinas según el Nq y Ns..... 41
Tabla 4. Parámetros característicos en turbinas ensayadas por diferentes investigaciones 46
Tabla 5. Dimensiones del perfil para el rodete. 49
Tabla 6. Cotas dimensionales del perfil del inyector..... 51
Tabla 7. Diámetros estandarizados del rodete 52
Tabla 8. Diámetros máximos del eje del álabe directriz..... 59
Tabla 9. Coeficiente de rugosidad de Manning..... 66
Tabla 10. Valores calculados de diámetros para la tubería de presión. 67
Tabla 11. Costos unitarios para el tanque de captación..... 82
Tabla 12. Costos unitarios para la tubería de presión..... 83
Tabla 13. Costos unitarios para la turbina Michell Banki 84
Tabla 14. Costos unitarios para la casa de máquinas..... 85
Tabla 15. Costo total pico central hidroeléctrica. 86
Tabla 16. Deformaciones de las partes de la turbina Michell Banki 87

1 Introducción

El agua es un recurso renovable que ha existido desde siempre y lo seguirá siendo en la medida en que se utilice dicho recurso de manera equilibrada y responsable, la utilización de este recurso ha pasado de ser, del líquido vital para todo ser viviente a convertirse progresivamente en la principal fuente de energía hidráulica para la generación de energía hidroeléctrica.

La combinación de montañas y tierras bajas ayudan a que exista una red extensa de ríos y numerosas cuencas hídricas haciendo que en América Latina se pueda desarrollar un sistema de abastecimiento de agua de gran calidad, por otro lado en Ecuador se ha tratado de usar los grandes recursos hídricos con gran caudal para la construcción de grandes centrales hidroeléctricas que conllevan a la construcción de una represa que embalsa millones de litros de agua dejando así impactos negativos en el medio ambiente que incluso se ha llegado a que el aprovechamiento de estos recursos sean vistos como negativos incluso por grupos ecologistas. Sin embargo, la potencia eléctrica de Ecuador es de $7146\ MW$ según la ARCONEL, esta energía sirve para satisfacer de energía eléctrica a través del sistema interconectado [1].

Por otro lado así como la formación de montañas y valles dan a la formación de recursos hídricos, estas a su vez impiden que el sistema interconectado llegue con energía eléctrica hasta las zonas más alejadas como son las comunidades rurales aisladas, que a su vez no habitan en viviendas cercanas, haciendo que llegar con energía mediante un tendido eléctrico sea muy costoso, por ende se prevé la necesidad de diseñar un sistema de pico aprovechamiento para la generación eléctrica en zonas rurales aisladas que cuenten con una quebrada, un canal de riego, un riachuelo o un rio como tal, aprovechando así los caudales y saltos de altura más bajos encontrados

Las turbinas más utilizadas en las Pico Centrales Hidroeléctricas (PCH) es la Michell Banki, que puede llegar a producir hasta $5\ kW$. Esta turbina se remonta a principios de siglo XX cuando el ingeniero A.G. Michell desarrolló, en 1903, la turbina de flujo cruzado de doble paso, la cual fue estudiada en la Universidad de Budapest por el ingeniero D. Banki entre los años 1917 y 1919. En 1993 el ingeniero alemán Fritz Ossberger desarrolló la turbina que denominó Cross – Flow, que era una turbina de flujotransversal con un mejor diseño que la desarrollada por Michell y estudiada por Banki [2].

Las PCH son centrales con una potencia de generación pequeña, la que se puede definir como un conjunto de obras civiles y estructuras hidráulicas generales y su respectivo equipo electromecánico, aprovechan la energía potencial y cinética del agua para producir energía mecánica y eléctrica [3]. Este tipo de centrales hidroeléctricas requieren de poco represamiento de aguas debido a su tamaño, además de una turbina de bajo tamaño y, sobre todo un costo muy bajo.

2 Problema

2.1 Antecedentes

Hoy en día se ve evidenciada la demanda de energía eléctrica en todo el mundo y es común encontrar en zonas aisladas de la urbanización la generación de esta energía eléctrica a través de motores DIESEL, siendo esta una gran fuente de contaminación para el medio ambiente. Sin embargo, las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas son fuentes de energía eléctrica renovable no convencional, por lo que son energías que generan poco impacto negativo al medio ambiente además de su bajo costo en cuanto a la implementación [4].

La cobertura de energía eléctrica en el país ascendió del 94.22% en 2009 al 97.05% en 2018 según la estadística anual y multianual del sector eléctrico que presenta la página ARCONEL [1]. El 2.95% de la población no cuenta con el servicio de energía eléctrica. Este porcentaje de la población se encuentra principalmente en sectores alejados y con familias dispersas, mayoritariamente en la Amazonia. Esto sin dejar de lado, que hay sectores en la Región Sierra y otras partes de Ecuador que carecen de este servicio vital.

La promoción de las tecnologías de energías renovables ofrece una doble ventaja: diversificación energética y desarrollo para muchas comunidades pobres y aisladas que no están conectadas a las grillas de transporte y distribución eléctrica. El suministro de energía a las comunidades aisladas sirve como apoyo al desarrollo de las actividades domesticas comerciales y productivas. Las energías renovables tienen importanciaporque permiten disminuir la dependencia de los combustibles fósiles en franco agotamiento y por su capacidad de generar una matriz energética más diversa y por ende menos vulnerable [5].

El ex Instituto Ecuatoriano de Electrificación — INECEL, encargado de la planificación y desarrollo del sector eléctrico del país, hasta marzo de 1999, estudió el potencial hídrico de un elevado porcentaje de las cuencas hidrográficas del país y la posibilidad de

aprovechamiento de esta energía renovable, mediante la instalación de centrales hidroeléctricas de pico, mini, pequeña, mediana y gran capacidad. Estos estudios se concretaron en la edición de un Catálogo de proyectos hidroeléctricos a ejecutarse en el corto, mediano y largo plazo [6].

Actualmente se han instalado 28 centrales Pico-Hidro con una turbina híbrida de tecnología asiática (Vietnam), la misma que se encuentran en una etapa de análisis de funcionamiento, y por ende tratando de estudiar sus parámetros técnicos y el poder determinar la factibilidad técnica económica de su uso en zonas rurales del país [6].

2.2 Importancia y alcances.

El objetivo del presente proyecto es realizar el diseño, la simulación y análisis la implementación de una pico central hidroeléctrica a partir de un diagnóstico previo de una captación de agua proveniente de la quebrada que atraviesa el Colegio Técnico Agronómico Salesiano en el cantón Paute, esto nos ayudará a realizar una evaluación de cuan factible es la implementación de un sistema de pico-generación hidroeléctrica a partir de datos mínimos requeridos tanto de caudal y salto de agua para este tipo de proyectos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar y analizar la implementación de una Pico-Central Hidroeléctrica para el aprovechamiento de recursos naturales hídricos de zonas rurales aisladas, definiendo caudales, saltos de agua, y utilizando modelos de ingeniería para garantizar su funcionalidad.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar y definir los parámetros de caudales y saltos del agua que permitan la implementación de una pico-turbina de generación hidroeléctrica en la zona del Austro del Ecuador.
- Diseñar y modelar una pico-turbina para generación hidroeléctrica utilizando modelos matemáticos y software de Ingeniería, considerando los parámetros hídricos existentes en la zona del Austro del Ecuador.
- Analizar la construcción e implementación de una pico-turbina, con materiales existentes en la localidad.

4 Marco Teórico

En el presente estudio se abordará en primer lugar los tipos de centrales hidroeléctricas que existen, con la finalidad de conocer a fondo como está constituido una pequeña central hidroeléctrica, luego pasaremos a definir los tipos de turbinas usados en este tipo de proyectos, los parámetros de cálculos para las turbinas y por último se investigará sobre todos los elementos que forman parte de la obra civil empezando por la bocatoma y terminará hablando sobre el tanque de captación y sus características.

4.1 Centrales hidroeléctricas

Una Central Hidroeléctrica es el resultado de la evolución que ha tenido con el pasar de los años los antiguos molinos, mismos que aprovechaban la corriente de un cause hídrico para mover la rueda. En general una central hidroeléctrica es aquella que aprovecha la energía potencial que tiene un recurso hídrico debido a su desnivel, también conocido como salto geodésico el cual al pasar por la tubería de presión da un impulso al rodete de una turbina generando energía mecánica que posteriormente se transformará mediante un generador en energía eléctrica. (Figura 1) [7] [6]

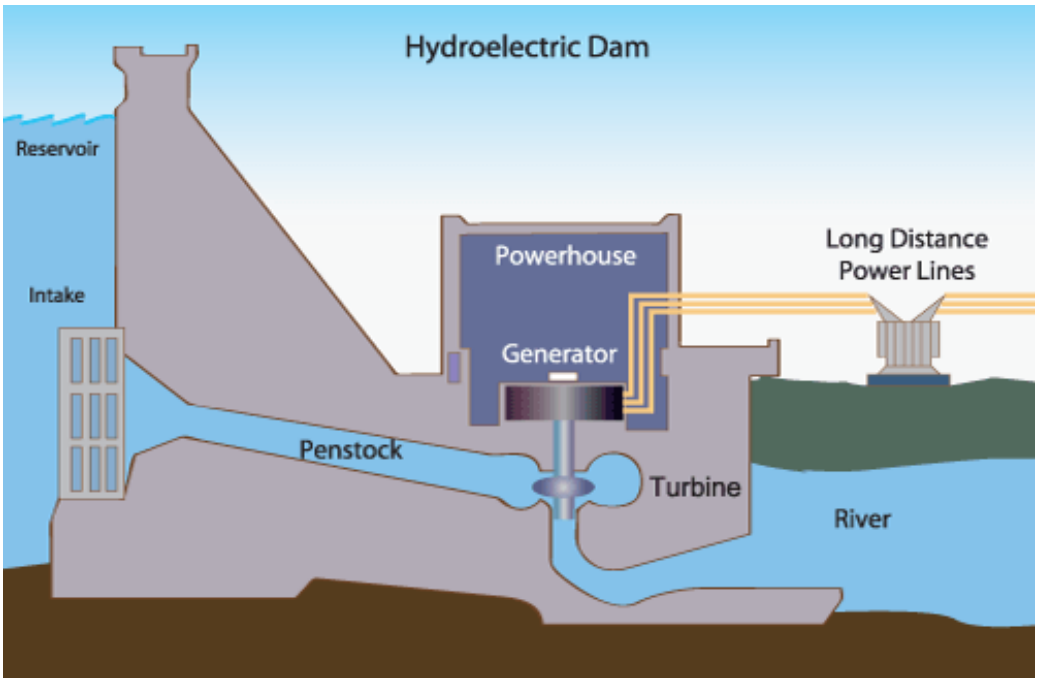


Figura 1. Central Hidroeléctrica [9]

4.1.1 Partes de una Central Hidroeléctrica.

Para establecer las partes de una Central Hidroeléctrica, se fundamentará el análisis según lo presentado por Viva Rodríguez y Vargas [10] [11], además todas las partes de una central hidroeléctrica se muestran en la Figura 2.

- **Presa:** Es la estructura construida perpendicularmente al cauce de un rio para retener y almacenar el agua a un nivel considerable.
- **Desagües:** Son compuertas construidas en la pared principal de la presa a través de las cuales se controla la salida del agua.
- **Tubería de conexión:** Denominada tubería forzada o tubería de presión que parte desde el tanque de captación y conduce el agua del tanque hacia la turbina.
- **Elementos de cierre y reguladores:** Son los encargados de impedir o regula la entrada del agua a las turbinas, de esta manera regulamos el caudal y la frecuencia de generación.
- **Generador:** Es una máquina o motor que se acopla a la turbina mediante un sistema de transmisión de potencias por lo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica**.**
- **Turbinas:** Maquina hidráulica que transforma la energía cinética del agua en energía mecánica, generalmente existen dos tipo de turbinas las de acción y las de reacción

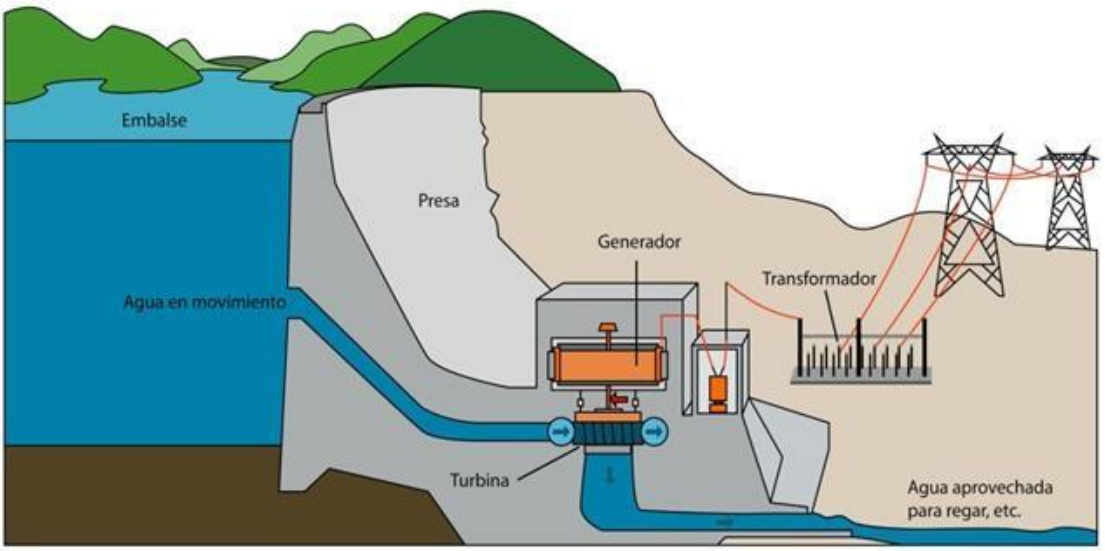


Figura 2. Partes de una central hidroeléctrica [12]

4.1.2 Características de carga.

Las centrales utilizan la potencia cinética del agua para producir energía eléctrica, por lo tanto, la potencia requerida depende en gran medida de la altura y caudal que pueda obtenerse de la fuente hídrica [13].

Las pequeñas centrales –PCH a su vez se subdividen en pico, micro, mini y pequeña generación, y aunque los rangos pueden variar según el país y la organización ya que no se ha establecido un criterio único para la subdivisión por otro lado según la Organización Latino Americana de Energía (OLADE) nos muestra algunas de las características que nos ayudar a identificar el tamaño de la central hidroeléctrica al momento de diseñar, estos datos se muestran en la Tabla 1 [13].

Tabla 1. Características de cargas para diferentes tipos de Centrales Hidroeléctricas [13]

Tipo	Rango de potencia (KW)	Baja Carga	Media Carga	Alta carga
Pico-Centrales	0.2 < P ≤ 5	H < 2m $Q = 0.5\ m^3/s$	2m < H < 3m $Q = 0.375\ m^3/s$	H > 3m $Q = 0.25\ m^3/s$
Micro-Centrales	5 < P ≤ 50	H < 5m $Q = 3\ m^3/s$	5m < H < 7m $Q = 2.45\ m^3/s$	H > 7m $Q = 1.9\ m^3/s$
Mini-Centrales	50 < P ≤ 500	H < 20m $Q = 30\ m^3/s$	20m < H < 100m $Q = 15\ m^3/s$	H > 100m $Q = 3\ m^3/s$
Pequeñas Centrales	500 < P ≤ 5000	H < 25m $Q = 120\ m^3/s$	25m < H < 130m $Q = 85\ m^3/s$	H > 130m $Q = 7\ m^3/s$
Macro-Centrales	5000 < P	H < 20m $Q = 300\ m^3/s$	20m < H < 200m $Q = 200\ m^3/s$	H > 200m $Q = 20\ m^3/s$

4.2 Pico-Centrales Hidroeléctricas

Las Pico-Centrales Hidroeléctricas son constructivamente idénticas a una micro central, solo que con menor potencia. Estas nos permiten utilizar o aprovechar la energía hidráulica de los recursos naturales como riachuelos, arroyos, quebradas, etc. [14].

Una Pico hidro refiere a instalaciones hidroeléctricas con niveles de generación eléctrica menores de cinco kilovatios. Los sistemas hidroeléctricos de este tamaño gozan de ventajas en términos de costos y simplicidad, comparados con sistemas hidroeléctricos de mayores capacidades, debido a distintos procedimientos que se aplican en los pasos de diseño, planificación e instalación de los pico-sistemas [15].

La potencia que genera esta Pico-Central es inferior a los $5.000\ W$ $(5kW)$, esta nos permite electrificar una cabaña, casa o un refugio de montaña generando los vatios necesarios para la iluminación. (Figura 3) [16].

Pueden funcionar con muy poca altura y poco caudal pudiendo colocar la clase de pico-turbina idónea para cada arroyo. La altura mínima para generar electricidad es de 1.5 m y el caudal varía de 35 l/s a 130 l/s si se dispone de más altura de 3 a 15 m, el caudal mínimo necesario disminuye a 5 l/s, pueden generar corriente alternas a 220 V ocorriente continua de 12 a 24 V [14], [17] .

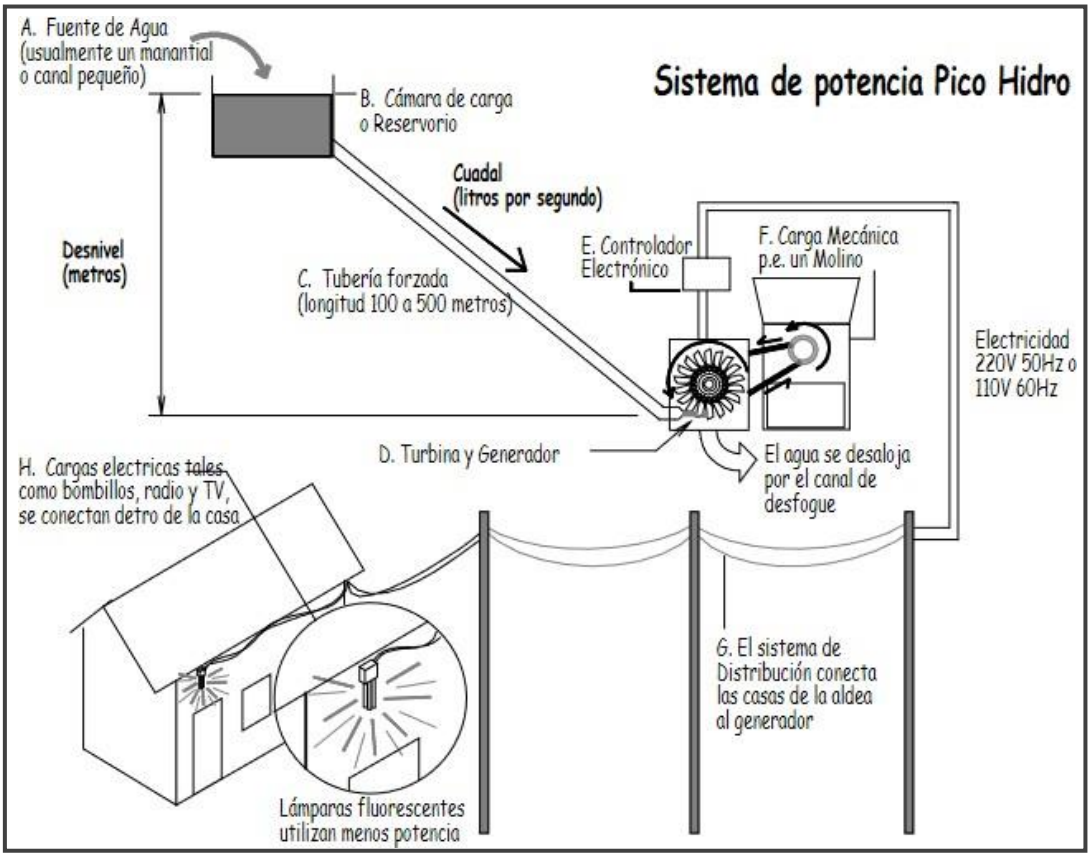


Figura 3. Funcionamiento de un sistema Pico-generación hidroeléctrica [15]

4.2.1 Ventajas de una Pico-Central Hidroeléctrica.

Para definir las ventajas de una PCH, se tomará como referencia lo presentado por el Instituto Tecnológico de Canarias en su publicación sobre Energías Renovables [18].

- Para las PCH se requieren caudales pequeños con esta primicia se pueden aprovechar numerosas fuentes de agua, un manantial o un arroyo pequeño provee suficiente agua para la instalación de una PCH.
- Los elementos que componen una PCH son pequeñas y compactas, debido a esto los componentes son de fácil transporte pudiendo así llegar a sitios remotos y de difícil acceso.

- En este tipo de instalaciones partiendo de un buen diseño se puede tener costos por kilovatio menores que el de un sistema fotovoltaico, o sistemas eólicos o electrógenos.

4.3 Turbinas hidráulicas

La turbina hidráulica es un motor rotativo que convierte en energía mecánica la energía de una corriente de agua. El elemento básico de la turbina es la rueda, rotor o rodete, que cuenta con palas, hélices, cuchillas o cubos colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento produce una fuerza tangencia que impulsa la rueda y la hace girar. Esta energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento de una máquina, un generador eléctrico o una hélice [19].

4.3.1 Clasificación de las Turbinas Hidráulicas

Las turbinas hidráulicas se clasifican en dos grupos de turbinas:

- Turbinas de acción.
- Turbinas de reacción.

Comparando ambos tipos de turbinas se tiene que las de acción aprovechan únicamente la velocidad proveniente del flujo de agua para hacer girar el rodete, mientras que las turbinas de reacción aprovechan la presión que le resta a la corriente en el momento de contacto, es decir, mientras que las turbinas de reacción aprovechan la altura total disponible hasta el nivel de desagüe, las de acción aprovechan únicamente la altura hasta el eje de turbina. La turbina Pelton es un tipo de turbina de acción más conocida, pero existen otros modelos como puede ser el tipo Turgo con inyección lateral y la turbina de doble impulsión o flujo cruzado también conocida por turbina Ossberger o Michell-Banki. Dentro de las turbinas de reacción, las más conocidas son la Francis y la Kaplan [20], [21].

4.3.2 Turbinas de Acción

- **Turbina Pelton**

La turbina Pelton, cuyo nombre proviene del ingeniero estadounidense Lester Allen Pelton, tiene sus comienzos de aplicación durante la segunda mitad del siglo XIX, en instalaciones donde la presión del agua era equivalente a una columna de agua de entre noventa y novecientos metros (90 y 900 m). En este tipo de turbinas el agua se conduce

desde un depósito a gran altura a través de un canal o una conducción forzada hasta una boquilla eyectora que convierte la energía cinética del agua en un chorro a presión [14].

El modelo de este tipo de turbinas se puede observar en la Figura 4, cabe resaltar que las turbinas Pelton pertenecen al grupo de turbinas de impulso (o chorro libre), donde la altura disponible se convierte en energía cinética a presión atmosférica. La energía se extrae del chorro de agua de alta velocidad cuando incide sobre la cuchara del rotor. Este tipo de turbina se aplica normalmente al rango de grandes alturas de caída (más de 40 m) [9].

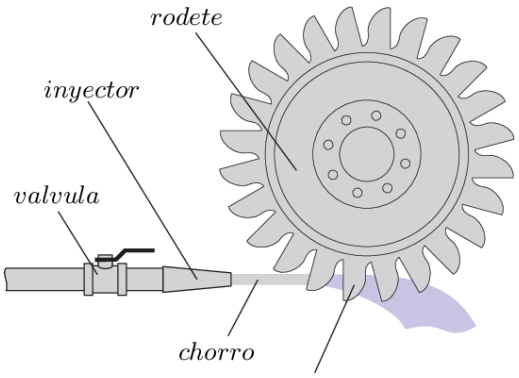


Figura 4. Turbina Pelton [14]

- **Turbina Michell-Banki**

Una de las características principales de la turbina de flujo cruzado es el chorro de agua de sección transversal rectangular que pasa dos veces a través de los álabes del rodete, ubicados en la periferia del rodete cilíndrico perpendicular al eje. El agua fluye a través de los álabes, primero desde la periferia hacia el centro y entonces, después de cruzar el espacio abierto del rotor [6].

La conversión de energía tiene lugar dos veces; primero en la incidencia del agua sobre el álabe en la entrada y luego cuando el agua golpea el álabe en el escape desde el rotor. El uso de dos etapas de trabajo no ofrece ventajas particulares, excepto ser un medio simple y efectivo de descargar el agua desde el rotor. La turbina de flujo cruzado puede aplicarse sobre un rango de alturas de caída desde menos de 2 m a más de 100 m. Una gran variedad de caudales puede acomodarse con un diámetro constante del rotor, de este tipo de turbinas se puede ver su forma constitutiva en la Figura 5 [6].

Figura 5. Turbina Michell-Banki [6]

4.3.3 Turbinas de Reacción

- **Turbina Francis**

La turbina Francis fue desarrollada por James B. Francis. Es una turbina de reacción de flujo interno que combina conceptos tanto de flujo radial como de flujo axial [22].

Las turbinas Francis se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los diez metros hasta varios cientos de metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbina sea el más ampliamente usado en el mundo, principalmente para la producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas, en la Figura 6, se puede ver un modelo de este tipo de turbinas además tiene un corte por el cual se puede observar la forma de sus álabes [22]. La admisión tiene forma de espiral. Los álabes directores dirigen el agua tangencialmente hacia el rodete. Este flujo radial actúa sobre los álabes del rodete, causando que este gire. Los álabes directores, también conocidos como álabes giratorios, pueden ser ajustables para permitir un funcionamiento eficiente en un rango amplio de condiciones del caudal de agua [23].

A medida que el agua se mueve a través del rodete su radio de giro disminuye, actuando sobre él. Imagínese una bola girando por dentro una cuerda alrededor de un círculo. Si se empuja la cuerda para hacerla más corta, la bola gira más rápido. Esta propiedad ayuda a las turbinas de flujo interno a extraer la energía del agua. [21]

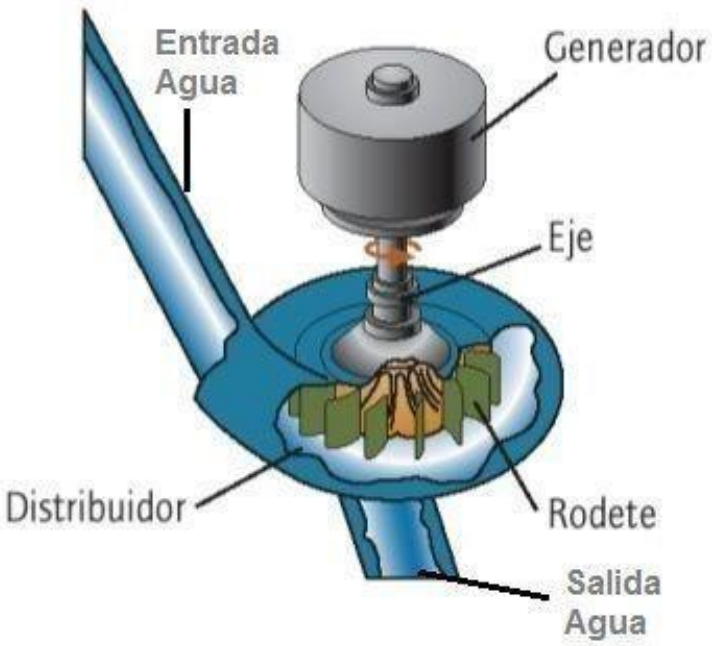


Figura 6. Turbina Francis [20]

- **Turbina Kaplan.**

El aumento de las necesidades de energía hidroeléctrica durante los albores del siglo XX puso de manifiesto la necesidad de turbinas que pudieran aprovechar caídas de agua de tres a nueve metros (3-9 m), que podrían utilizarse en muchos ríos construyendo pequeños embalses de agua. En el año de mil novecientos trece (1913), el ingeniero Austriaco Viktor Kaplan planteó por primera vez la turbina de hélice, que actúa al contrario que la hélice de un barco. Kaplan mejoró la turbina haciendo que las palas pudieran pivotar sobre su eje. Los distintos ángulos de las palas aumentaban el rendimiento ajustando el ángulo al volumen de la caída de agua [14].

Las turbinas Kaplan como se puede ver en la Figura 7 son turbinas de agua de reacción de flujo axial, con un rodete que funciona de manera semejante a la hélice de un barco. Se emplean en saltos de pequeña altura. Las amplias palas o álabes de la turbina son impulsadas por agua a alta presión liberada por una compuerta [14].

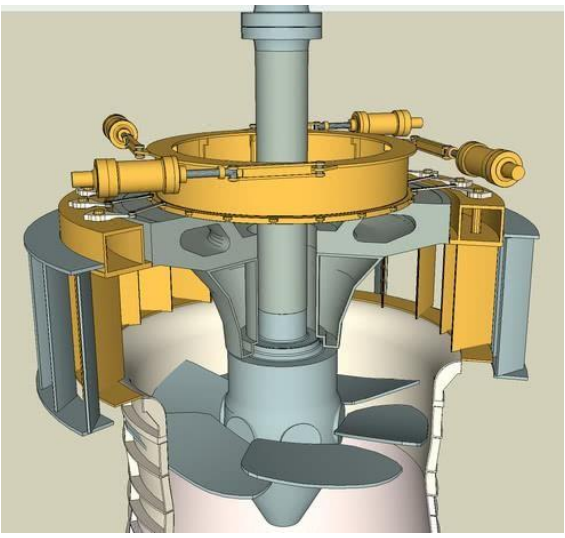


Figura 7. Turbina Kaplan [24]

4.4 Turbina Michell-Banki

4.4.1 Características de la turbina Michell-Banki

La turbina Michell-Banki o turbina de flujo cruzado es una maquina hidráulica utilizada para aprovechamientos hidroeléctricos hasta 2000 KW. Lo que la hace muy atractiva frente a otras turbinas clásicas es la sencillez de su construcción, su costo significativamente menor, la principal desventaja comparativa frente aquellas es su rendimiento más bajo [22], [25].

Los elementos principales que constan en esta turbina es un inyector, válvula, rodete y descarga, además posee una carcasa que en muchos diseños cumple la doble función de chasis y de cubierta; esta última con el fin de evitar que el salpique de agua e impedir el ingreso de elementos extraños al rotor, (Figura 8). Para estos tipos de turbinas la cubierta no necesariamente se incorpora en todos los diseños [25].

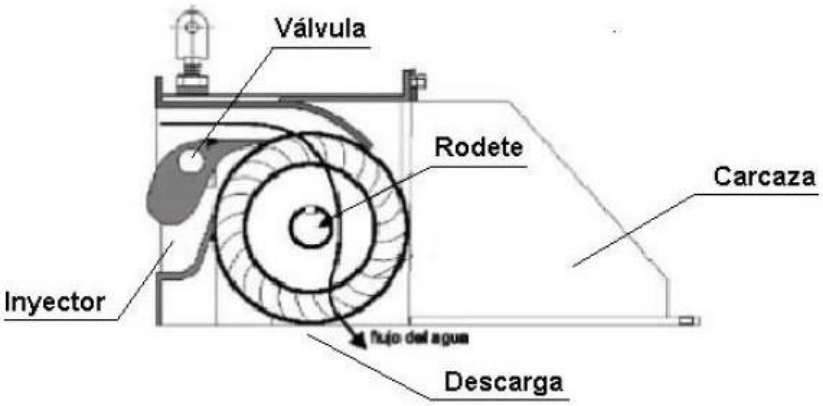


Figura 8. Esquema de la turbina Michell-Banki [25]

4.4.2 Rodete

El rodete es la parte esencial de la turbina, está formado con palas que están fabricadas de acero perfilado, ajustadas y soldadas a ambos lados en un disco terminales según un procedimiento especial. Según el tamaño del rodete puede poseer un número de palas específico. Las palas curvadas linealmente producen un empuje axial pequeño y su vez es amortiguado por medio de los rodamientos. Para el montaje de la turbina se somete a un balanceo y perfecto alineamiento tal cual como se observa en la Figura 9 [2].

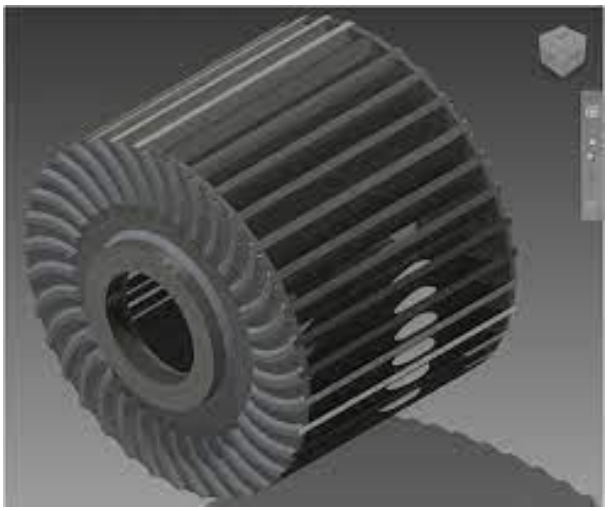


Figura 9. Rodete de la turbina tipo Michell-Banki [26]

4.4.3 Inyector

En la turbina Michell-Banki, la entrada del agua es propulsada por una bomba, este flujo de agua se gobierna por medio de palas directrices perfiladas de fuerza compensada [26].

Las palas directrices dividen y dirigen la corriente de agua que proviene de la bomba haciendo que esta llegue al rodete sin efecto de golpe con independencia de la abertura de entrada. Ambas palas giratorias se hallan perfectamente ajustadas [26].

Las pérdidas por fuga son tan escasas que la pala directriz puede servir de órgano de cierre. De esta manera no es preciso que se prevea ninguna válvula de cierre entre la tubería de presión y la turbina. La pala directriz puede regularse independientemente entre sí mediante una palanca regulada a la que se acopla la regulación manual, el funcionamiento del inyector y pala di rectriz se puede observar en la Figura 10 [26], [27].

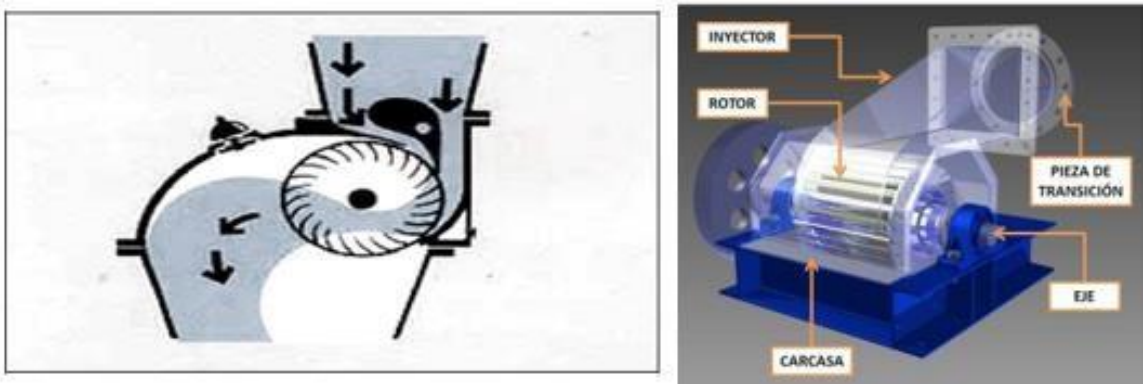


Figura 10. Funcionamiento del inyector de una turbina tipo Michell-Banki [27]

4.5 Tanque de Captación

De acuerdo a lo establecido por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) se denomina toma u obra de captación a toda la estructura hidráulica construida sobre el cauce del río o canal con el fin de captar parcialmente el agua que acarrea, sin permitir que el caudal de diseño sea excedido en mucho durante una creciente, e impidiendo que entre materiales solidos como ramas o piedras. (Figura 11) [14], [28].

Existen diferentes tipos de obras de captación:

- **Obra de captación directa:** Esta obra no contiene ningún tipo de almacenamiento, por lo que el caudal del río debe ser constante durante el año y mayor que el caudal de captación. Esta obra no representa mayor costo y se construyen de forma rectangular.
- **Obra de captación de embalsamiento:** Este consiste en presas que cierran el cauce del río formando un embalsamiento de agua lo cual nos permite almacenar agua del caudal del río para ser utilizadas en épocas de sequía, estas obras son muy costosas.

Para el diseño de este componente se debe tomar en consideración los factores esenciales al rato de construir [28].

- **Sedimento:** El agua del río contiene partículas de material duro que producen daño en la tubería, también puede producir que se bloque la entrada del ingreso al canal.
- **Canal adecuado:** Debido a que el caudal río varía durante todo el año y la PCH es diseñada para mantener un caudal constante por lo que en el caso de que ocurriera una sobrecarga en el canal producirá daños, en este caso la bocatoma

debe, en lo posible, derivar el caudal adecuado hacia el canal, sea que el río tenga mucha o poca cantidad de agua. La función principal del barraje es que el caudal se mantenga, incluso en épocas de estiaje.

- **Turbulencia:** Uno de los principales problemas a los que se acoge al momento de diseñar una PCH son las turbulencias debido a que estos cambios bruscos en todas las direcciones erosionan las estructuras, ocasionan perdidas de energía y acarrean de sedimentos.
- **Perdidas del salto:** Ocasiona que el sistema de generación sea ineficiente ya que habrá una pérdida de energía hidráulica; por otro lado, la tubería de presión deberá estar dimensionada de manera tal que las pérdidas por fricción no reduzcan excesivamente el salto.
- **Golpe de ariete:** Esto se produce principalmente cuando el flujo del agua en la tubería se detiene bruscamente es decir causando un bloqueo repentino originando sobrepresiones muy altas.; la tubería debe ser lo suficientemente fuerte como para no romperse cuando esto suceda.

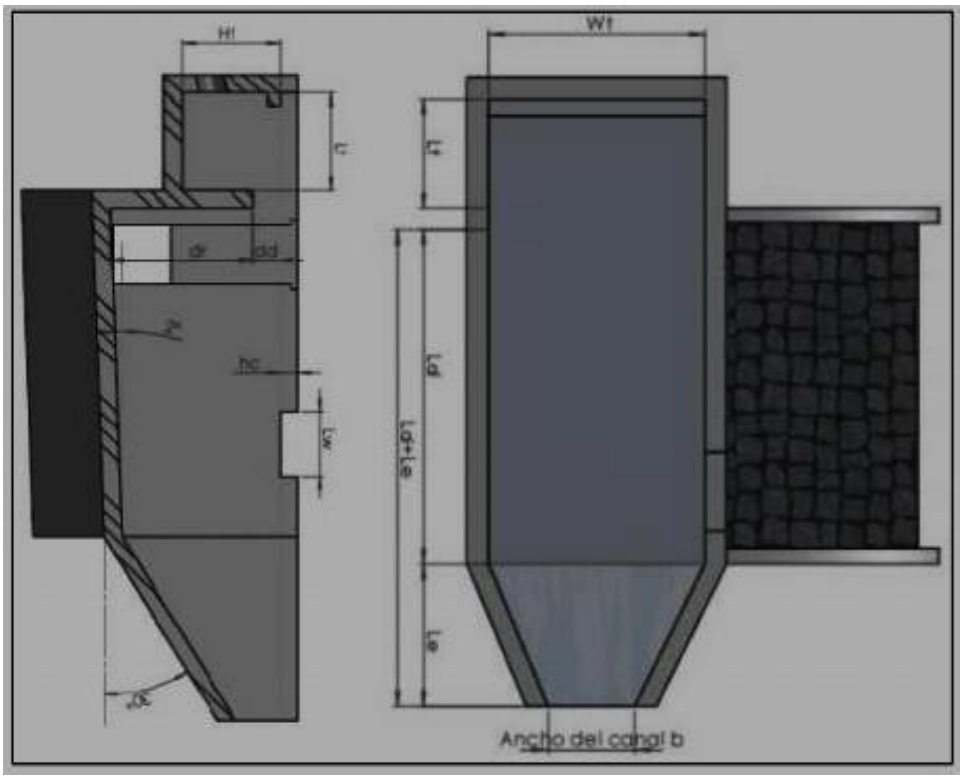


Figura 11. Tanque de Captación [29]

4.6 Bocatomas

Son obras hidráulicas, su función es regular o captar un determinado caudal de agua, en este caso para la producción de hidroenergía sea esta mecánica o eléctrica. También nos permiten tomar el agua de los ríos y conducirla aprovechando la fuerza de la gravedad. (Figura 12) [18], [28].

Las bocatomas suelen caracterizarse principalmente por el caudal de captación, el que se define como el gasto máximo que una obra de toma puede admitir. El propósito fundamental del trabajo de bocatoma es el de recolectar agua desde uno o varios puntos y concentrar este caudal en un solo punto: la entrada al canal de conducción. Lo más importante que se considera son los problemas de la estación en épocas de crecientes, es decir en épocas de lluvia. Las estructuras de la bocatoma se deben ubicar en puntos donde no se vean directamente amenazadas por crecidas de aguas, o indirectamente, por erosiones de tierra a través de los años. Por lo que un estudio geológico e hidrológico y topográfico muy cuidadoso de la zona es de gran importancia [30].

Figura 12. Modelo de Bocatoma [31]

4.6.1 Funciones de las bocatomas

Con la finalidad de presentar las principales funciones que debe cumplir la bocatoma nos basamos según lo expuesto por Balbuena y Capcha en su documento sobre "Informe técnico sobre el Bocatoma de Angasmayo" y para contrastar esta información en la Figura 13 se presenta un modelo de los diferentes tramos para construir una bocatoma [32].

- Se tiene que garantizar la captación de una constante cantidad de agua en especial en épocas de estiaje.
- Impedir el ingreso de materiales sólidos y flotantes hasta la tubería de presión.

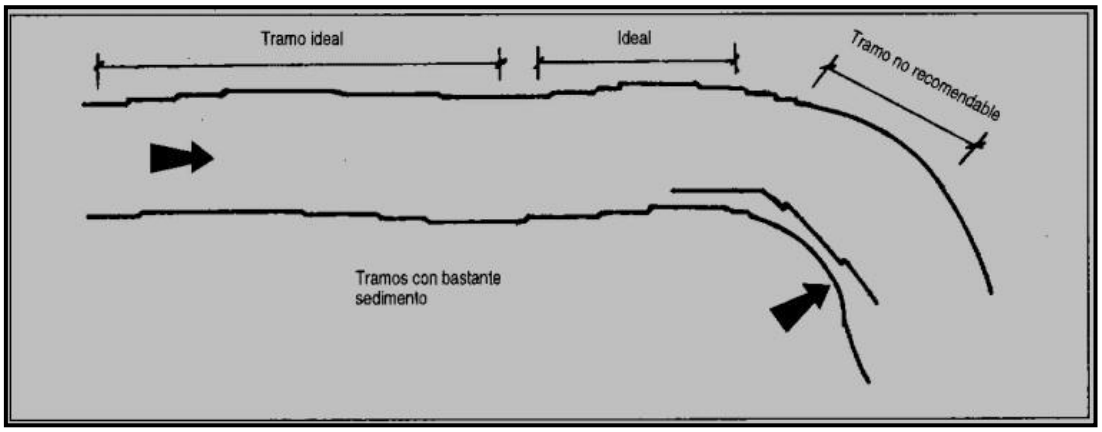


Figura 13. Tramos para instalación de la bocatoma [33]

Una de las mejores ubicaciones para una bocatoma son los tramos rectos y estables del afluente, esto dependiendo de la topografía, la geología, el comportamiento de los suelos y principalmente de las variaciones hidrológicas del lugar que nos sirva de emplazamiento [13].

4.6.2 Clasificación de las bocatomas.

Para clasificar los diferentes tipos de bocatomas existentes nos basamos en lo recomendado por Ortiz, y se representa algunas de las características de una bocatoma en la Figura 14 [29], [34].

Se pueden clasificar:

- Por el material: Concreto, piedra, tierra, madera, etc.
- Por su vida útil: Permanentes o temporales
- Por su forma y diseño: Barraje total. Barraje permanente, espigones, barraje sumergido o del tipo Tirol.
- Por el modo de construcción: Concreto armado emboquillado, mampostería y gaviones.

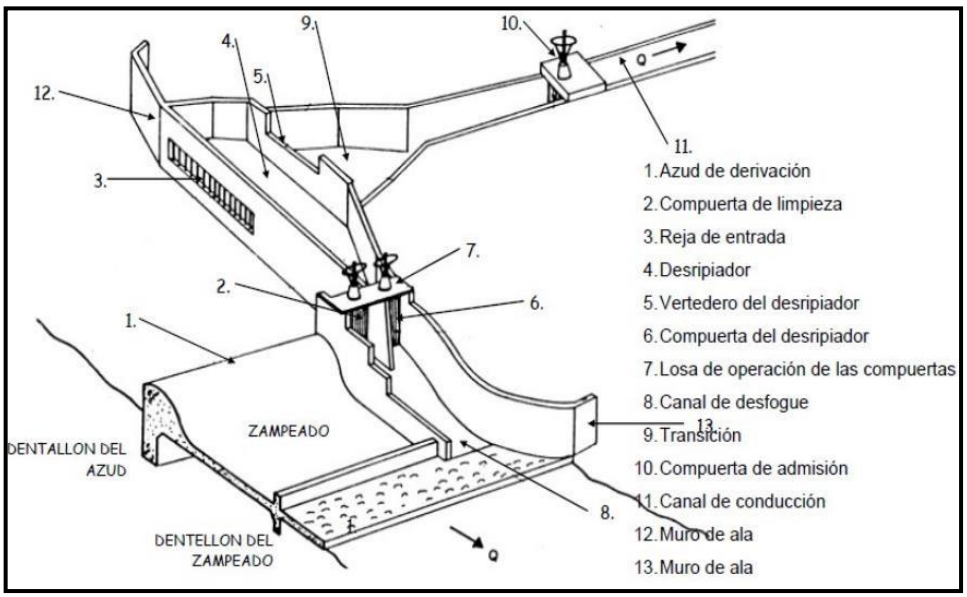


Figura 14. Bocatoma diseñada en dirección con el cauce [33]

4.6.3 Partes de una bocatoma

La bocatoma es parte fundamental para la implementación de una PCH, ya que de esto depende que el tanque de captación siempre posea agua para el normal funcionamiento del sistema, por ende, Ortiz en su libro sobre "Desarrollo de Pequeñas centrales hidroeléctricas" nos presenta las diferentes partes que posee una bocatoma. [27] [29]

1. **Barraje:** Es una estructura de derivación que sirve para eleva los niveles de agua, generalmente se construye en sentido transversal del rio con fines de captación, siempre y cuando sea necesario en casos en que el tirante del rio no sea lo suficientemente grande y no abastezca los requisitos de captación. (Figura 15) [29].

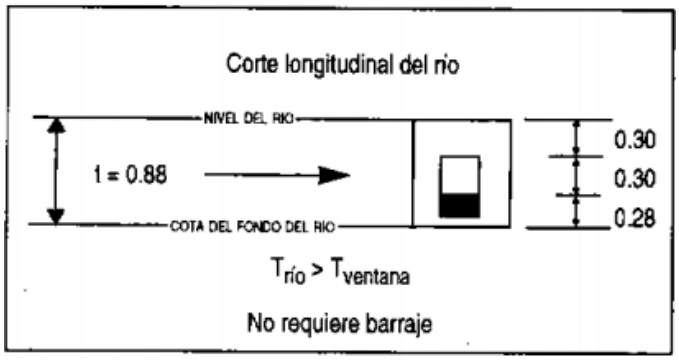


Figura 15. Necesidad de una barraje en una bocatoma [28]

Los barrajes pueden tomar diferentes nombres: Barrajes de derivación, vertedero de derivación, cortinas, presas derribadoras, tanques o azudes.

2. **Descarga de fondo:** Compuerta metálica que sirve para eliminar los materiales que se acumulan delante del barraje, en algunos casos esta compuerta es parte del barraje, su operación se realiza desde un puente construido por encima de dicho barraje.
3. **Solera de captación:** Losa o piso a desnivel respecto de la antecámara, el objetivo de esto es crear un pozo de sedimentación donde se depositen los materiales superiores.
4. **Antecámara:** Área que debido a su desnivel respecto de la solera de captación está destinada a recibir y acumular los materiales de acarreo del río.
5. **Reja de admisión:** Antes de la compuerta de admisión de agua al canal de conducción es conveniente colocar una reja de 5 cm de abertura como máximo. Esta impedirá el ingreso de piedras y materiales flotantes que puedan afectar el funcionamiento del canal.
6. **Compuerta de control de admisión:** Dispositivo generalmente construido en metal, que sirve para controlar, regular o impedir el acceso de agua del río al canal de conducción.
7. **Vertedero o aliviadores:** Esta estructura facilita la evacuación de caudales de agua excedentes o superiores a los que se deseen captar. En épocas de estiaje deben construirse obras complementarias o auxiliadores que permitan la circulación normal de aquellos volúmenes que no se desea que ingrese al sistema [34].
8. **Desarenador:** En épocas lluviosas se acarrean abundantes materiales sólidos tanto de fondo como en suspensión, debido a la erosión que provocan en todo su recorrido, por ello es importante contar con desarenadores o decantadores. Las partículas de diámetro superior a 0.2 mm ocasionan daños en la turbina por lo que deberán ser retenidas y eliminadas al momento. Un buen diseño pondrá especial atención en la velocidad del agua dentro del desarenador y en su longitud, tal cual como se muestra en la Figura 16, en el modelo del desarenador se dispone de un filtro para retención de partículas [34].

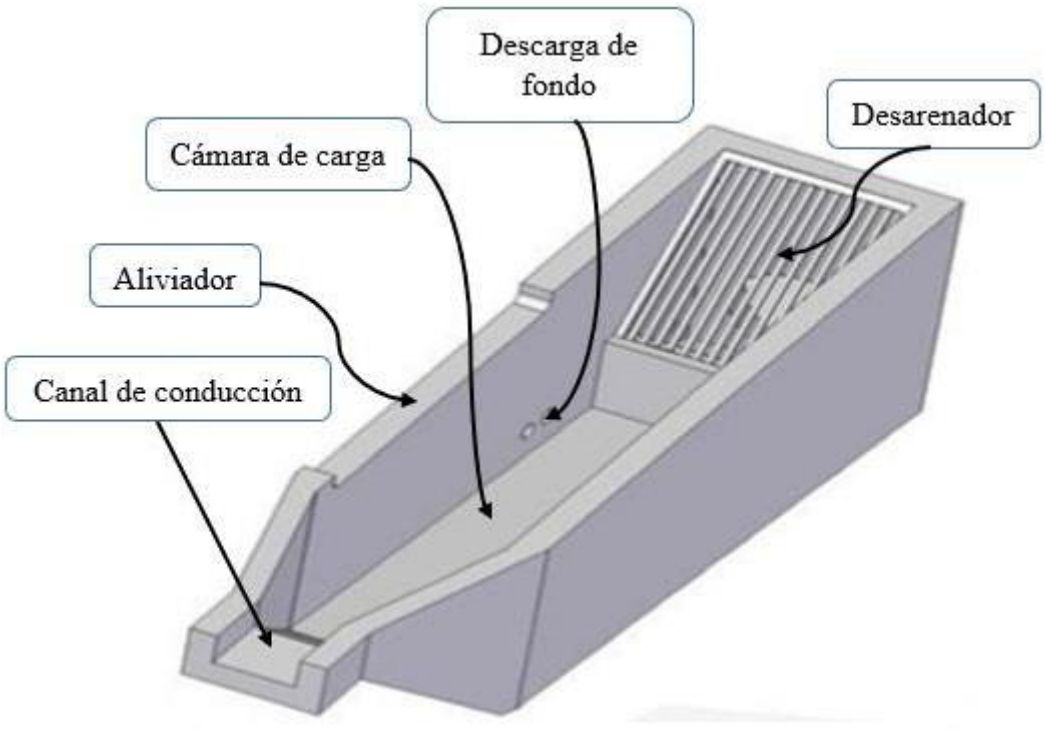


Figura 16. Modelo de Desarenador adaptada de Ortiz [29]

5 Metodología

5.1 Tipo de investigación.

El proyecto establecido utilizará la investigación cuantitativa con enfoques de tipo exploratorio y descriptivo, en la cual se aplicará trabajo de campo para la obtención de datos y análisis cuantitativo, con el fin de generar los resultados que satisfagan los objetivos planteados.

5.2 Diseño de investigación.

En el desarrollo y análisis para la implementación de la Pico-Central Hidroeléctrica se basará el estudio en el siguiente diagrama de proceso que se presenta en la Figura 17.

El proceso inicia desde la búsqueda de la información, así como la estimación de la demanda, la presencia o no del recurso hídrico ya que es la base fundamental para que el proyecto sea viable, posteriormente se realizara una selección del tipo de Pico-Central Hidroeléctrica a implementarse, luego se desarrolla los calculo y el diseño de la PCH para finalmente analizar la construcción e implementación de la PCH.

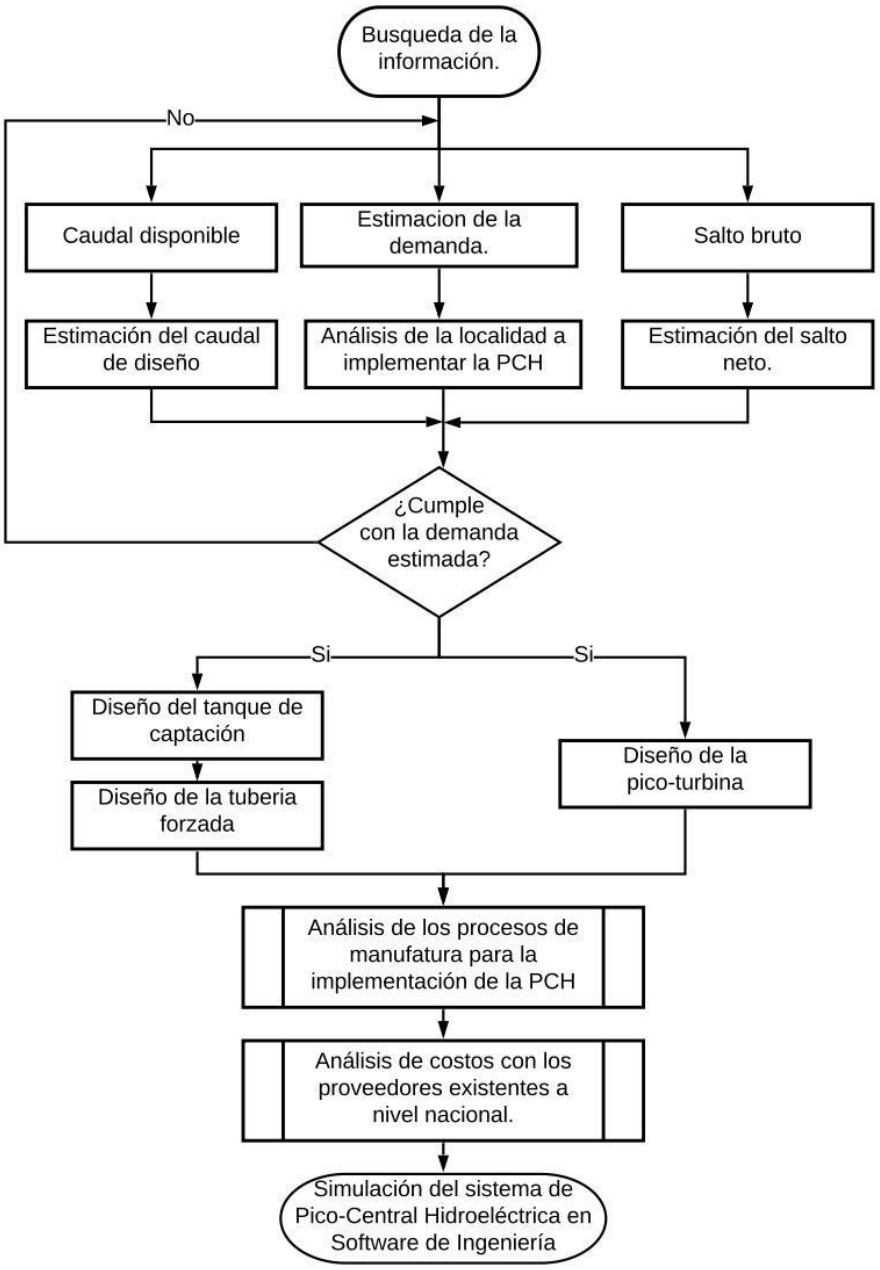


Figura 17. Diagrama de procesos para el desarrollo de una Pico-central

5.3 Parámetros de selección y diseño del tipo de turbina hidráulica.

En esta sección se diseñarán los elementos constitutivos de la Pico-Central Hidroeléctrica para ello partiremos de algunos parámetros básicos.

Como primer punto se tiene el lugar de implantación que es una laguna creada como fines de reservorio, la misma que se encuentra ubicada en el Cantón Paute en las instalaciones del Colegio Técnico Agronómico Salesiano; esta laguna es alimentada por una quebrada de la cual se puede obtener los datos de caudal y salto.

5.3.1 Ubicación Geográfica.

Para obtener la ubicación nos ayudamos de Google maps del cual se puede obtener una idea clara del lugar de implementación eso puede evidenciar en la Figura 18.

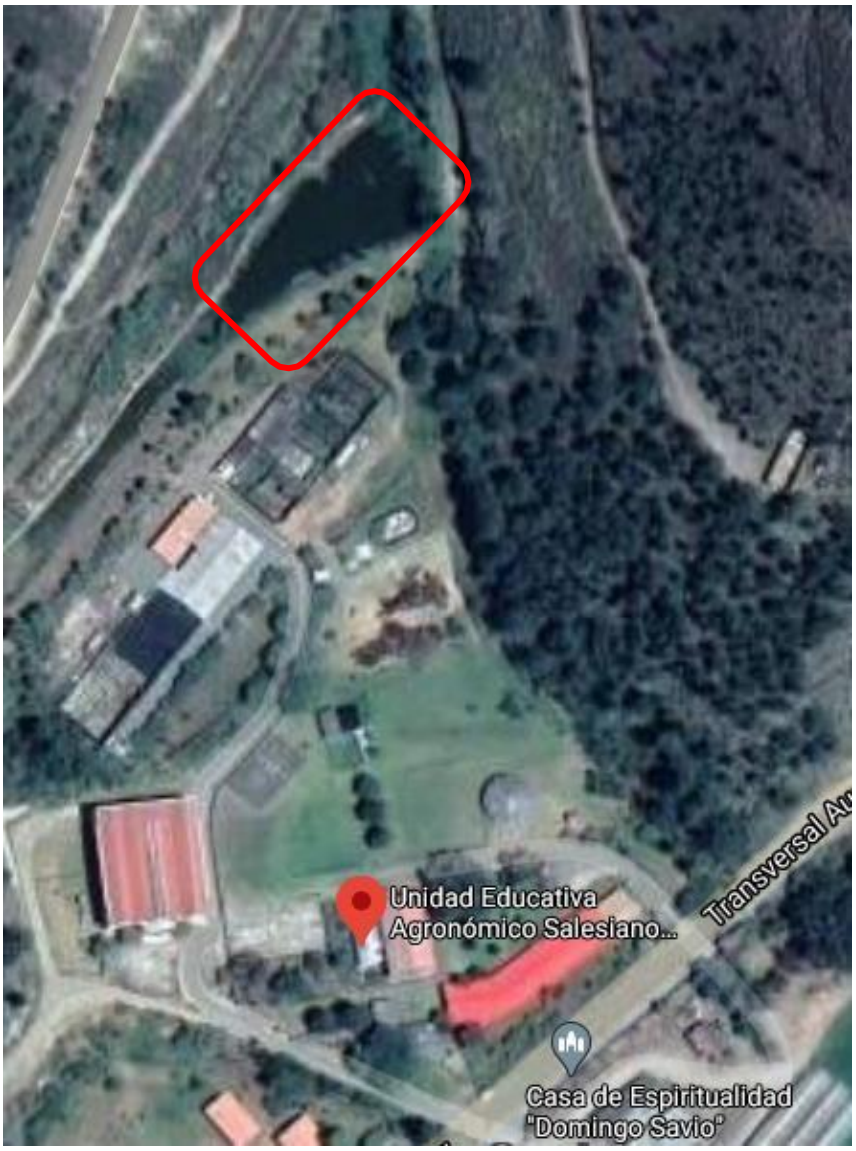


Figura 18. Ubicación de la laguna reservorio.

5.3.2 Estudio topográfico.

Para una buena estructuración del proyecto es necesario definir el sitio donde se puede instalar los diferentes elementos que componen la PCH, de ahí viene la importancia de realizar un estudio topográfico de la zona.

El estudio topográfico se realiza con la ayuda de un equipo de medición digital. Se tomó como referencia la altura de la laguna reservorio y el sitio donde se construirá un tanque de captación que servirá como un medio para conducir el agua a través de la tubería de

presión hacia la turbina. Todo esto permite determinar el salto de agua entre la toma de agua y la ubicación de la turbina a diseñar. (Anexo 3)

Los resultados de la medición topográfica obtenidas son:

-Nivel del tanque de captación: 2210 msnm.

-Nivel del punto 2 a 30m del tanque de captación: 2208 msnm.

-Nivel del punto 3 a 60 m del tanque de captación: 2204 msnm.

-Nivel de la turbina hidráulica: 2203 msnm.

Entonces como resultado final se tendría una altura de 8 m.

5.3.3 Estimación del caudal disponible en el sitio.

Para el presente proyecto se pretende aprovechar la laguna que se ha creado en la Unidad Educativa Agronómico Salesiano de la cuidad de Paute, esta laguna se ha creado con la finalidad de tener un reservorio para la el riego de cultivos dentro del colegio en tiempos de sequía, dicha laguna está alimentada por una vertiente, el mismo que tiene un caudal de $0.2\ m^3/s$ y el reservorio tiene una superficie aproximada de $300\ m^2$ y una profundidad de 6 metros, en tiempos sequia el reservorio llega a ser ocupado hasta la mitad de su capacidad.

Una vez realizada el estudio de cuanto caudal se tiene disponible en el sitio, se llegó a la conclusión de que se tomará 0.13 m^3/s que serán aprovechado del reservorio este con la finalidad de garantizar el funcionamiento de la Pico-Central Hidroeléctrica hasta en épocas de sequía; con este valor de caudal y teniendo en cuenta el salto aprovechable se procede a seleccionar y diseñar la turbina hidráulica.

5.3.4 Parámetros para el diseño de la PCH.

Para el diseño de la Pico-Central Hidroeléctrica se realizó un estudio de la laguna del Colegio Técnico Agronómico Salesiano Paute, ya que es el sector donde se implementará el picogenerador del cual se obtuvo valores de caudal y salto aprovechable:

$$Datos\ de\ diseño: \begin{cases} Salto\ neto\ aprovechable\ h_{dispo} = 8m \\ Caudal\ maximo\ de\ diseño\ Q = 0.13\ \dfrac{m^3}{s} \end{cases}$$

5.3.5 Cálculo de la potencia disponible en el sistema.

Para el cálculo de la potencia del sistema se parte usando la ecuación 1 en el cual dice

que la Potencia hidráulica es igual a la densidad ρ ($^{kg}/_{m}{}^{3}$) multiplicado por el salto

neto disponible h_{dispo} (m), esto multiplicado por el caudal $Q\ (m^3/s)$ y también

multiplicado por la gravedad $g\ (m/s^2)$ resultado de esta operación se obtiene el valor de la potencia hidráulica en (kW) [35]

$$H_{Bruto} = 8m$$

$$Factor\ de\ firccion: 0.25 \therefore \Delta H_t = 0.25 * 8m = 2$$

$$H_{neto} = H_{Bruto} - \Delta H_t = 8m - 2m = \mathbf{6\ m}$$

$$P_{hidraulica} = \rho * h * Q * g \tag{1}$$

Remplazando valor en la ecuación 1 da como resultado:

$$P_{hidraulica} = (1000\ kg/m^3)\ (6m)\ (0.13\ m^3/s)\ (9.81\ m/s^2) = 7.65\ kW$$

Para encontrar la potencia mecánica se debe multiplicar este valor de potencia hidráulica por un valor de eficiencia que tiene la turbina al transmitir esta potencia, para el caso de las turbinas Michell - Banki se usa una eficiencia de $\eta = 0.8$. [35]

$$P_{mecanica} = P_{hidraulica} * \eta \tag{2}$$

$$P_{mecanica} = (7.65kW)(0.8) = 6.12\ kW$$

Esta potencia mecánica es transmitida a un generador eléctrico en donde también hay perdidas ya sea por el sistema de transmisión de potencia o del mismo generador, pues la eficiencia para este tipo de sistemas turbina - generador es de $\eta = 0.8$. Del resultado de esta operación se obtiene la potencia eléctrica siendo este es el valor entregado para el usuario final [35]

$$P_{electrica} = P_{mecanica} * \eta \tag{3}$$

$$P_{electrica} = (6.12kW)(0.8) = \mathbf{4.9\ kW}$$

Como se puede ver la potencia generada por la PCH cumple con lo requerido y está dentro del rango de un valor para ser considerada una Pico-Central Hidroeléctrica, bajo los parámetros de caudal y salto disponibles para la implementación, pues una vez determinada la potencia se procede a realizar los cálculos para el diseño de la turbina.

5.4 Selección del tipo de turbina.

Una de las maneras más frecuentes y adecuadas para la selección del tipo de turbina es el diagrama altura vs. caudal el cual está orientado para pequeñas centrales hidroeléctricas este diagrama se observa en la Figura 19 [36].

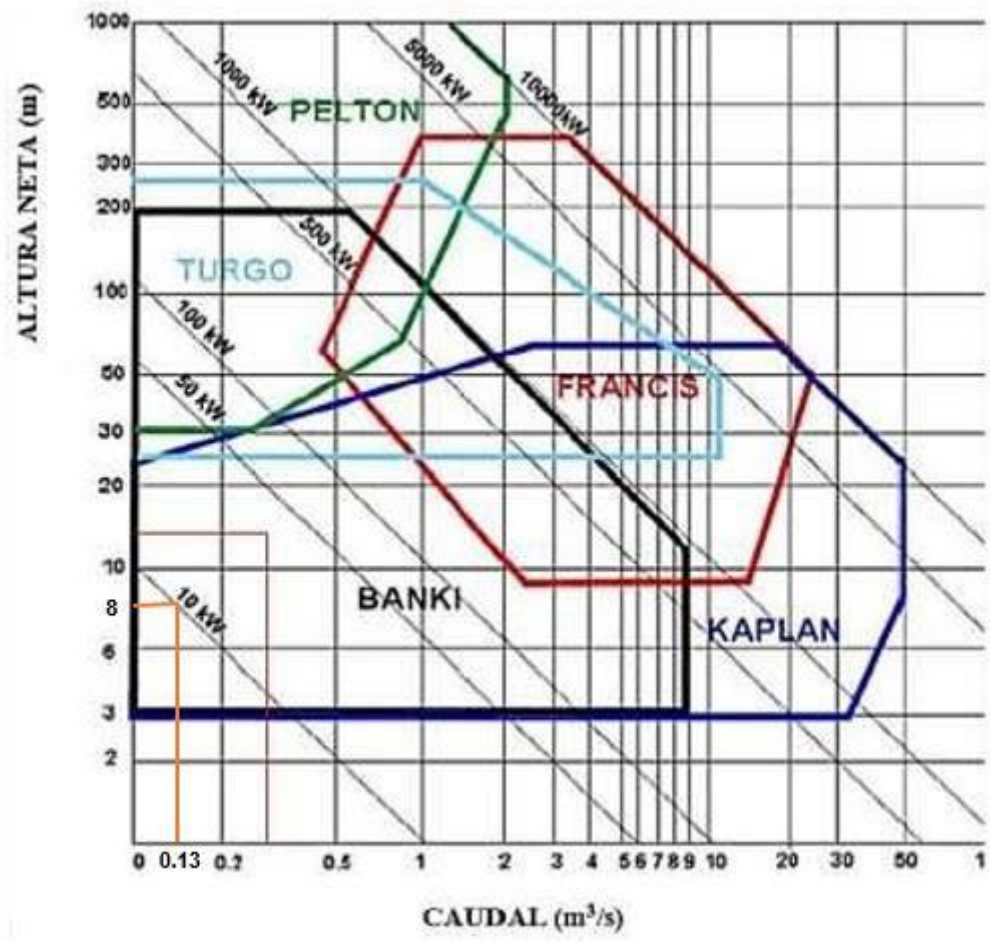


Figura 19. Relación salto vs. caudal para diferentes turbinas [36]

Tomando como base los datos como caudal y salto mostrados anteriormente se tiene $Q_{min} = 0.13\frac{m^3}{s}$ y $H_b = 8m$ disponibles en el lugar donde se va a instalar la PCH, realizando un análisis se puede observar que las turbinas que se encuentran dentro del rango de operación con estos datos, son las turbinas Kaplan y Michell-Banki.

Por lo tanto, es necesario realizar una matriz de ponderación la cual facilitará la selección de la turbina esta matriz se muestra en la Tabla 2 con sus respectivos valores.

Para la realizar la matriz de ponderación se tomará en cuenta los criterios más importantes definidos a continuación:

- **Mantenimiento:** Se requiere que el mantenimiento de la turbina contenga la menor cantidad de acciones y su puesta en marcha tarde lo menos posible.
- **Construcción:** La construcción de la turbina debe conllevar la menor complejidad y costos de fabricación, de tal manera que su construcción se lo pueda realizar con materiales accesibles en el medio local y una mano de obra

baja.

- **Eficiencia:** Se desea que la turbina opere con una mayor eficiencia durante un amplio periodo de tiempo.
- **Variación de caudal:** Para el presente diseño se debe tener en cuenta lavariación del caudal existente en el canal de riego, siendo el parámetro más importante al momento de la selección de la turbina.

Tabla 2. Matriz de ponderación para la selección del tipo de turbina adecuada.

Criterio	**Ponderación**	**Calificación.**		**Ponderación.**	
		Michell-Banki	Kaplan	Michell-Banki	Kaplan
Mantenimiento	2	1	0.5	2	1
Construcción	3	1	0.5	3	1.5
Eficiencia	3	0.5	1	1.5	3
Variación del caudal	2	1	0,5	2	1
Total	10	-	-	**8.5**	**6.5**

Teniendo en cuenta los parámetros mencionados se asignará un valor a cada uno de los criterios considerandos importantes para el buen funcionamiento de la turbina.

Una vez realizada la ponderación a cada turbina se puede ver que la más adecuada para la PCH es la Michell-Banki o también llamada de flujo cruzado.

5.5 Diseño y cálculo de los mecanismos de la turbina.

El diseño de una turbina se realiza para definir las dimensiones de cada una de sus piezas, que ensambladas conformaran la turbina como máquina [2].

En este diseño se debe considerar sistemas adecuados de montaje, así como aspectos de hermeticidad y lubricación para que la turbina tenga su óptimo funcionamiento lo que desencadena en una mayor eficiencia del conjunto turbina – generador [2].

El diámetro del rodete de una turbina hidráulica tipo Michell-Banki (Figura 20) no depende del caudal. Esta premisa facilita el diseño pues otorga al diámetro el carácter de parámetro independiente [2].

Esto se afirma por el hecho de que esta turbina puede trabajar dentro de un amplio rango de velocidades de rotación. De acuerdo con esto el diámetro podrá ser seleccionado en primer término [2].

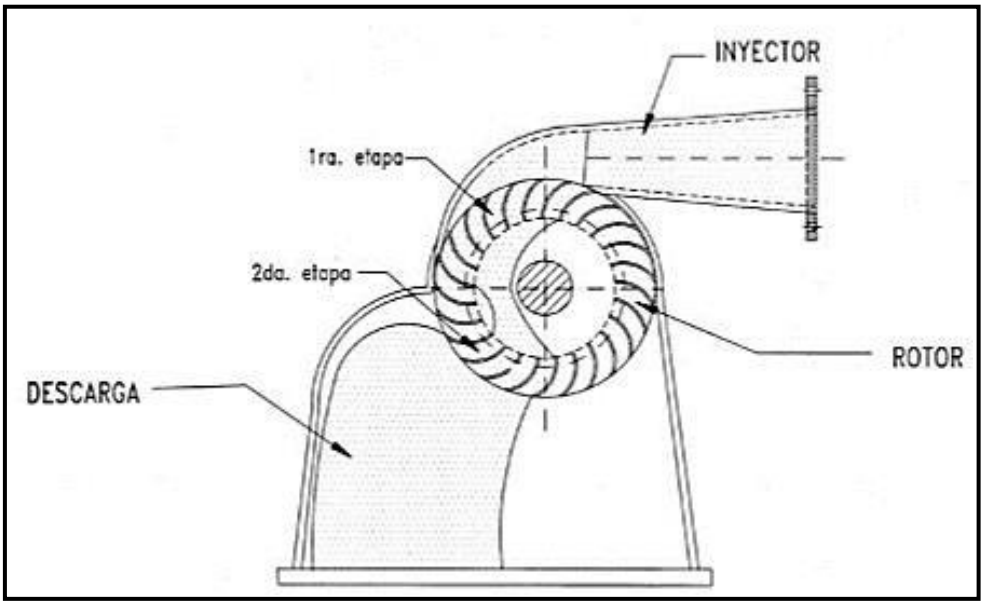


Figura 20. Diagrama Turbina Michell-Banki [25]

Para pequeños aprovechamientos hidroenergéticos los diámetros comúnmente utilizados van desde los 200 mm hasta los 500 mm. Lo que se hace frecuentemente es seleccionar el diámetro de los diagramas de estandarización que ofrece la bibliografía disponible y tomar a éste como base del diseño [24].

Para este diseño se propone un diámetro exterior del rodete de 300 mm, ya que resulta adecuado para la mayoría de saltos, la velocidad de giro de este rodete oscilará entre 200 y 700 rpm [24].

Para todo el diseño, las ecuaciones para el cálculo y lineamientos a seguir, se tomará como referencia el libro propuesto por la OLADE "*Apuntes para un manual de diseño estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas"* [24], el cual presenta una guía de cómo desarrollar turbinas tipo Michell-Banki para PCH.

Por ende, al tener la primicia de que el diámetro del rodete no depende del caudal ni del salto aprovechable y siguiendo la Guía recomendada por la OLADE se selecciona un diámetro óptimo para el rango de caudal que disponemos.

$$Diametro\ exterior\ del\ rodete\ D = 0.3\ m$$

5.5.1 Número óptimo de revoluciones en RPM.

Para el cálculo del número óptimo de revoluciones se usa la ecuación 4, mismo que dependen del saldo disponible ay del diámetro exterior del rodete ambos en metros.

$$n = 39{,}85\frac{\sqrt{H}}{De} \tag{4}$$

$$n = 39.85\ \frac{\sqrt{(8\ m)}}{(0.3\ m)} = \mathbf{375.71\ rpm}$$

5.5.2 Comprobación de la aplicación de la turbina Michel Banki con los parámetros seleccionados.

Una vez obtenido el número óptimo de revoluciones se procede a realizar el cálculo del número específico de revoluciones, con la finalidad de comprobar si es que la turbina Michel Banki realmente se puede aplicar en el proyecto, con los parámetros de diseño que tenemos.

En el mismo libro de la OLADE nos presenta la Tabla 3 en el cual se muestran los rangos de aplicación de diferentes turbinas y que está elaborado luego de algunos estudios realizados a lo largo de la historia en los diferentes tipos de turbinas.

Tabla 3. Aplicación de los diferentes tipos de turbinas según el Nq y Ns [21]

Rango de aplicación de Turbinas Hidráulicas.

Tipo de Turbina	Nq	Ns
Turbina Pelton de 1 tobera	Hasta 9	Hasta 30
Turbinas Pelton de 2 toberas	4 – 13	14 – 42
Turbinas Pelton de 3 toberas	5 – 22	17 – 73
Turbinas Michell – Banki	18 – 60	60 – 200
Turbinas Francis Lenta	18 – 38	69 – 125
Turbinas Francis Normal	38 – 68	125 – 225
Turbinas Francis Rápidas	68 – 135	225 – 450
Turbina Axial	105 – 300	350 - 1000

En donde N_q se calcula con la ecuación 5, en el cual intervienen el caudal y el salto como parámetros de diseño que disponemos:

$$N_q = n * \frac{\sqrt{Q}}{H^{\frac{3}{4}}} \tag{5}$$

$$N_q = (375.7\, rpm) * \frac{\sqrt{0.13\ m^3/s}}{(8)^{\frac{3}{4}}} = \mathbf{30.58}$$

Con este resultado y con base a la tabla anterior se observa que sí es posible la aplicación de una turbina Michell Banki en este proyecto, ya que los valores de Nq están dentro de su rango de aplicación.

5.5.3 Diagrama de velocidades.

Los perfiles de los álabes del rodete de una turbina se determina en base a los diagramas de velocidad en cada punto del rodete, en la Figura 21 se pueden observar el triángulo de velocidades a la entrada y a la salida del rodete [24].

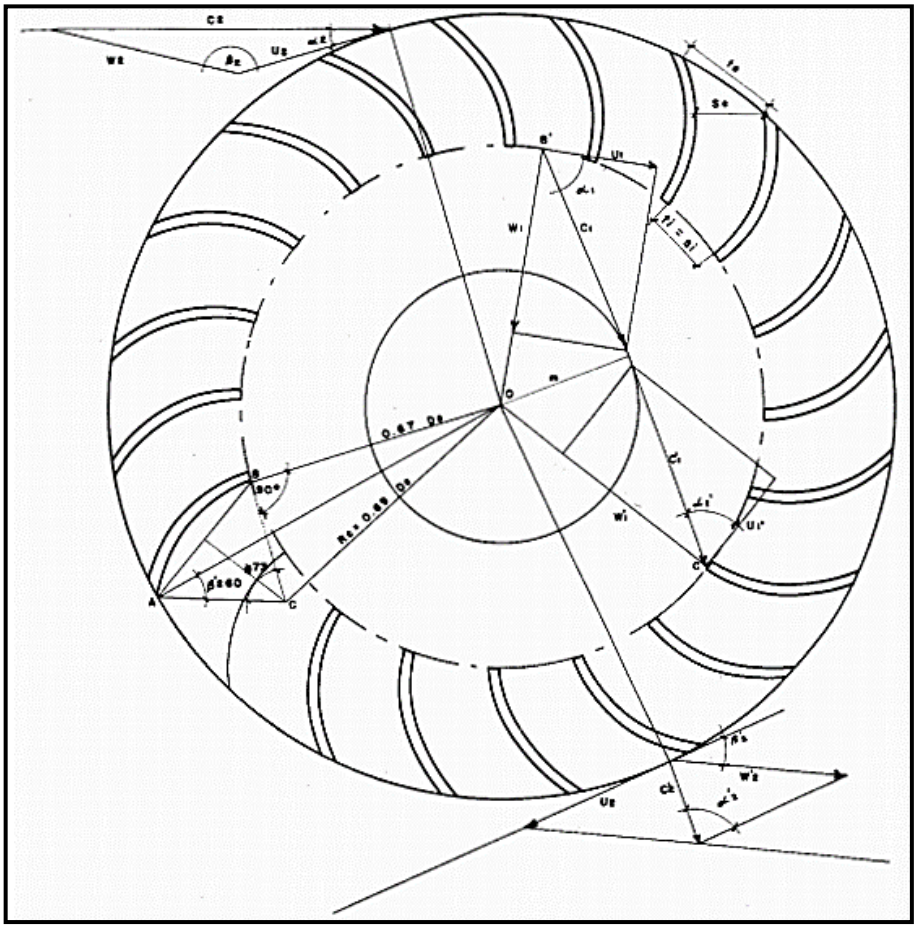


Figura 21. Gráfico para la determinación del triángulo de velocidades [2]

Para determinar estos diagramas es necesario definir la velocidad de salida del agua del inyector, la que se determina en base a la ecuación de Bernoulli [24].

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{{C_0}^2}{2 * g} + Z_1 = \frac{P_i}{\gamma} + \frac{{C_i}^2}{2 * g} + Z_i + \Delta H_t + \Delta H_i \tag{6}$$

en donde:

$C_0 - C_i$: Representan la velocidad de una partícula de agua en la superficie del reservorio y en la salida del inyector.

$P_0 - P_i$: Representan las presiones en la superficie del reservorio y en la salida del inyector respectivamente. Se pueden considerar iguales a la atmósfera cuando la descarga de turbina se realiza sin tubo de succión.

$Z_0 - Z_i$: Representan los desniveles topográficos en la superficie del reservorio y la posición el inyector respectivamente, su diferencia es igual al salto bruto.

$\gamma\ y\ g$: Son el peso específico del agua y la gravedad respectivamente.

ΔH_t: Perdida de presión por efecto de la fricción del agua con las paredes de la tubería de presión.

ΔH_i: Perdida de presión por efecto de la fricción del agua con las paredes del inyector.

De esta ecuación se puede determinar la velocidad del agua a la salida del inyector.

$$C_i = \sqrt{1 - \frac{\Delta H_i}{H}} * \sqrt{2 * g * H} \tag{7}$$

En donde: H es el salto efectivo o salto neto de la Pico-Central obtenido de la diferencia entre el salto bruto y las pérdidas de presión en la tubería [24]. Asimismo, se define Kc como el coeficiente de velocidad del inyector y está dado por:

$$Kc = \sqrt{1 - \frac{\Delta H_i}{H}} \tag{8}$$

Con lo cual la velocidad a la salida del inyector queda expresada por:

$$C_i = Kc\sqrt{2 * g * H} \tag{9}$$

En una forma práctica Kc posea valores comprendidos entre 0.97 y 0.98.

$$C_i = 0.98\sqrt{2\,(9.81\,\frac{m}{s^2})\,(8\,m)} = \mathbf{12.27}\,\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{s}};\ C_i = C_2$$

La velocidad del agua a la salida del inyector es igual a la velocidad de ingreso del agua al rodete. Este chorro de agua a su vez se orienta hacia el rodete con un ángulo promedio denominado α_2 el cual posee valores prácticos que se encuentran alrededor de los 16 grados [24].

Las turbinas de acción la velocidad tangencial al rodete se expresa como:

$$U_2 = K_u * C_2 * \cos(\alpha_2) \tag{10}$$

Siendo K_u el coeficiente de velocidad tangencial que para el caso de las turbinas de acción poseen un valor aproximado a 0.5

$$U_2 = (0.5)\,(12.27\,\frac{m}{s})\cos(16) = \mathbf{5.897}\,\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{s}}$$

Con lo anterior expresado se puede determinar la velocidad relativa con la siguiente expresión:

$$W_2 = C_2 * \sqrt{1 - K_u(2 - K_u)\cos^2(\alpha_2)} \tag{11}$$

$$W_2 = (12.27\,\frac{m}{s})\sqrt{1 - 0.5(2 - 0.5)\cos^2(16)} = \mathbf{6.798}\,\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{s}}$$

Y luego se calcula el ángulo β_2 y con este último dato se procede a la construcción del diagrama de velocidades en la entrada del rodete.

En el interior del rodete se cumplen que los triángulos de velocidades son iguales debido a que:

$$U_1 = U'_2$$

$$C_1 = C'_2$$

$$\alpha_1 = \alpha'_2$$

$$\beta'_1 = 180 - \beta_1 \therefore \beta'_1 = \beta_1 = 90$$

A la salida del rodete se forma un diagrama de velocidades en el que:

$$U'_2 = U_2 = K_u * C_2 * \cos(\alpha_2) \tag{12}$$

$$U' = U = (0.5)\,(12.27\,\frac{m}{s})\,(\cos 16) = \mathbf{5.89}\,\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{s}}$$

2 2 s $\boldsymbol{s}$

$$\beta_2 = 180 - \beta'_2$$

El ángulo entre los álabes del rodete esta expresada por la ecuación 13

$$\beta'_2 = \sin^{-1}\frac{\sin\alpha_2}{\left(\sqrt{1 - K_u(2 - K_u)\cos^2(\alpha_2)}\right)} \tag{13}$$

$$\beta'_2 = \sin^{-1}\left(\frac{\sin 16}{\sqrt{1 - 0.5(2 - 0.5)\cos^2(16)}}\right) = \mathbf{29.83°}$$

La velocidad relativa estaría expresada por:

$$W'_2 = K_f * W_2 \tag{14}$$

Donde K_f es el coeficiente de velocidades relativas que expresa la perdida por fricción del agua con los álabes del rodete y su valor es aproximado a 0.98.

$$W'_2 = (0.98)\,(6.798\,\frac{m}{s}) = \mathbf{6.66}\,\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{s}}$$

Con esta velocidad se obtiene la velocidad absoluta del agua a la salida del rodete, expresado por:

$$C'_2 = C_2\sqrt{K_f^2(1 - K_u(2 - K_u)\cos^2(\alpha_2)) + K_u^2\cos^2(\alpha_2) - 2K_f\cos^2(\alpha_2)(1 - K_u)K_u} \tag{15}$$

$$C'_2 = (12.27\,\frac{m}{s})\sqrt{(0.98)^2(1 - 0.5(2 - 0.5)\cos^2(16)) + 0.5^2\cos^2(16) - 2(0.98)\cos^2(16)\,(1 - 0.5)0.5}$$

$$C'_2 = \mathbf{6.766}\,\frac{\boldsymbol{m}}{\boldsymbol{s}}$$

Todas estas velocidades se pueden expresar en forma práctica cuando se definen las constantes. Así: $\alpha_2 = 16°$, $K_c = 0.98$, $K_u = 0.5$ y $K_f = 0.98$, obtenemos las siguientes expresiones prácticas.

$$C_2 = 4.34 * \sqrt{H} \rightarrow 4.34 * \sqrt{8} = \mathbf{12.27}\ \boldsymbol{m/s}$$

$$U_2 = 2.09 * \sqrt{H} = 2.09 * \sqrt{8} = \mathbf{5.91}\ \boldsymbol{m/s}$$

$$W_2 = 2.40 * \sqrt{H} = 2.40 * \sqrt{8} = \mathbf{6.78}\ \boldsymbol{m/s}$$

La velocidad relativa a la

salida del rodete esta expresada por la ecuación 16.

$$W'_2 = 2.35 * \sqrt{H} \tag{16}$$

$$W'_2 = 2.35 * \sqrt{8} = \mathbf{6.64\ m/s}$$

$$\beta'_2 = 29.83° \cong 30°$$

$$\beta_1 = 90$$

Como se puede observar los diagramas de velocidades dependen del salto y los ángulos son independientes de las condiciones de salto y caudal.

La eficiencia hidráulica de la turbina Michel Banki se obtiene de la siguiente expresión deducido a partir de la ecuación general para la eficiencia de las turbinas.

$$\eta_h = 2 * K_c^2 * \cos\alpha_2 * K_u(1 - K_u) * (1 - K_f) \qquad (17)$$

Para determinar la eficiencia total de la turbina se debe considerar las perdidas volumétricas, las perdidas por choques y las perdidas mecánicas. En las turbinas Michel Banki su eficiencia puede alcanzar el 82% cuando se obtiene buenos acabados en su fabricación [24].

5.5.4 Número de álabes.

La selección del número de álabes se realizará con base en el diámetro y las condiciones de funcionamiento de la turbina, es decir, altura y caudal [24].

Tabla 4. Parámetros característicos en turbinas ensayadas por diferentes investigaciones [25]

Referencia	D/d	D/B	Z	η_h
YOKOHAMA, 1985, JAPÓN	0.66	4.25	26	80.60
VIGM, 1986, CCCP	0.63	3.00	24	78
GANZ, 1984, HUNGRIA	0.66	1.00	30	75.00
ALABAMA, 1983, USA	0.66	0.25	20	75.00
RESITA, 1983, RUMANIA	0.66	1.28	24	73.00
KTU, 1987, TRAZBON, TURKIA	0.54	0.81	24	71.30
OREGON, 1949, USA	0.66	1.09	20	68.00
VDI, 1981, ETIOPIA	0.67	3.26	36	66.00
LOS ANDES, 1973, COLOMBIA	0.62	1.87	27	60.60
ODTU, 1985, ANKARA, TURKIA	0.83	1.44	30	55.50

Se deberá tener en cuenta que un reducido número de álabes provocará pulsaciones en la generación de la potencia y un número elevado producirá una aceleración de la vena fluida con el consecuente aumento de las pérdidas y el efecto de reja [2].

Según las investigaciones de A. Ulku y H. Olgun existe un número óptimo de álabes. En la Tabla 4 se transcriben los resultados de diferentes investigaciones reflejadas en la literatura.

De esta tabla se desprende que el número óptimo de álabes está entre 24 y 30.

Por lo tanto, para nuestro proyecto el número de álabes en relación a la tabla y a su rendimiento será:

$$\boldsymbol{Z = 24}$$

5.5.5 Geométrica del rodete.

La geometría del rodete (Figura 22) se determina con base en los ángulos obtenidos de los diagramas de velocidades encontrados anteriormente.

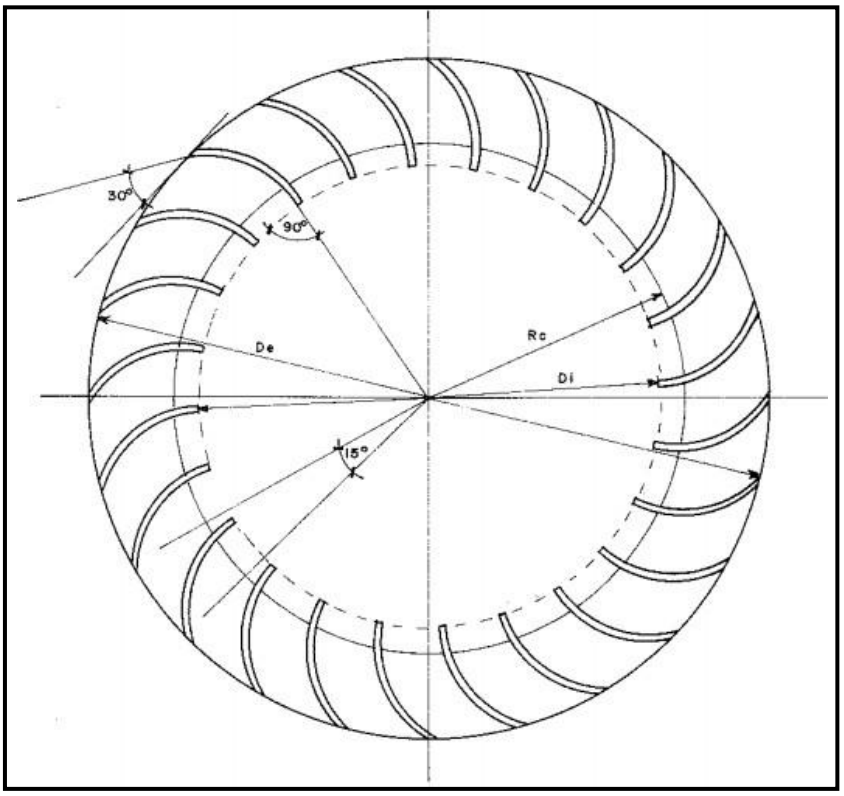


Figura 22. Cotas dimensionales del rodete. [37]

Como el ángulo $\alpha_2 = 16°$ y además teniendo presente que $k_u = 0.5$, se puede usar la ecuación simplificada para determinar el diámetro interno del rodete en donde irán soldadas los álabes.

$$\boldsymbol{D_i = 0.67\, D_e \rightarrow D_i = 0.67\,(0.3m) = 0.201\, m}$$

El radio de curvatura de los álabes del rodete se expresa en función del diámetro del rodete y del ángulo del álabe β'_2;

$$r = \frac{D_e}{4 * \cos\beta'_2}\left|1 - \left|\frac{D_i}{D_e}\right|^2\right| \tag{18}$$

Remplazando los valores conocidos se tiene la forma simplificada:

$$\boldsymbol{r = 0.163\, D_e} \rightarrow r = 0.163(300\, mm) = \boldsymbol{48.9\, mm}$$

El ángulo de curvatura de los álabes del rodete se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\theta = \tan^{-1}\left|\frac{\cos\beta'_2}{\frac{D_i}{D_e} + \sin\beta'_2}\right| \tag{19}$$

$$\theta = \boldsymbol{73.01°}$$

Para el diseño de turbinas Michell – Banki también se debe considerar que desde el punto de vista teórico existe una limitante en cuanto al arco de admisión expresado por:

$$\sphericalangle BOC = 2\tan^{-1}\left|\frac{\sqrt{1 - k_u(2 - k_u)(\cos\alpha_2)^2}}{\left|\frac{D_i}{D_e}\right| k_u(\cos\alpha_2)}\right| \tag{20}$$

$$\sphericalangle BOC = \boldsymbol{119.88}$$

El diámetro máximo del eje que soportará a todo el cuerpo del rodete se obtiene a través de la siguiente expresión práctica:

$$d_{eje} = 0.328 * D_e \tag{21}$$

$$d_{eje} = 0.098\, m = \boldsymbol{98.4\, mm}$$

Una vez realizado todos los cálculos, en la Tabla 5 se presenta el resumen de todos valores obtenidos para nuestro rodete.

Con base en el manual de la OLADE para construcción de turbinas Michell – Banki el cual nos especifica que el espesor de los álabes y las placas en donde se soportarán los álabes del rodete deben ser impuesto por el diseñador; hemos propuesto un espesor para

los álabes de 2 mm y para las placas de soporte de 3 mm, estos espesores posteriormente

serán comprobados con la realización del cálculo de los esfuerzos que soportarán estos materiales.

Tabla 5. Dimensiones del perfil para el rodete.

Dimensiones del perfil del rodete.
$\boldsymbol{D_{externo-rodete} = 300mm}$
$\boldsymbol{D_{interno-rodete} = 201mm}$
$\boldsymbol{r_{alabes} = 48.9mm}$
$\boldsymbol{\theta_{angulo\ de\ curvatura-alabes} = 73.01\ °}$
$\boldsymbol{\sphericalangle BOC_{Arco\ de\ admision\ del\ rodete} = 119.88}$
$\boldsymbol{d_{max-eje} = 98.4\ mm}$
$\boldsymbol{Z = 24}$

En el Anexo 1 se presenta el dibujo del elemento con sus respectivas dimensiones.

5.5.6 Geometría del inyector.

Para definir la geometría del inyector es necesario considerar en el diseño una buena conducción y aceleración del flujo de agua. Así como también una adecuada orientación y regulación de este flujo hacia los álabes del rodete. (Figura 23)

Una geometría de inyector con álabe directriz requiere definir el perfil del mismo, considerando un balance de pérdidas de presión en los flujos de agua en que se divide el caudal por efecto del álabe.

La única dimensión que varía en función del salto y caudal con el que se diseña la turbina es el ancho del inyector, el cual se calcula con la ecuación 22:

$$B = \frac{Q}{P(\pi * D_e - e * Z)K_o * K_c * \sqrt{2 * g * h} * \sin \alpha_2} \qquad (22)$$

B: Ancho interno del inyector expresado en metros.

Q: Caudal máximo que fluirá por la turbina en $m^3/_S$.

P: Factor de arco de admisión que para el caso del inyector tiene un valor de 1.

D_e: Diámetro exterior de rodete, expresado en metros.

e: Espesor de los álabes del rodete, expresado en metros.

Z: Número de álabes del rodete.

K_o: Porcentaje de circunferencia exterior del rodete por dónde ingresa el agua.

De las diferentes geometrías de inyectores existentes para este tipo de turbinas de eligen el que se presenta a continuación.

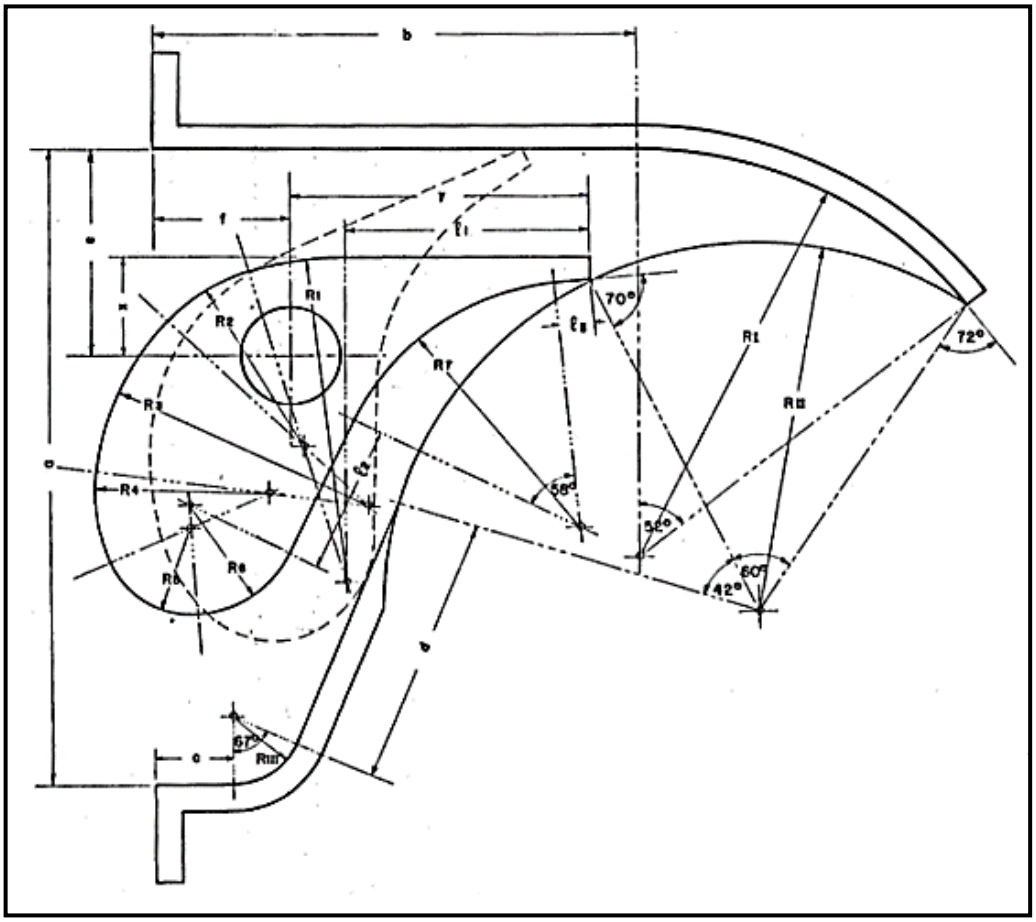


Figura 23. Cotas dimensionales para el inyector de la turbina. [37]

Una ecuación práctica para determinar el ancho del inyector es la siguiente:

$$B_{inyector} = \frac{0.96 * Q}{D_e * \sqrt{H_{neta}}} \tag{23}$$

Para el caso de nuestro proyecto el inyector debe tener un ancho igual a:

$$B_{inyector} = \frac{0.96 * 0.15 \frac{m^3}{s}}{0.3m * \sqrt{6m}} = \mathbf{0.196\ m}$$

Al igual que en el rodete, luego de realizar los cálculos para el inyector, en la Tabla 6 presentamos en detalle todas las dimensiones a tomar en cuenta al momento de diseñar el

inyector de nuestra turbina, en el anexo 1 se presenta el dibujo de los elementos con sus respectivas dimensiones.

Tabla 6. Cotas dimensionales del perfil del inyector.

Dimensiones del perfil del inyector.			
$\boldsymbol{D_{externo-rodete} = 300mm}$			
Cota	Medida en mm	**Cota**	Medida en mm
$\boldsymbol{A}$	261	$\boldsymbol{R_3}$	31
$\boldsymbol{B}$	195	$\boldsymbol{R_4}$	60
$\boldsymbol{C}$	31	$\boldsymbol{R_5}$	100
$\boldsymbol{D}$	102	$\boldsymbol{R_6}$	70
$\boldsymbol{a}$	85	$\boldsymbol{R_7}$	133
$\boldsymbol{B}$	55	$\boldsymbol{x}$	35
$\boldsymbol{R_I}$	168	$\boldsymbol{y}$	116
$\boldsymbol{R_{II}}$	151	$\boldsymbol{l_1}$	51
$\boldsymbol{R_{III}}$	28	$\boldsymbol{l_2}$	98
$\boldsymbol{R_1}$	94	$\boldsymbol{l_3}$	20
$\boldsymbol{R_2}$	39		

5.5.7 Diseño y cálculos del rodete.

Para realizar el cálculo de esfuerzos y momentos, se considera a los álabes como una viga empotrada en sus extremos ya que irán soldados con las placas del rodete (Figura 24). Además, el material usado para la construcción del rodete será un AISI 316 que es un tipo de acero inoxidable lo que nos garantiza durabilidad al estar en contacto directo con el agua. La fuerza que actúa sobre cada uno de los álabes se expresa por:

$$F_{alabe} = F_{vertical} + F_c$$

$F_{vertical}$: Es la componente vertical de la fuerza del agua que soporta cada álabe, en kgf.

F_c: Representa la fuerza centrífuga, en kgf.

Nos basaremos en el catálogo que nos ofrece IPAC para obtener las propiedades de los materiales.

$$F_{vertical} = 46.5 * Q * \sqrt{H_{neto}} \tag{24}$$

$$F_{vertical} = \mathbf{17.08\ kgf}$$

$$B_r = 1.2533 * B_{inyector} = \mathbf{0.2455m}$$

Se procede a calcular el volumen de cada álabe con la siguiente expresión.

$$Volumen_{alabe} = \left(R_{curv-alabe} + \frac{e_{alabe}}{2}\right) 73 * \frac{\pi}{180} * B_{r\ alabe} * e \tag{25}$$

$$Volumen_{alabe} = \mathbf{3.12X10^{-5}\ m^3}$$

$$Pesos_{alabes} = Volumen_{alabe} * \rho_{AISI\ 316(} \rightarrow Pesos_{alabes} = \mathbf{0.247\ kg}.$$

$$F_c = \frac{Pesos_{alabes}}{9.8}\left(\frac{240 * 2 * \pi}{60}\right)^2 * \frac{D_e}{2}$$

$$F_c = \mathbf{2.38\ kgf}$$

$$F_{alabe} = F_{vertical} + F_c$$

$$F_{alabe} = \mathbf{19.46kgf}$$

El esfuerzo máximo que soporta el álabe está dado por en $\frac{kgf}{m^2}$:

La Tabla 7 está adaptada del libro de la OLADE del manual para el diseño de turbinas Michell – Baki el cual da una referencia para el espesor de los álabes en relación al diámetro del rodete.

Tabla 7. Diámetros estandarizados del rodete

DIÁMETRO DEL RODETE De (mm)	**ESPESORES DEL ÁLABE e (mm)**	**AREA DE ESFUERZO A (cm^2)**	**CENTRO DE GRAVEDAD Cg (cm)**	**MOMENTO DE INERCIA Igx (cm^4)**	**RADIO DE GIRO C (cm)**
300	2	1.27	4.66	0.1134	0.43
300	3	1.93	4.70	0.1822	0.48

300	4	2.59	4.75	0.2633	0.53
300	6	3.96	4.85	0.4751	0.64

Para calcular el esfuerzo máximo en el álabe de usa la ecuación 26

$$\sigma_{max} = \frac{F_{alabe} * B_r * C}{12 * I_{gx}} \tag{26}$$

$$\sigma_{max} = \frac{19.43 \text{ kgf} * 24.55\ cm * 0.43\ cm}{12 * 0.1134}$$

$$\sigma_{max} = 150.96\ kgf/cm^2$$

Una vez obtenido el esfuerzo máximo se tiene que verificar que cumpla la condición especificada a continuación, caso contrario se debería volver a realizar cambiando el valor del espesor del material.

Para la fabricación del rodete se escogió un acero inoxidable 304 ya que es un tipo de acero comercial y concuerda con las recomendaciones que nos brinda el manual; este tipo de acero tiene un $\sigma_y = 1500\ kgf/cm^2$; con este valor se puede comprobar que el espesor del álabe si resistirá los esfuerzos a los que está sometido.

$$\sigma_{max} \leq 0.66 * \sigma_y$$

$$150.96 \frac{kgf}{cm^2} \leq 0.66 * 1500 \frac{kgf}{cm^2} \rightarrow \mathbf{150.96} \frac{\boldsymbol{kgf}}{\boldsymbol{cm^2}} \leq \mathbf{990} \frac{\boldsymbol{kgf}}{\boldsymbol{cm^2}}$$

Como se puede observar en el resultado anterior si cumple la condición de esfuerzos, por ende, podemos concluir que el acero inoxidable 304 si va a soportar los esfuerzos a los que está sometido el rodete.

En el Anexo 1 se presenta el dibujo del elemento con sus respectivas cotas.

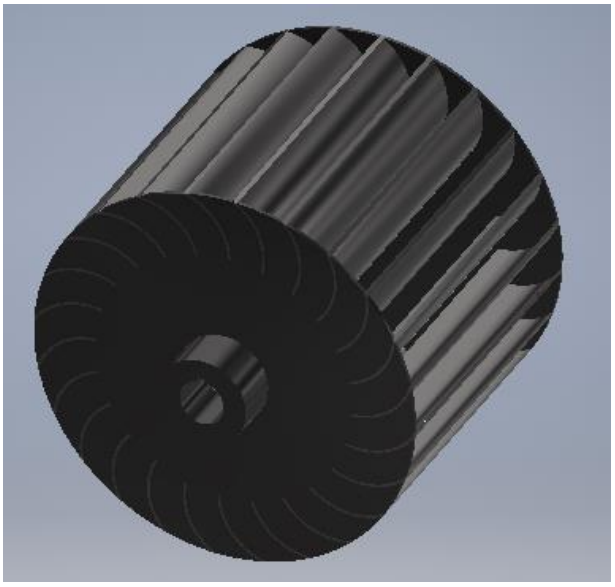


Figura 24. Diseño del rodete de la turbina.

5.5.8 Cálculo y diseño del eje del rodete.

El diseño del eje de la turbina se realizará considerando que la turbina transmitirá su potencia al generador por medio de un acoplamiento al sistema de transmisión para la que se utilizará la ecuación ASME con la cual se determinará el diámetro mínimo que tendrá el eje (Figura 25)

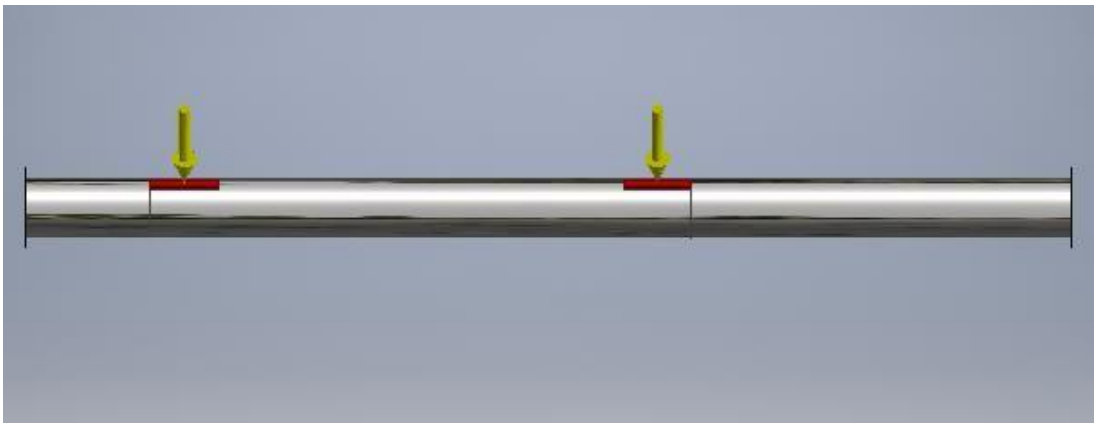


Figura 25. Diseño de eje del rodete de la turbina.

$$d_{eje}^3 = \frac{16}{\pi S_d} * \sqrt{(K_m * M_{max})^2 (K_t * T_{max})^2} \quad (27)$$

Donde:

S_d = Es el esfuerzo de diseño del material utilizado para el eje, que se estima como un 20% del valor de esfuerzo de fluencia cuando se utiliza canal chavetero (kg/m^2).

K_m = Es el factor de momento flector para carga estable estimado con un valor de 1.5.

K_t = Es el factor de momento flector para carga estable estimado con un valor de 1.0.

M_{max} = Es el momento flector máximo que se presenta en el eje (kg-m).

T_{max} = Es el momento torsor máximo que se presenta en el eje (kg-m).

$$M_{max} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (28)$$

$$M_{max} = \sqrt{6.103\ kgf * m^2 + 0.66\ kgf * m^2} = 6.14\ kgf * m$$

$$M_x = \frac{F_r * a}{2} \quad (29)$$

$$M_x = \frac{122.09\ kgf * 0.1m}{2} = 6.103\ kgf * m$$

$$M_y = \frac{P_r * a}{2} \tag{30}$$

$$M_y = \frac{13.23\ kg * 0.1m}{2} = 0.66\ kgf * m$$

P_r = Es el peso del rodete en kg

F_r = Es la fuerza tangencial del rodete (kg)

$$F_r = \frac{1948 P_T}{N\ D_e} \tag{31}$$

$$F_r = \frac{1948(7.064\ KW)}{375.7\ rpm\ 0.3m}$$

$$F_r = 122.09\ kgf$$

P_T = es la potencia de la turbina en KW.

N = Es el número de revoluciones de giro de la turbina, en rpm

$$T = \frac{974\ (P_T)}{N} \tag{32}$$

$$T = \frac{974\ (7.064\ KW)}{375.7\ rpm} = \mathbf{18.31\ kgf * m}$$

En este caso utilizaremos un acero inoxidable AISI 4140, el cual tiene un $S_y = 43.54X10^6\ kgf/m^2$.

$$S_d = S_y * 0.2 = 8.708X10^6\ kgf/m^2$$

$$d^3_{eje} = \frac{16}{\pi S_d} * \sqrt{(1.5 * 6.14\ kgf * m)^2 + (1.0 * 18.31\ kgf * m)^2}$$

$$d_{minimo\_eje} = 0.023\ m$$

En el Anexo 1 se presenta el dibujo del elemento.

5.5.9 Selección de la chaveta para el eje del rodete

Para la selección de la chaveta se utilizará un material acero al carbono del tipo AISI 1045, el diámetro del eje que se utilizara es de 0.03 m, con una potencia de frenado de $P_T = 7.064\ KW$ y un torque máximo de $T_{max} = 18.31\ kgf * m$ (Figura 26).

Esfuerzo de fluencia del acero al carbono tipo AISI 1045 $S_y = 32X10^6\ kgf/m^2$

$$F = \frac{T_{max}}{r} \tag{33}$$

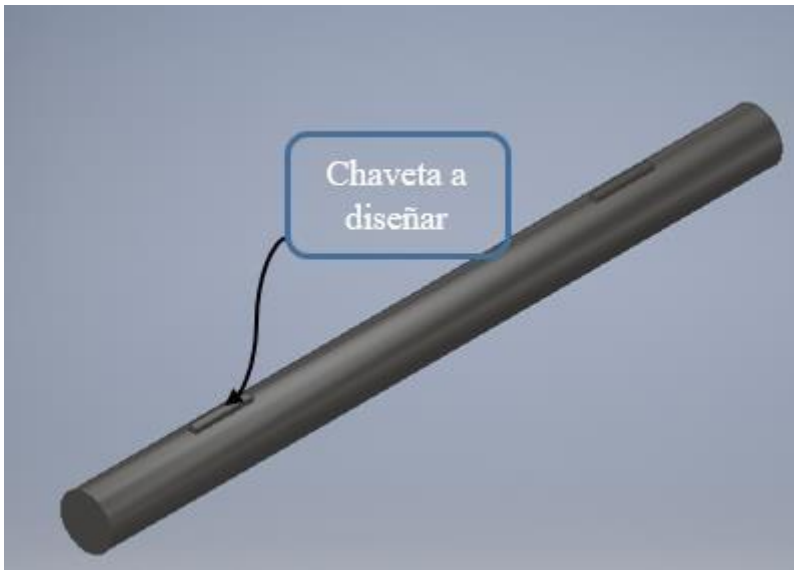
$$F = \frac{18.31\ kgf * m}{0.015\ m} = 1220.7\ kgf$$

La chaveta actúa como un elemento de potencia mecánica por lo que el esfuerzo de fluencia de la chaveta tiene que ser menor al esfuerzo de fluencia del eje del rodete.

$$S_{ychaveta} \leq S_{yejerodete}$$

$$32X10^6\ kgf/m^2 \leq 43.54X10^6\ kgf/m^2$$

En este caso si cumple, por lo que podemos que la elección del material para la fabricación de la chaveta es el adecuado.



(34)

Figura 26. Chaveta de soporte para el eje del rodete.

Esfuerzo máximo de la chaveta se calcula mediante la ecuación 34.

$$r = \frac{F}{hl}$$

$$r = \frac{1220.7\ kgf}{1.5258X10^{-4}\ m^2} = 8.0003\ MPa$$

$$r \leq \frac{S_y}{2n}$$

$$hl = \frac{2nF}{S_y} \qquad (35)$$

$$hl = \frac{2 * 2 * 1220.7\ kgf}{32X10^6\ kgf/m^2} = 1.5258X10^{-4}\ m^2$$

Para encontrar la altura de la chaveta el valor que nos imponemos es la longitud que será igual al buje del rodete donde $l = 37\ mm$.

$$h = \frac{hl}{l} = \frac{1.5258X10^{-4}\ m^2}{0.037\ m} = 4.124X10^{-3}\ m$$

De acuerdo la altura encontrada nos basamos en la siguiente tabla para poder definir el ancho que debe tener nuestra chaveta y su longitud mínima.

$h = 5\ mm$

$b = 5\ mm$

Para el cálculo de la longitud mínima de la chaveta podemos obtener con la ecuación 36:

$$L_{ch\_eje\_rodete} = \frac{4 * T * \eta}{d * h * S_y} \tag{36}$$

Donde

T = es el torque producido en el eje del rodete.

L = es la longitud mínima de la chaveta/canal chavetero (m)

d = es el diámetro del eje del rodete (m)

h = altura de la chaveta (m)

$$L_{ch\_eje\_rodete} = \frac{4 * 18.31\ kgf * m * 2}{0.035 * 0.005 * 32X10^6\ kgf/m^2}$$

$$L_{ch\_eje\_rodete} = 0.026\ m$$

En el Anexo 1 se presenta el dibujo del elemento.

5.5.10 Cálculo de la velocidad crítica

El cálculo de la velocidad critica es necesario para saber si existen vibraciones en el eje del rodete y está dado por la siguiente ecuación:

$$N_{crit} = \frac{29.88}{\frac{1}{y^2}} \tag{37}$$

N = esta expresada en RPM

y = es la flecha resultante producida por la acción del peso y la fuerza del rodete.

$$y = \frac{Wa^2}{6EI}(3 * l_o - 4a) \tag{38}$$

$$W = \sqrt{P_r^2 + F_r^2} \tag{39}$$

$$W = \sqrt{13.23\ kg^2 + 122.09\ kgf^2} = 122.8$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$I = \frac{\pi * 0.03^4}{64} = 3.97X10^{-8}\ m^4$$

$$y = \frac{122.8 * 0.1^2}{6 * 2.1X10^9 * 3.97X10^{-8}\ m^4}(3 * 0.446\ m - 4 * 0.1\ m)$$

$$y = 2.3X10^{-3}\ m$$

$$N_{crit} = \mathbf{623.04\ rpm}$$

5.5.11 Diseño del eje del álabe directriz

Para el cálculo del eje del álabe directriz se toma en consideración la fuerza que se proyecta verticalmente hacia el álabe directriz más el peso del mismo álabe.

Se calcula el torque máximo del eje del álabe directriz, para determinar la regulación de caudal se emplea la ecuación 40:

$$T_{eje\_directriz} = 31 * D_e * Q * \sqrt{H_{neto}} \tag{40}$$

$$T_{eje\_directriz} = 31 * 0.3\ m * 0.15\ m^3/s * \sqrt{6}$$

$$T_{eje\_directriz} = \mathbf{3.41\ kg * m}$$

El diámetro del eje se obtiene mediante la ecuación 41:

$$d_i^3 = \frac{16T}{S_d} \tag{41}$$

S_d = es el esfuerzo de diseño del material utilizado en el álabe directriz considerando que este y el rodete constituyen una sola pieza.

$$S_d = 0.20 * S_y$$

Para el eje del álabe directriz se utilizará el mismo acero que se utilizó para el eje del rodete el cual tiene un $S_y = 43.54X10^6\ kgf/m^2$.

$$S_d = 8.708X10^6\ kgf/m^2$$

$$d_{minimo\_eje\_directriz} = 0.0184\ m$$

Una vez determinado el diámetro mínimo del eje del álabe directriz, se establecerá el diámetro máximo a partir de los valores presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Diámetros máximos del eje del álabe directriz [37]

De (mm)	di (mm)
300	38
400	50
500	63
600	76

En el Anexo 1 se presenta el dibujo del elemento.

5.5.12 Selección de la chaveta para el eje del álabe directriz

Para la selección de la chaveta del eje del álabe directriz utilizaremos el mismo material que el eje del rodete el cual es un acero al carbono tipo AISI 1045, y el diámetro del eje del álabe directriz es de 0.02 m.

Esfuerzo de fluencia del acero al carbono tipo AISI 1045 $S_y = 32X10^6\ kgf/m^2$

$$F = \frac{T_{max}}{r} \tag{42}$$

$$F = \frac{3.41\ kgf * m}{0.01\ m} = 341\ kgf$$

La chaveta actúa como un elemento de potencia mecánica por lo que el esfuerzo de fluencia de la chaveta tiene que ser menor al esfuerzo de fluencia del eje del rodete.

$$S_{ychaveta} \leq S_{yejerodete}$$

$$32X10^6\ kgf/m^2 \leq 43.54X10^6\ kgf/m^2$$

En este caso sí cumple, por lo que podemos deducir que la selección del material para la fabricación de la chaveta es el adecuado.

Esfuerzo máximo de la chaveta

$$r = \frac{F}{hl} \tag{43}$$

$$341\ kgf$$

$$r = \frac{}{4.2625X10^{-5}\ m^2} = 8\ MPa$$

$$r \leq \frac{S_y}{2n}$$

$$hl = \frac{2nF}{S_y}$$

$$hl = \frac{2 * 2 * 3.41\ kgf}{32X10^6\ kgf/m^2} = 4.2625X10^{-5}\ m^2$$

Para encontrar la altura de la chaveta el valor que nos imponemos es la longitud que será igual al buje del rodete donde $l = 37\ mm$.

$$h = \frac{hl}{l} = \frac{4.2625X10^{-5}\ m^2}{0.02\ m} = 2.131X10^{-3}\ m$$

Una vez ya calculado la altura de la chaveta realizamos el mismo proceso que utilizamos para las chavetas del eje del rodete en dónde:

$h = 3\ mm$

$b = 3\ mm$

Para el cálculo de la longitud mínima de la chaveta podemos lo obtener con la siguiente ecuación:

$$L_{ch\_eje\_rodete} = \frac{4 * T * \eta}{d * h * S_y} \tag{44}$$

Donde

T = Es el torque producido en el eje del álabe directriz.

L = Es la longitud mínima de la chaveta/canal chavetero (m)

d = Es el diámetro del eje del álabe directriz (m)

h = Altura de la chaveta (m)

$$L_{ch\_eje\_rodete} = \frac{4 * 3.41\ kgf * m * 2}{0.02 * 0.006 * 32X10^6\ kgf/m^2}$$

$$L_{ch\_eje\_alabe} = 0.0142\ m$$

En el Anexo 1 se presenta el dibujo del elemento.

5.5.13 Diseño de la carcasa de la turbina

Para hacer el dimensionamiento de la carcasa de la turbina, (Figura27), es necesario considerar las presiones que se van a tener en el momento que el agua pase por el inyector; según el "Manual de pequeñas centrales Hidroeléctricas", la carcasa debe ser del mismo material que el del inyector debido a la presión que está sometida.

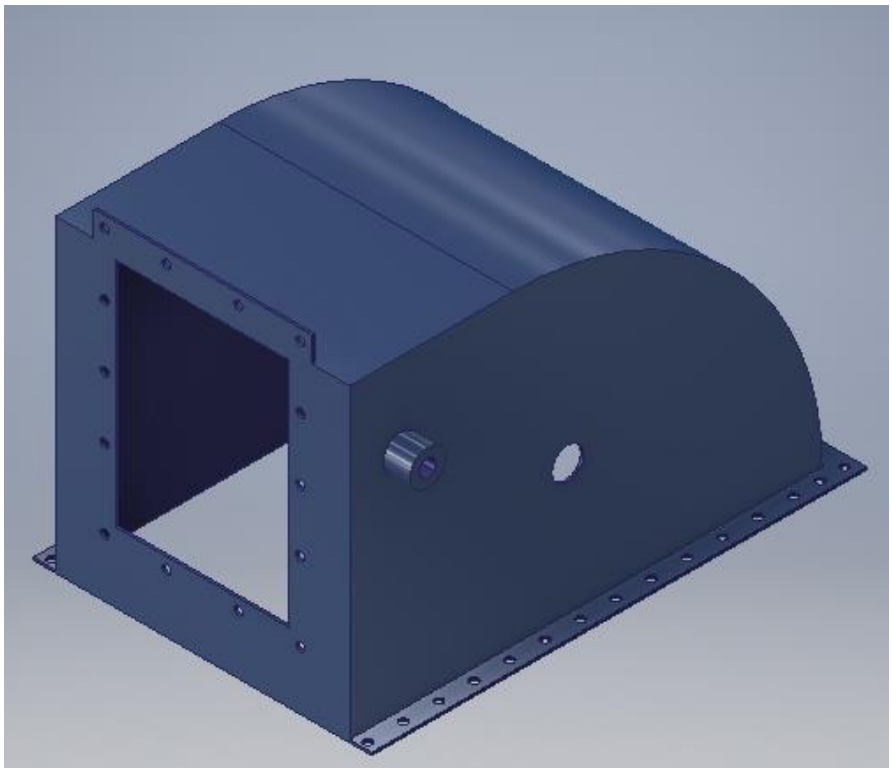


Figura 27. Diseño de la carcasa de la turbina.

En el Anexo 1 se presenta el dibujo del elemento.

5.6 Tubería de presión.

Tanto el diseño como la selección de la tubería de presión cumplen un papel preponderante en el diseño de la Pico-Central Hidroeléctrica, en específico en el diseño de la turbina hidráulica ya que depende del material y la longitud que tiene la tubería para determinar las perdidas por fricción del fluido, las mismas que afectaran en la eficiencia del sistema.

5.6.1 Dimensionamiento del diámetro de la tubería de presión.

El dimensionamiento de la tubería de presión servirá para equiparar los costos y perdidas de carga, se consideran diferentes ecuaciones y métodos experimentales planteados a lo largo de la historia en el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas.

Para el caso de las perdidas por fricción, las pérdidas mayores se dan en las tuberías con diámetros menores mientras que las velocidades de flujo mayores se dan en tuberías con diámetros menores por lo que es necesario en el diseño equilibrar las menores pérdidas con velocidades menores.

5.6.2 Dimensionamiento de acuerdo al método tradicional.

Al dimensionar una tubería con este método lo se requiere primordialmente es conocer el caudal y el salto total aprovechable; también es necesario conocer la longitud total de conducción desde la cámara de carga hasta la turbina. [38]

La longitud total de la tubería será de 100 metros, esto debido a la topografía del terreno y con la finalidad de alcanzar un salto de $8m$.

Una vez obtenido todos los datos se procede a determinar las perdidas en la tubería aplicando la ecuación de Bernoulli representada en la ecuación 45

$$\frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_a^2}{2 * g} + H_{a;Tanque} - H_r = \frac{P_b}{\gamma} + \frac{V_b^2}{2 * g} + H_{b;Inyector} \quad (45)$$

Partiendo de que el agua está a presión atmosférica y la velocidad a nivel del tanque es cero, se anulan las variables de la ecuación 45 dando como resultado la ecuación 46 para un valor de altura relativa.

$$H_a - H_r = \frac{V_b^2}{2 * g} \quad (46)$$

Reorganizando da como resultado:

$$H_r = H_a - \frac{V_b^2}{2 * g} \quad (47)$$

$$H_r = 8m - \frac{(5.766 \frac{m}{s})^2}{2\,(9.81 \frac{m}{s^2})} = \mathbf{6.3054\ m}$$

Una vez determinado las pérdidas se procede a encontrar el diámetro de la tubería que se utilizará para la implementación de la Pico-central hidroeléctrica utilizando la ecuación 48

$$H_r = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}; \quad (49)$$

(48)

Para encontrar el valor de la velocidad al cuadrado partiremos de la ecuación del caudal.

(49)

$$Q = A * V$$

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * D^2} \tag{50}$$

$$V^2 = \frac{16 * Q^2}{\pi^2 * D^4} \tag{51}$$

Remplazando la ecuación 51 en la ecuación 48 da como resultado la ecuación 52:

$$H_r = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{16 * Q^2}{(\pi^2 * D^4)(2g)}\right) \tag{52}$$

El valor del factor de fricción para una primera aproximación se toma de un rango de valores, los mismo que nos da en el libro de Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas del autor Mataix [38].

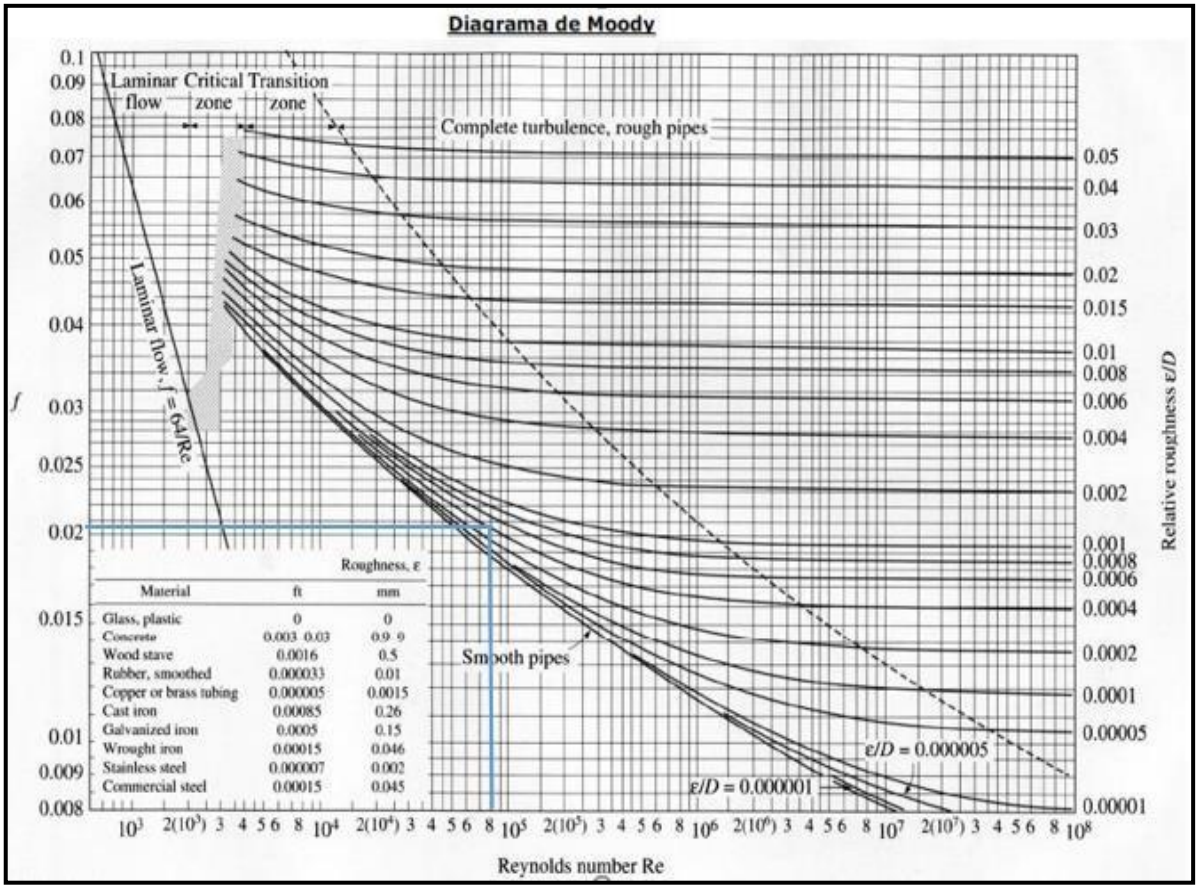


Figura 28. Diagrama de Moody [38]

$$\lambda = (0.010; 0.015; 0.022)\ de\ dondo\ tomamosa: \lambda = 0.022$$

Remplazando todos los datos en la ecuación 52 se tiene un primer valor del diámetro

$$6.3672m = (0.017)\left(\frac{30m}{D}\right)\left(\frac{16 * (0.13)^2}{(\pi * D^2)(2 * 9{,}81\ m/s^2)^4}\right)$$

$$\frac{0.51}{D}\left(\frac{16 * (0.13)^2}{193.6416D^4}\right) = 6.3054m$$

$$D = 0.1720\ m = \mathbf{163\ mm}$$

Una vez obtenida la primera iteración se procede a calcular el número de Reynolds y la relación k/D para encontrar un nuevo factor de fricción λ' con el diagrama de Moody, (Figura 28), para realizar la segunda iteración.

Con el primer valor del diámetro se recalcula el valor de la velocidad en la salida de la tubería para calcular el número de Reynolds

$$V = \frac{4\,(0.15\,\frac{m^3}{s})}{\pi * (0.172m)^2} = \mathbf{5.80\,\frac{m}{s}}$$

Calculado el número de Reynolds se vuelve a encontrar el factor de fricción en el diagrama de Moody con la finalidad de comprobar que el valor de diámetro calculado sea el correcto.

$$Re = \frac{V * D}{\boldsymbol{v}} \tag{53}$$

$$Re = \frac{(5.80\,\frac{m}{s})\,(0.1798m)}{1.310x10^{-6}} = 809.78x10^3$$

El valor del coeficiente de rugosidad k será de 0.08mm correspondiente a una tubería polimérica, este valor nos servirá para encontrar la relación k/D.

$$\frac{k}{D} = \frac{0.08mm}{169mm} = 4.733x10^{-4}$$

Con los valores encontrados anteriormente utilizando del diagrama de Moody se obtiene un diámetro de la tubería de presión para la PCH.

$$\lambda' = 0.015$$

$$\boldsymbol{D' = 0.158\ m = 158mm}$$

5.6.3 Ecuación de Fahlbusch

Una de las ecuaciones utilizada para el dimensionamiento de tuberías es la de Fahlbusch que relaciona el diámetro con la potencia y la altura. [29]

$$D = 0.52 * h_b^{-0,14} \left(\frac{P}{h_b}\right)^{0.42} \tag{54}$$

De donde:

P: Potencia en (kw).

h_b: Altura bruta (m)

La potencia se relaciona con el caudal y la altura obteniendo la siguiente expresión:

$$P = \gamma * Q * h * \eta \tag{55}$$

De donde:

η: Es el rendimiento del sistema.

γ: Es el peso especifico del agua: $9790.38\ N/m^3$

Para calcular la potencia se asume un rendimiento del sistema del 80%; una vez obtenida la potencia se procede a calcular el diámetro mediante la ecuación de *Fahlbusch.*

$$P = (9790.38\ N/m^3)\ (0.13\ \frac{m^3}{s})\ (8m)(0.8) = 8.13\ kW$$

$$D = 0.52(8m)^{-0,14} \left(\frac{8.13\ kW}{8m}\right)^{0.42} = 0.39\ m = 390mm$$

5.6.4 Ecuación de Manning

Un criterio sencillo para el dimensionamiento del diámetro de la tubería es la limitación de las pérdidas de carga en un rango del 4% al 15 % de la altura bruta, tomando en cuenta solamente las pérdidas por fricción y considerando menores las demás pérdidas producidas en el sistema. [29]

Para esto se utiliza la ecuación de Manning:

$$D = \left(\frac{10.3 * Q^2 * n^2 * L}{h_f}\right)^{0.1875} \tag{56}$$

De donde:

n: coeficiente de rugosidad de Manning cuyo valor es muestra en la Tabla 9

Tabla 9. Coeficiente de rugosidad de Manning [29]

Tipo de material de las paredes del canal	n(adim)	k(mm)
Vidrio	0.009-0.010	-
Material liso (laton. Cobre, plomo, aluminio)	0.010	0.0030
Mampoteria ladrillo	0.014	1.20
Asbesto-cemento	0.10	0.030
Acero no revestido	0.012	0.030
Acero revestido	0.013	0.060
Concreto	0.013	0.150
Ladrillo vitrificado	0.025	1.50
Gres (arcilla o barro) vitrificado	0.013	0.060
PVC	0.010	0.030

Una vez determinado el valor del coeficiente de Manning para el tipo del material que tendrá el tanque de carga y el canal de conducción se calcula el calor del diámetro de la tubería de presión:

$$D = \left(\frac{10.3 * \left(0.13 \frac{m^3}{s}\right)^2 (0.013)^2 (90m)}{8m} \right)^{0.1875} = 0.222m = 222mm$$

5.6.5 Ecuación de Bondschú

Se puede determinar el diámetro D de la tubería considerando la sobrepresión ocasionada por el golpe de ariete. [39]

$$D = 1.27 * \frac{Q^{0.4268}}{(H_b + h_s)^{0.1423}} \tag{57}$$

De donde:

h_s: Altura de sobrepresión por golpe de ariete para la ecuación de Bondschú se recomienda un valor de $0.3 * H_b\ (m)$.

$$D = 1.27 * \frac{Q^{0.4268}}{(Hb + h_s)^{0.1423}}$$

Una vez desarrollado los cálculos con las ecuaciones presentadas con anterioridad en la Tabla 10, se muestran los valores de los diámetros calculados de acuerdo a los diferentes métodos.

Tabla 10. Valores calculados de diámetros para la tubería de presión.

Método de cálculo	Diámetro (m)
Método tradicional	0.1547
Manning	0.2129
Fahlbusch	0.3993
OLADE	0.197
Bondschú	0.3882

5.6.6 Selección del diámetro de la tubería de presión.

Como se puede observar en la tabla 10, dependiendo de la ecuación o criterio de aplicación el diámetro varía de forma considerable, por lo que se puede establecer un rango para la selección de la tubería de entre 154mm – 399mm, luego para determinar el diámetro a usar se debe tener en cuenta la relación costo – perdidas pues si bien una tubería de menor diámetro tendrá un menor costo pero provocaría mayor pérdidas por fricción y viceversa una de mayor diámetro tiene menos perdidas por fricción pero su costo se eleva.

Teniendo en cuenta lo expuesto en el párrafo anterior y verificando los diámetros comerciales de tuberías de polietileno de alta densidad utilizadas para transporte de agua a presión, se elige un diámetro de 160mm que corresponde a 6 pulgadas que es el diámetro comercial existente.

5.7 Cámara de carga.

La cámara de carga debe tener un diseño hidráulico ya que esta conecta la laguna con la tubería de presión (Figura 29) [29].

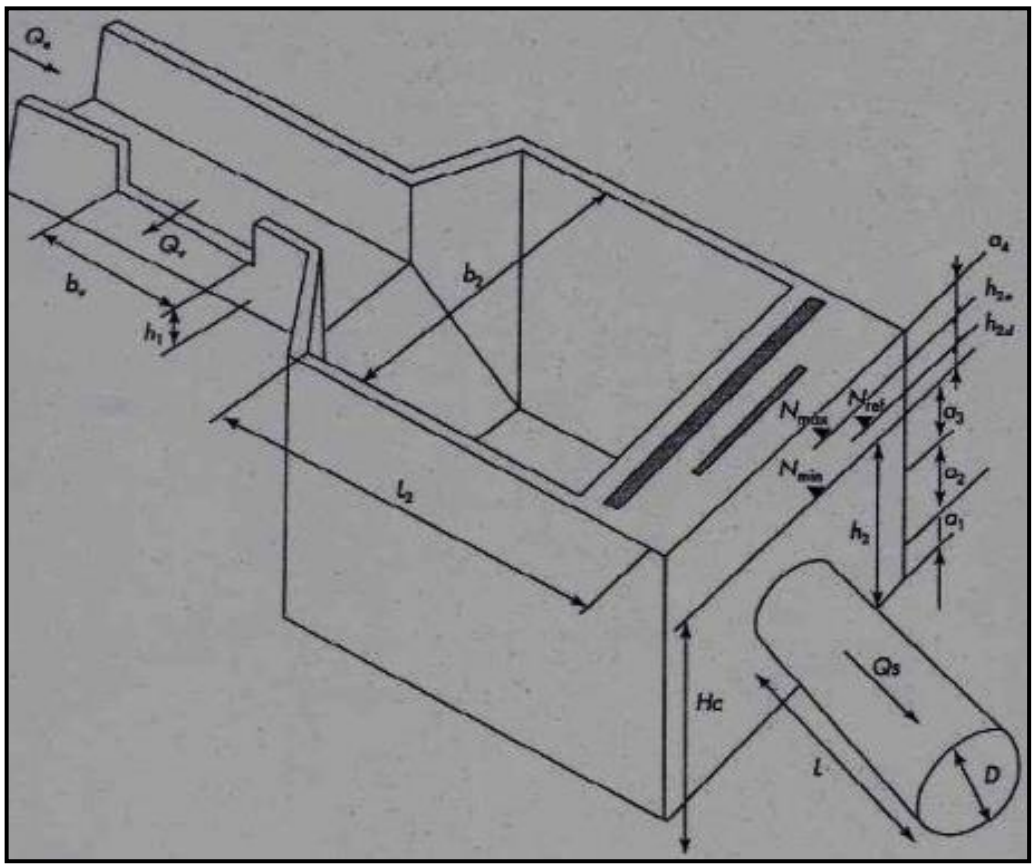


Figura 29. Diseño del tanque de captación [29]

Tiene la función de amortiguar las ondas de oscilación de presión debidas a la regulación de caudal de las turbinas. Dichas ondas son mayores en magnitud en el momento de arranque o parada por rechazo de carga de las turbinas, a estas ondas de sobrepresión se les denomina golpe de ariete [29].

Las características que debe tener son:

- Recoger el exceso del agua una vez que existe un incremento de caudal que llega a la laguna.
- Tener una capacidad volumétrica para el almacenamiento de agua, lo que posibilita que constantemente se tenga un volumen de agua que permita conservar una elevación suficiente sobre la tubería de presión y así evitar la entrada de aire.
- Impedir la producción de burbujas de aire al ingresar a la tubería de presión.
- Recoger la sedimentación de materiales sólidos que podrían ingresar a la tubería de presión.
- Disponer de un volumen de agua suficiente como para amortiguar el golpe de ariete.

5.7.1 Dimensionamiento de la cámara de carga.

Se debe determinar la altura mínima $a1$ que evita el ingreso de sedimentos a la tubería de presión; para esto, Ortiz [29] recomienda un valor entre $0.3 < a_1 < 0{,}5\ (m)$.

Para nuestro caso asumimos un valor de $a_1 = 0.4\ (m)$

Al valor de a_2 se le debe sumar el valor del diámetro exterior de la tubería que se define como a_2.

$$a_2 \approx D \tag{58}$$

$$a_2 \approx D$$

$$a_2 \approx 0.16\ m$$

La altura a_3 garantizará que el torbellino del flujo del caudal no genere cavitación, tendrá un valor mínimo de $0.3\ m$, y según, Ortiz [29] recomienda que este valor este comprendido entre:

$$0.5D < a_3 < 1{,}5D\ (m)$$

Para el diseño se asumirá un valor de $a_3 = 0.3\ m$

El valor de a_4 es una altura de seguridad para amortiguar el golpe de ariete, Ortiz [29] recomienda un valor mínimo de $a_4 = 0.3\ m$

Se escoge un valor de h_2, en función de a_1, a_2, y a_3; para el tanque de captación, este valor será de $h_2 = 1.2\ m$

El valor de la velocidad media en la cámara de presión V_2, estará dada entre $0.6\ {}^{m}/_{s}\ a\ 1\ {}^{m}/_{s}$, para el cálculo del ancho de la cámara de carga se tomará un valor de velocidad promedio $V_2 = 0.8\ {}^{m}/_{s}$

El ancho de la cámara de carga b_2 se calcula mediante la ecuación 60.

$$b_2 = \frac{Q}{V_2 * h_2} \tag{59}$$

$$b_2 = 1.3\ m$$

La reserva de volumen de agua para el inicio de la operación en el tanque se calcula con la ecuación 61

$$h_2 = 7 * b_d$$

$$Q * \sqrt{h} \qquad \frac{\qquad}{\qquad} = \qquad (60)$$

2 2

$$h_{2d} = 0.085\ m$$

Para que el valor asumido de h_2 sea el correcto debe cumplir la condición presente en la ecuación 62, caso contrario se debe asumir otro valor mayor y volver a calcular.

$$h_{2e} < h_2 \tag{61}$$

Primero se obtiene el valor de h_{2e} con la ecuación 63

$$h_{2e} = h_{2d} + a_1 + a_2 + a_3 \tag{62}$$

$$h_{2e} = 0.985\ m$$

$$h_{2d} + a_1 + h_2 + a_3 < h_2;\ 0.985\ m\ < 1.2\ m$$

La longitud de la cámara de carga L_2 viene dada por la expresión de la ecuación 64

$$L_2 = 0.304 * \frac{q * l * \sqrt{h_2}}{h_b * D^2} \tag{63}$$

$$L_2 = 1.5\ m$$

de donde:

D: Diámetro de la tubería forzada (m).

h_b: Altura bruta. (m).

L: longitud de la tubería forzada (m).

5.8 Comprobación y análisis de esfuerzos de las partes de la turbina mediante software de Ingeniería

Una vez diseñada la turbina a implementarse para la PCH se procede a comprobar si los materiales seleccionados, las dimensiones calculadas y la geometría establecida cumplen a satisfacción con los requerimientos de resistencia en función del trabajo que realizan cada una de las partes, para esto se utiliza el software *Autodesk inventor*.

5.8.1 Simulación de la carcasa

Presión utilizada 0.07848 MPa (0.7848 bar o 11.3825 psi) el mallado utilizado es de 0.1 material utilizado es acero inoxidable 304.

La simulación para los esfuerzos se puede ver en la Figura 30 y el desplazamiento del material en la Figura 31, por tanto, luego de obtener los valores en el software se comprueba que si soportan los esfuerzos los materiales seleccionados.

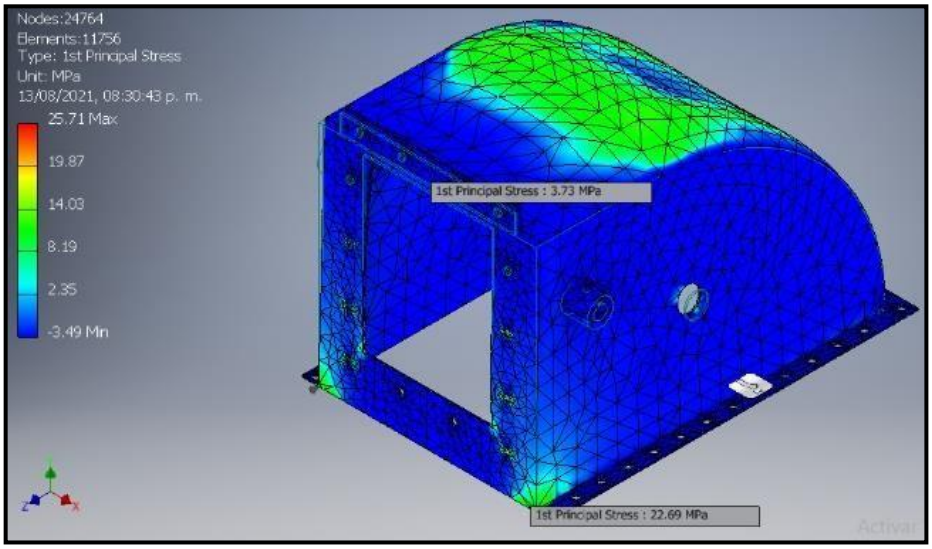


Figura 30. Principales esfuerzos, Carcasa Turbina Michell Banki.

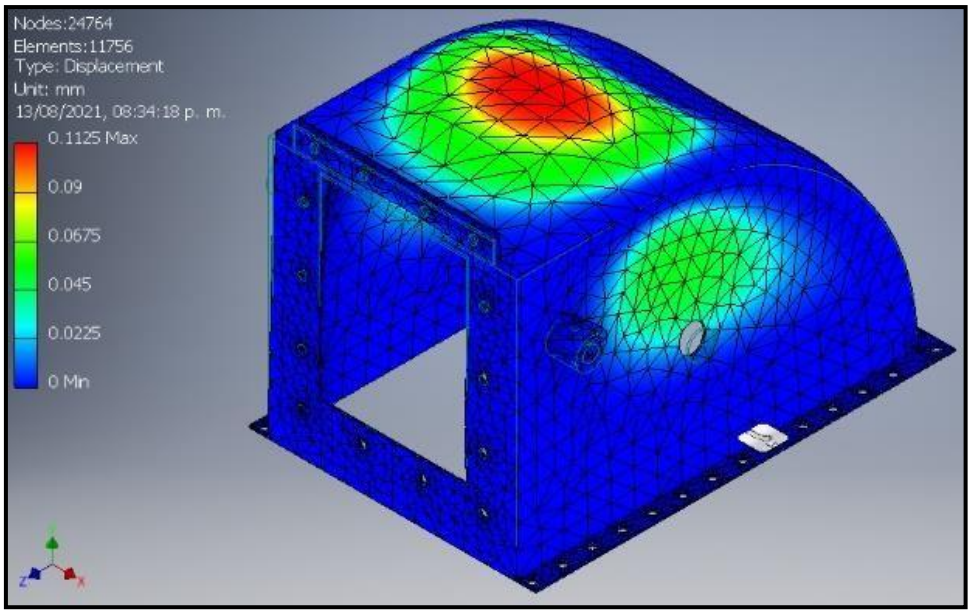


Figura 31. Campo de deformaciones de la carcasa Turbina Michell Banki

5.8.2 Simulación del Inyector

Los datos tanto de presión como el tipo de material son los mismos usados para la carcasa, los resultados se muestran en las Figuras 32 y 33.

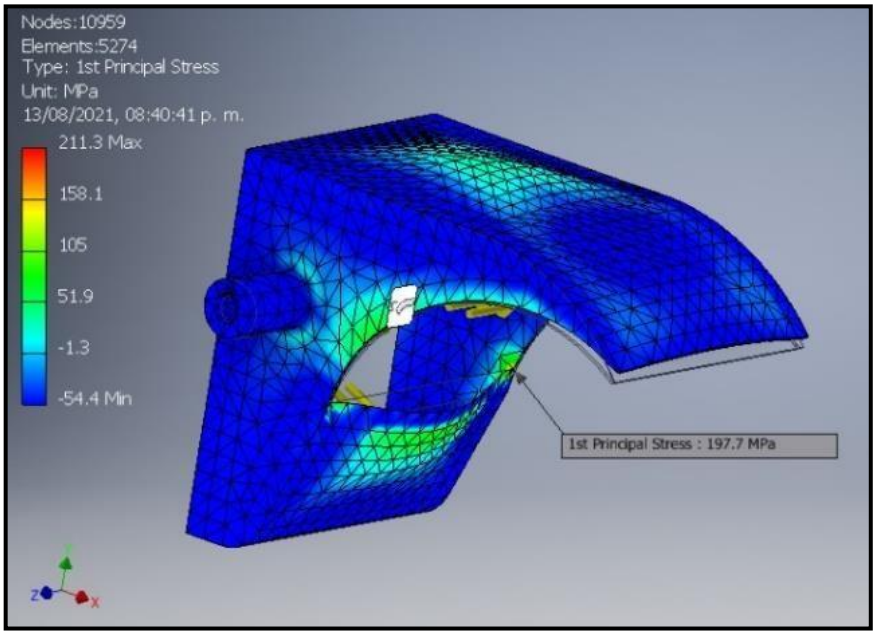


Figura 32. Esfuerzos Principales, Inyector Turbina Michell Banki.

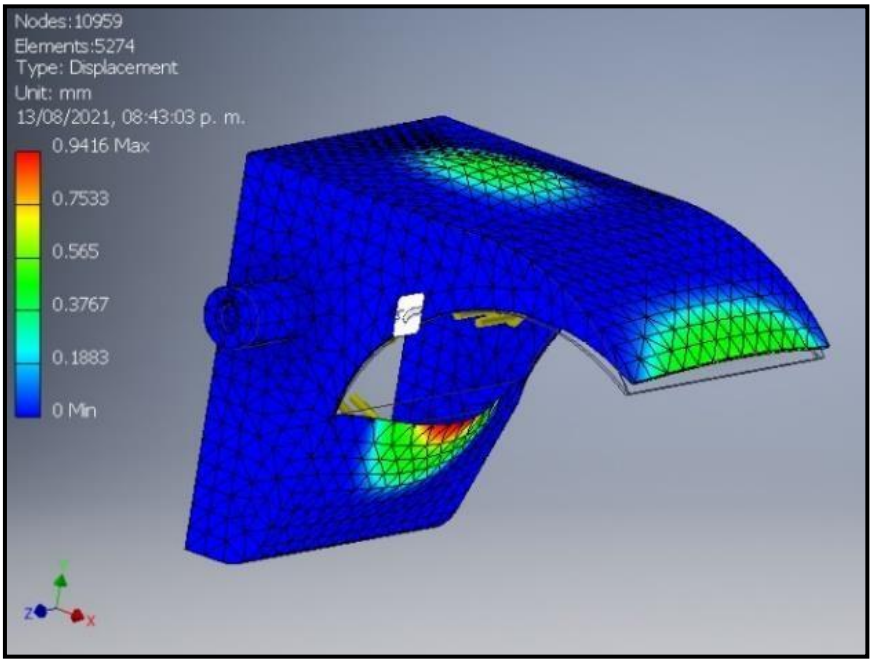


Figura 33. Campo de deformaciones del inyector Turbina Michell Banki.

Luego de realizar el análisis de esfuerzos en el software se puede ver que la parte más crítica en tener mejor deformación es la entrada del inyector debido a que el agua choca directamente contra las paredes de esta pieza.

5.8.3 Simulación del Álabe directriz

Los datos de entrada para la simulación del álabe directriz de presión y el tipo de material son los mismos usados para la carcasa, los resultados de los esfuerzos máximos y de la

deformación máxima generadas luego de aplicar la presión del agua se muestran en las Figuras 34 y 35 respectivamente.

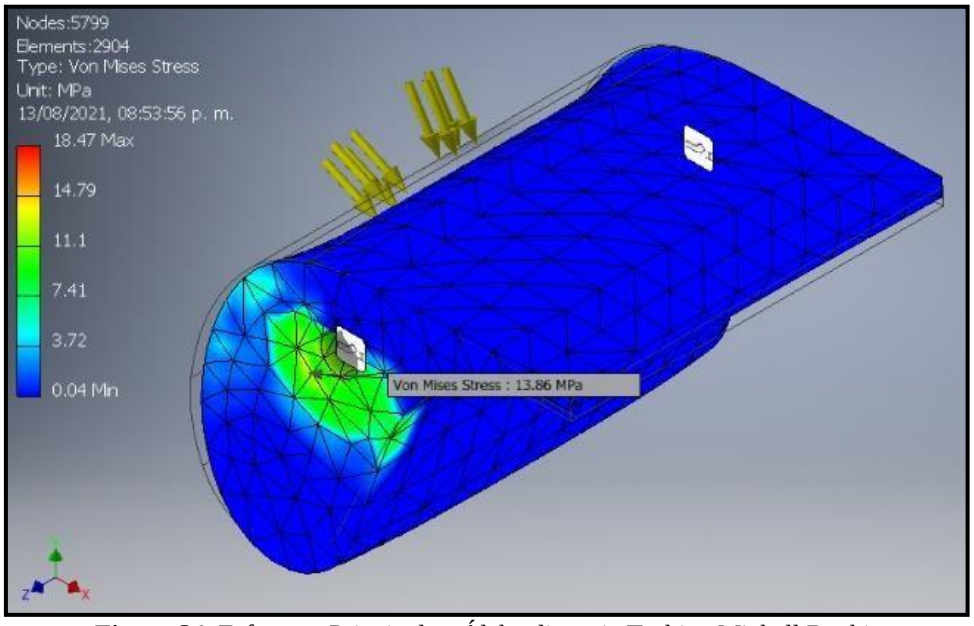


Figura 34. Esfuerzos Principales, Álabe directriz Turbina Michell Banki.

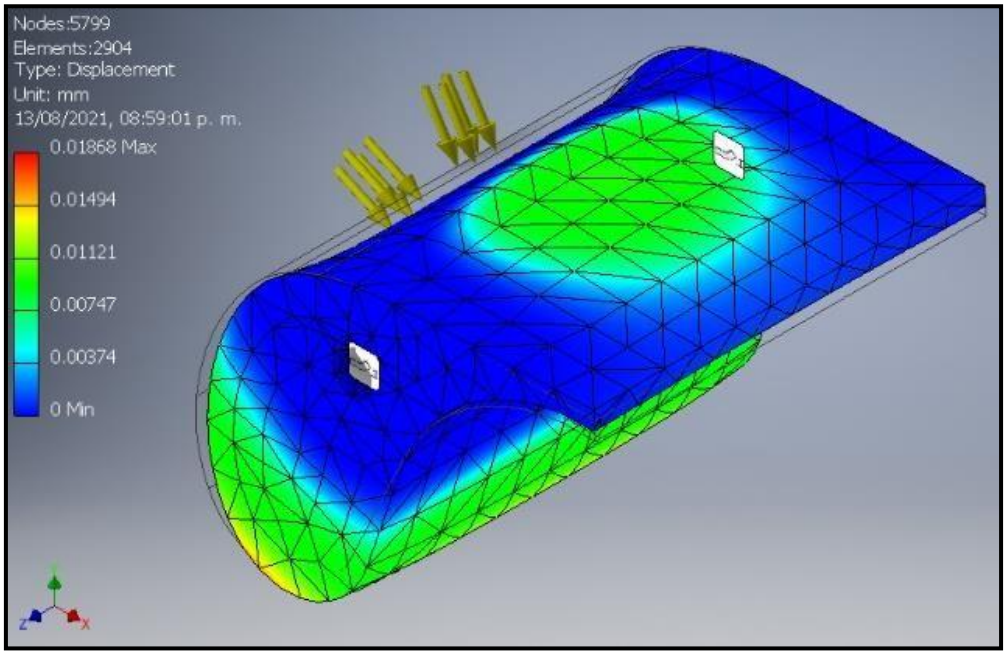


Figura 35. Campo de deformaciones del álabe directriz Turbina Michell Banki.

5.8.4 Simulación del álabe del rodete

Para el caso del álabe del rodete se usan el mismo valor de presión, y el tipo de material lo que cambia es el mallado de 0.2 l, estos resultados se representan en las Figuras 36 y 37.

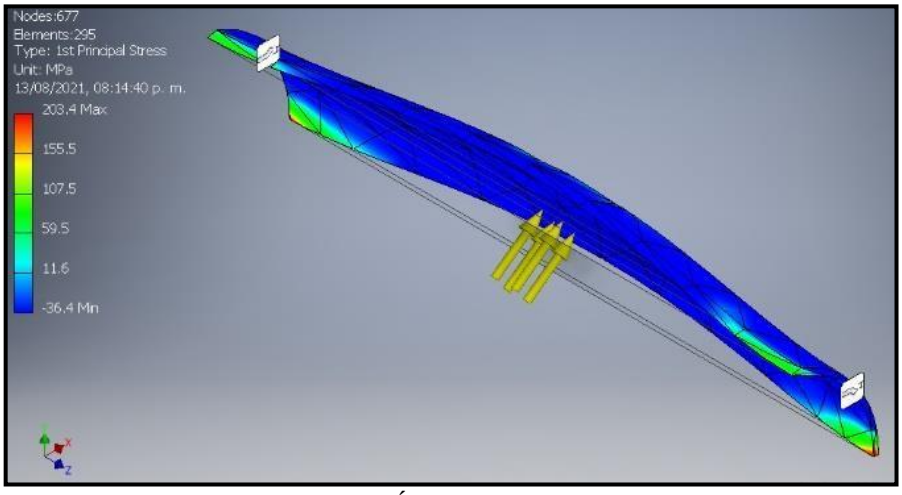


Figura 36. Esfuerzos Principales, Álabe del rodete de la Turbina Michell Banki

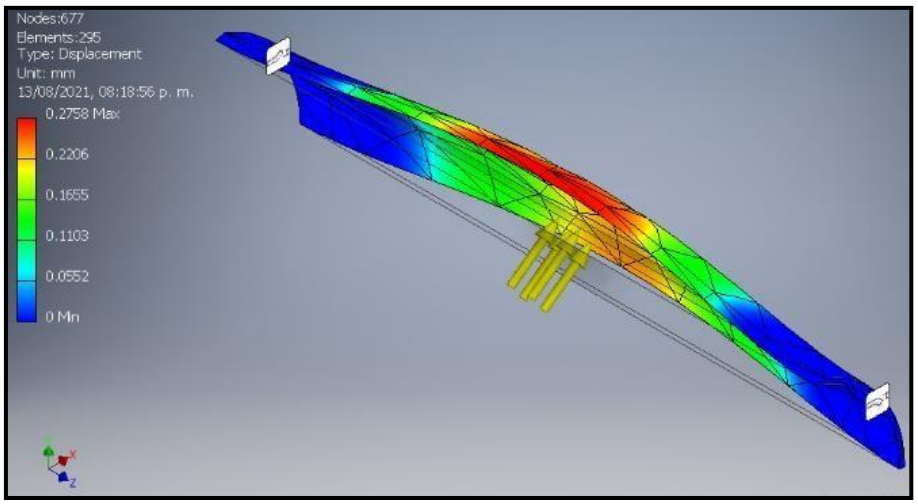


Figura 37. Campo de formaciones del álabe del rodete de la Turbina Michell Banki.

5.8.5 Simulación del eje del Rodete

Las dos fuerzas puntuales utilizadas es de 158.57N o en kilogramos 16.18kg en cada una de las fuerzas mallado 0.1, los resultados se muestran en las Figuras 38 y 39.

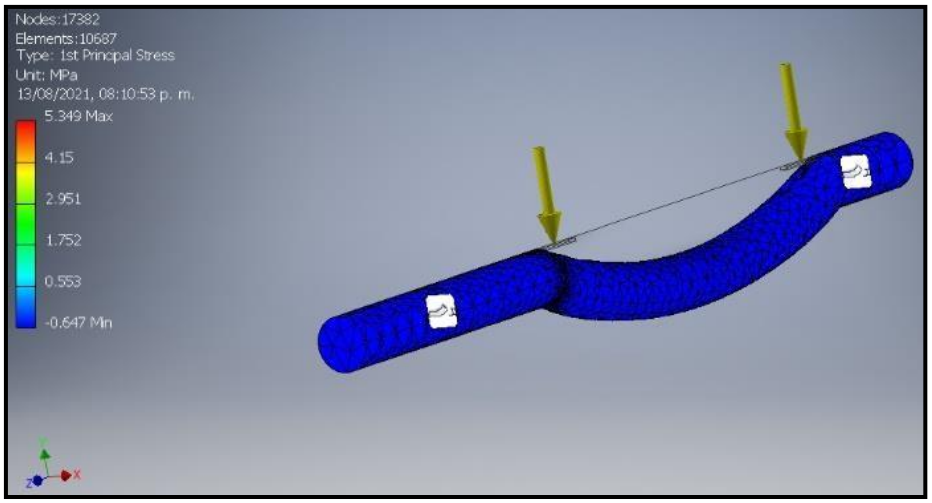


Figura 38. Principales esfuerzos del eje del rodete.

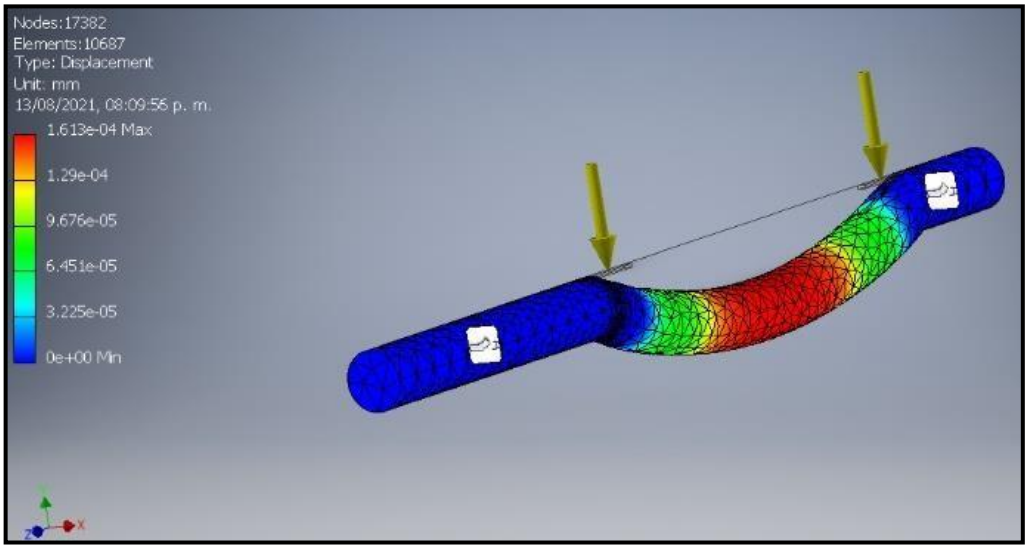


Figura 39. Campo de deformaciones en el eje del Rodete.

Luego de realizar el análisis en el software *Autodesk Inventor* se obtiene como resultado los valores tanto de deformación cómo de esfuerzos máximos que soporta cada una de las partes de la turbina.

para realizar este tipo de análisis se partió con datos de entrada considerando la presión máxima que se tiene a la salida de la tubería de presión con un valor de 11.38 psi y el material a usar es un acero inoxidable 304 ya que se trabajará en un ambiente que está propenso a corroerse; entonces el análisis realizado muestra que todas las partes de la turbina soportaran los esfuerzos y las deformaciones existentes.

5.9 Análisis para la implementación de la Pico Turbina

5.9.1 Análisis de la implementación de la cámara de carga.

La implementación de un sistema de Pico-generación conlleva a la realización de muchas actividades que tienen como fin la generación de energía eléctrica puesto que esto contribuye a que las Zonas no Interconectadas puedan mejorar su calidad de vida y realizar sus actividades socio-económicas de la mejor manera.

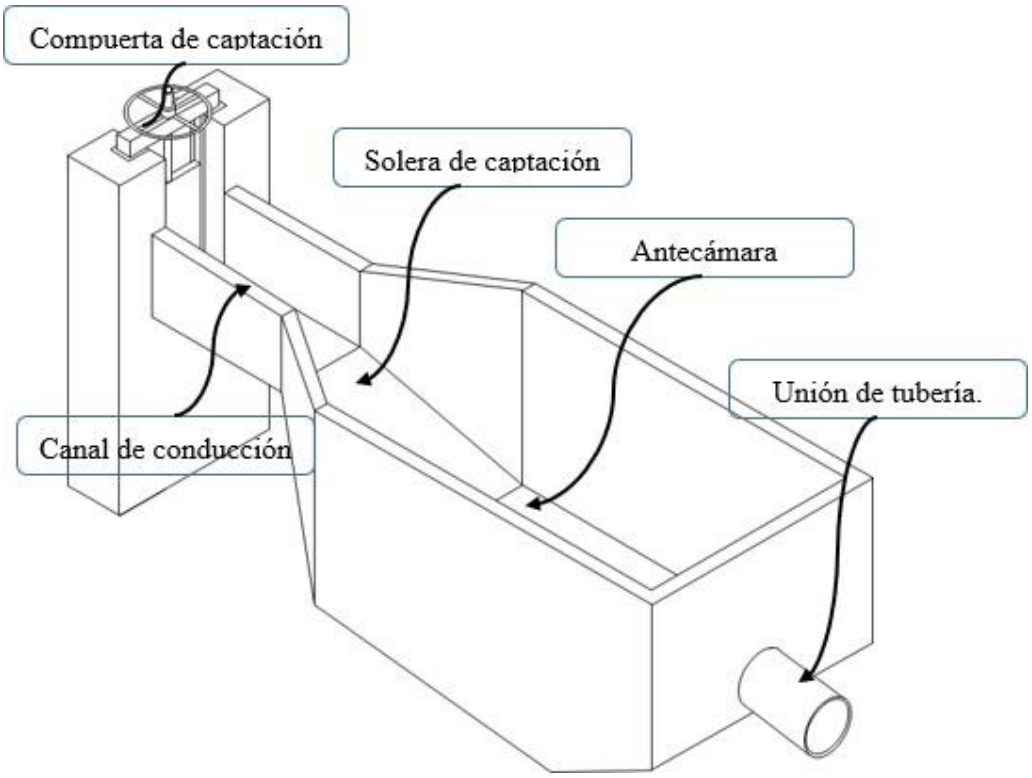


Figura 40. Modelo *en 3D* de la cámara para la PCH.

Para la construcción del tanque de captación se analiza la disponibilidad de los materiales que existan en la localidad pues esto nos ayudará evitar gastos excesivos para el proyecto.

Dentro de las actividades que ayudan a la implementación de la PCH está la implementación de un tanque de carga, para el proyecto se tendrá la forma como se puede observar en la Figura 40 ya que esto cumple con las funcionalidades expuestas en el punto 5.7 de este documento y esta dimensionada bajo los parámetros tanto de salto como de caudal disponibles

Para la implementación de la cámara de carga se debe realizará una excavación muy cerca de la laguna que se tiene disponible, estará construido con ladrillo rustico y tendrá un revestimiento de una mezcla de arena y cemento con la finalidad de impermeabilizar el tanque evitando que exista fugas.

El tanque de carga tendrá una profundidad promedio de 1.4 m un ancho de 1.5m y un largo de 1.7 m el mismo tendrá una capacidad volumétrica de $3.6m^3$, suficiente para alimentar por medio de la tubería de presión a la turbina durante todo el periodo de funcionamiento.

Además, el tanque de captación tiene un muro de contención de 0.4m de ancho y 2m de profundidad, tendrá anclado una compuerta metálica que estará construida de acero inoxidable 304 este servirá para regular y dar el paso de agua desde la laguna hasta el tanque de captación, por otro lado, también servirá para cerrar el paso de agua cuando se requiere limpiar el tanque ya que en el fondo quedaran sedimentos y partículas sólidas.

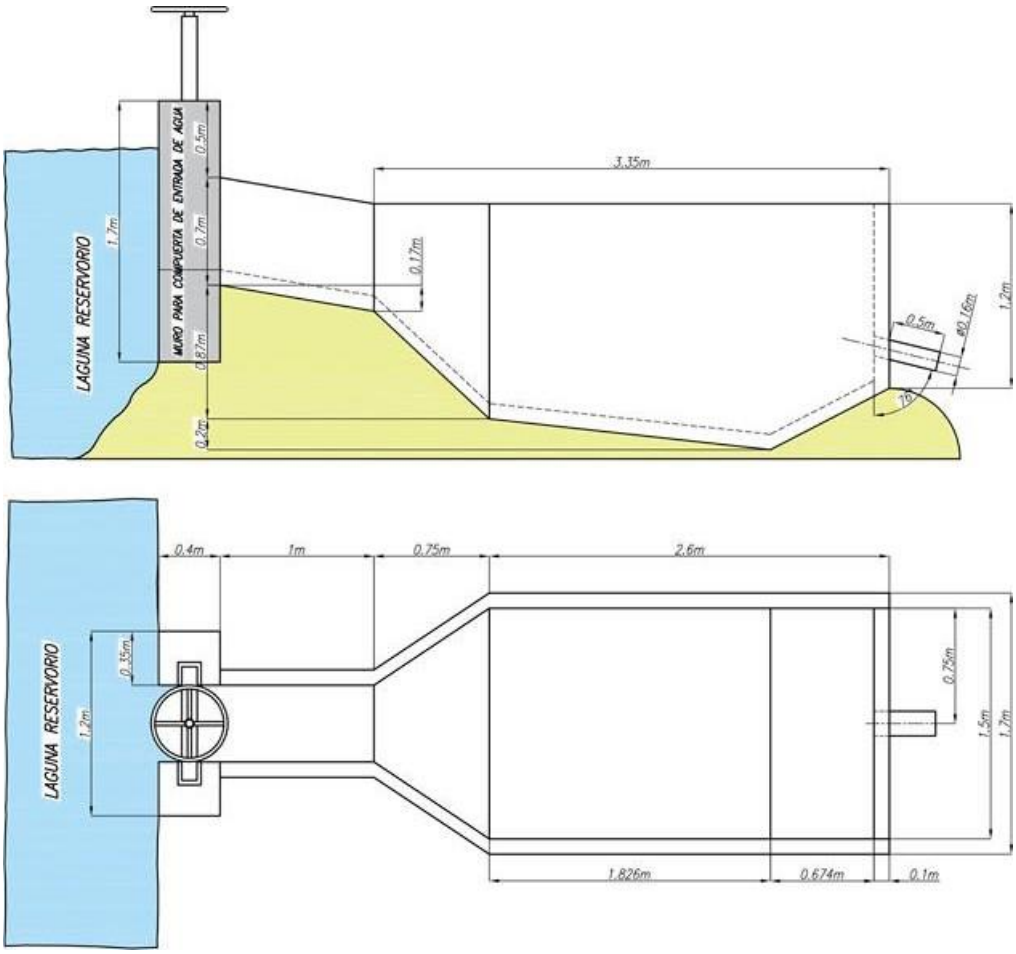


Figura 41. Modelo dimensional de la cámara de carga diseñada para la PCH.

El tanque de captación también tendrá un ángulo de inclinación de 10º en el canal de conducción de la entrada, luego un ángulo de 25º ya que este ayudará para liberar flujos turbulentos y permite que las partículas sólidas vayan hasta el piso por gravedad cumpliendo el papel de desarenador ya que en épocas de lluvias es más propenso que los sedimentos vayan hasta la tubería de presión. Para la instalación de la tubería de presión se dejará un tramo de tubería de 0.5m instalada en el tanque (se tiene que garantizar la hermeticidad en la junta de la tubería con el tanque), para que luego se ajuste una válvula de cierre y la tubería por medio de bridas así evitar fugas (Figura 41).

5.9.2 Análisis para la implementación de la tubería de presión.

Otro aspecto muy importante para la implementación de la PCH es la tubería de presión; luego de los cálculos respectivos resulto una tubería de 160mm de diámetro que corresponde a una tubería comercial de 6 in, el material será PE-HD, la tubería tendrá una longitud aproximada de 90 m medidos desde la pared de la cámara de carga hasta la tobera de la turbina.

Justo a la salida del tanque de captación se instalará una válvula de cierre y cada tres metros se apoyará a la tubería para evitar agrietamientos por pandeo cuando está conduciendo el agua o a su vez posibles fugas en las uniones de tubería – tubería y también ayudara para que la tubería se mantenga estable todo esto debido a que la topografía del terreno es irregular u no tiene una pendiente totalmente plana (Figura 42).

Para la adquisición de la tubería de presión se analizó la disponibilidad en la zona, mediante varios proveedores como son Plásticos Rival, Tuberías Plastigama y en estas dos fábricas disponen este tipo de tuberías y los accesorios para su instalación, gracias a esto se ahorrará en importación haciendo que el proyecto sea factible su implementación.

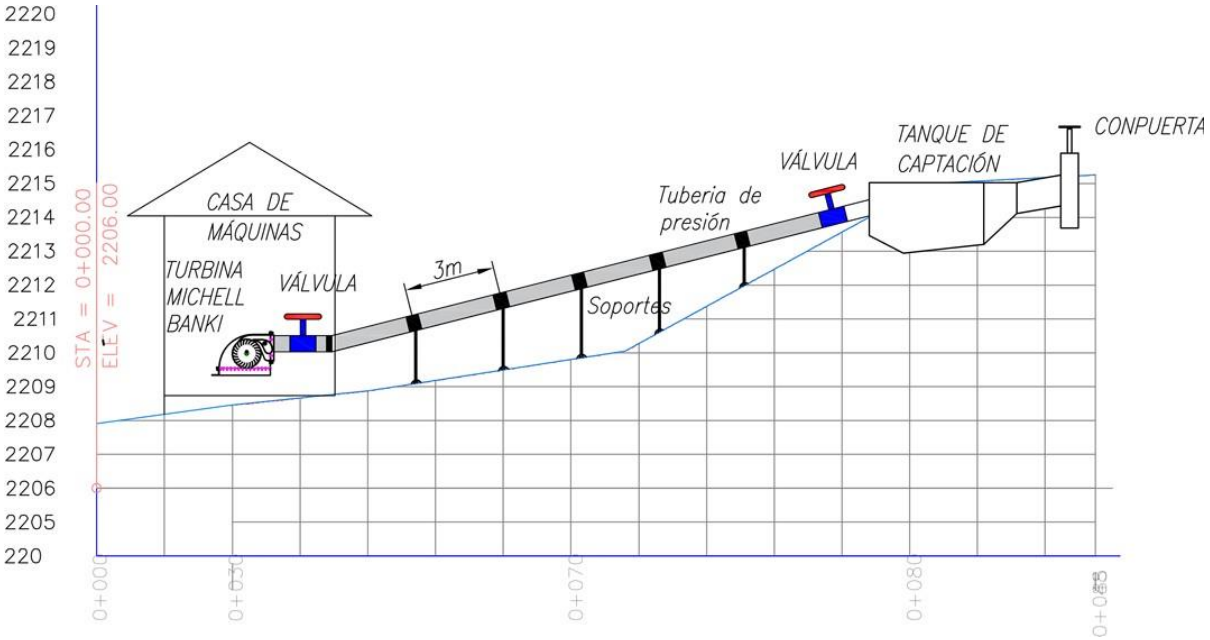


Figura 42. Instalación de la tubería de presión para la PCH.

5.9.3 Análisis para la implementación de la pico-turbina hidráulica.

Para la implementación de la pico-turbina en primer lugar se analizó la presencia de talleres mecánicos que brinden el servicio de construcción de este tipo de productos en la Provincia del Azuay, en vista de que la turbina juega un papel importante en la generación

de energía debe cumplir con sus acabados y tolerancia dimensionales, geométricas y superficiales.

Luego de realizar este análisis de encontró varios locales que brindan este servicio: la turbina será construida en acero inoxidable 304 debido a que existen partes internas de la turbina que tendrá contacto directo con el agua este material ayudará a prevenir el deterioro por corrosión.

El agua que ingresa a la turbina saldrá por un canal de derivación que hará que el fluido vaya hacia una quebrada presente al costado del terreno, también a la entrada de turbina y al final de la tubería de presión se instalara una válvula de cierre el mismo que servirá para cerrar el paso de agua cuando se requiera realizar trabajos de mantenimiento en la turbina (Figura 43)

Dentro de la casa de máquinas se tendrá una base de soporte en el cual tendrá pernos M16 los mismos tendrán una longitud de 40 mm pasados desde la base de concreto para quese pueda anclar la turbina al piso.

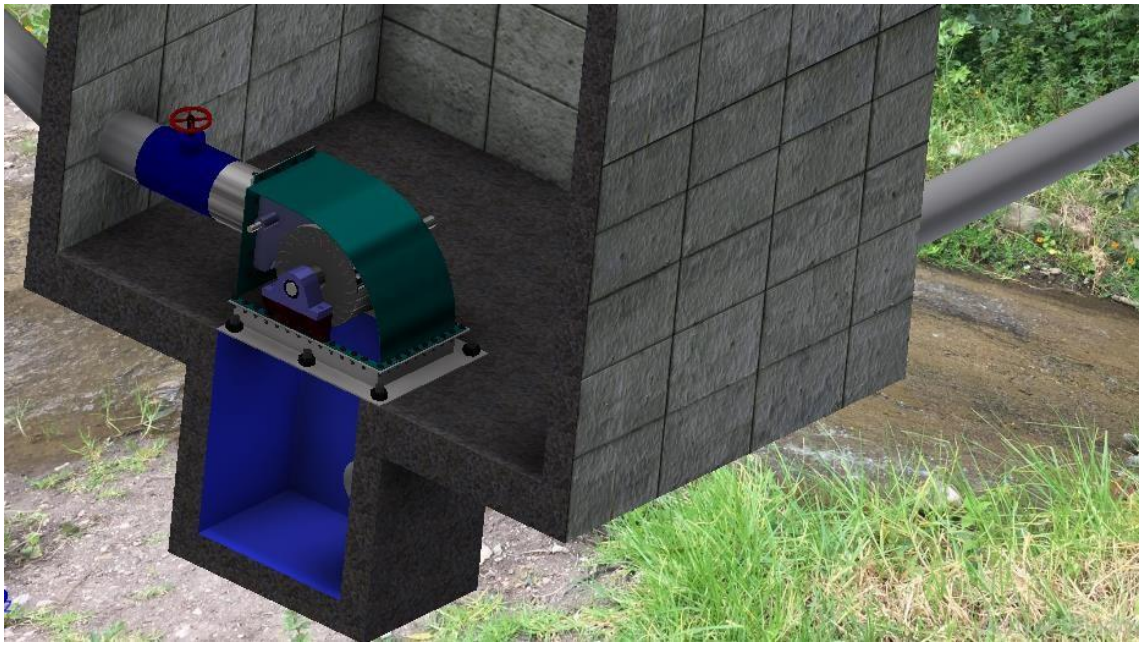


Figura 43. Instalación de la turbina en la casa de máquinas.

La turbina ira instalada en la casa de máquinas dentro de cual estará también el sistema de transmisión de potencia, el generador eléctrico y estará el sistema de control de energía (Figura 44).

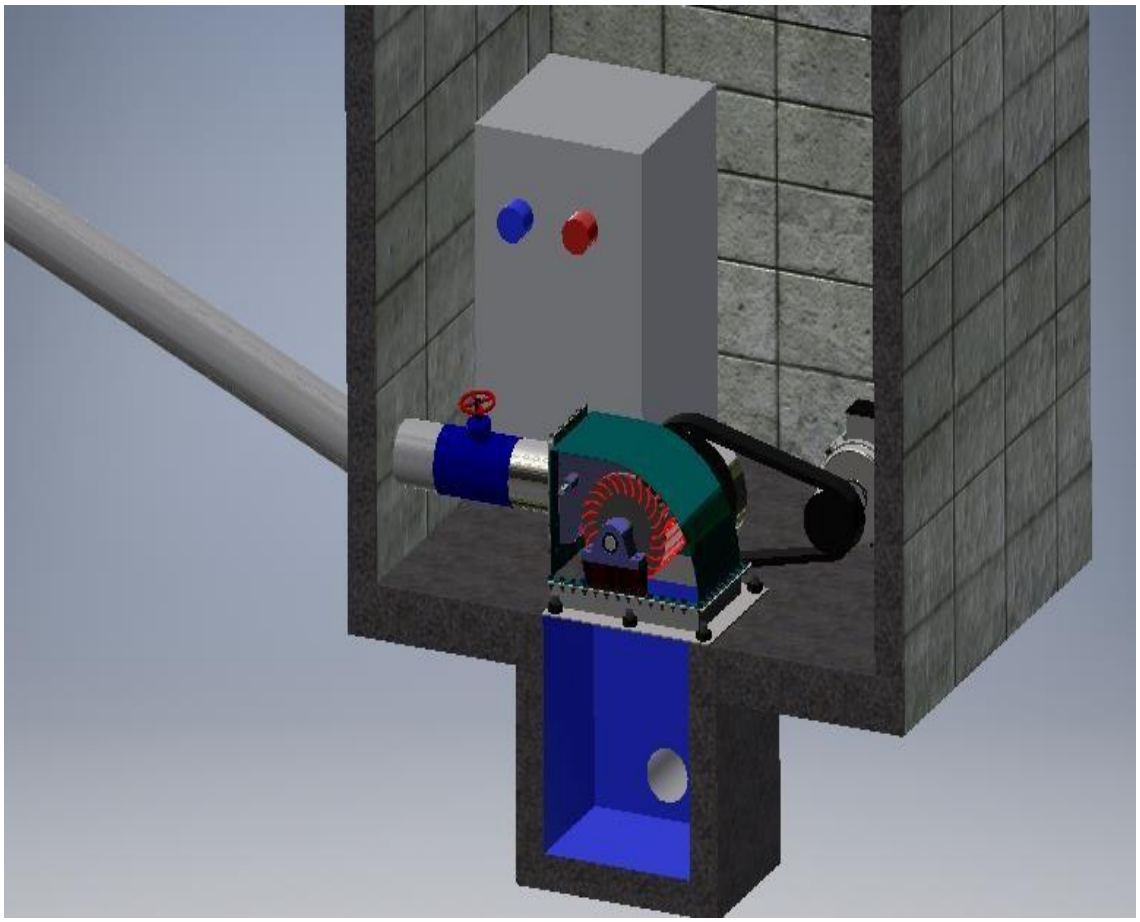


Figura 44. Sistema de transmisión de potencia al generador.

5.10 Simulación del funcionamiento de la PCH

Por otro lado, también se realizó la simulación en el programa LABVIEW 2020 con la finalidad de notar el comportamiento de la PCH con una turbina tipo Michell-Banki en relación a la variación del caudal y el salto, esto se hizo usando el módulo de *Mathscript* para lo que es la programación y el módulo *DCC* para lo que es la interfaz de usuario.

En la Figura 45 y 46 se puede ver la venta de programación y la ventana que se muestra al usuario respectivamente; cómo se puede observar es muy interactivo disponiendo de una barra deslizante para que el usuario pueda ir variando la altura y el caudal y observando los resultados que se obtiene tanto de diámetro de la tubería como de las potencias respectivas.

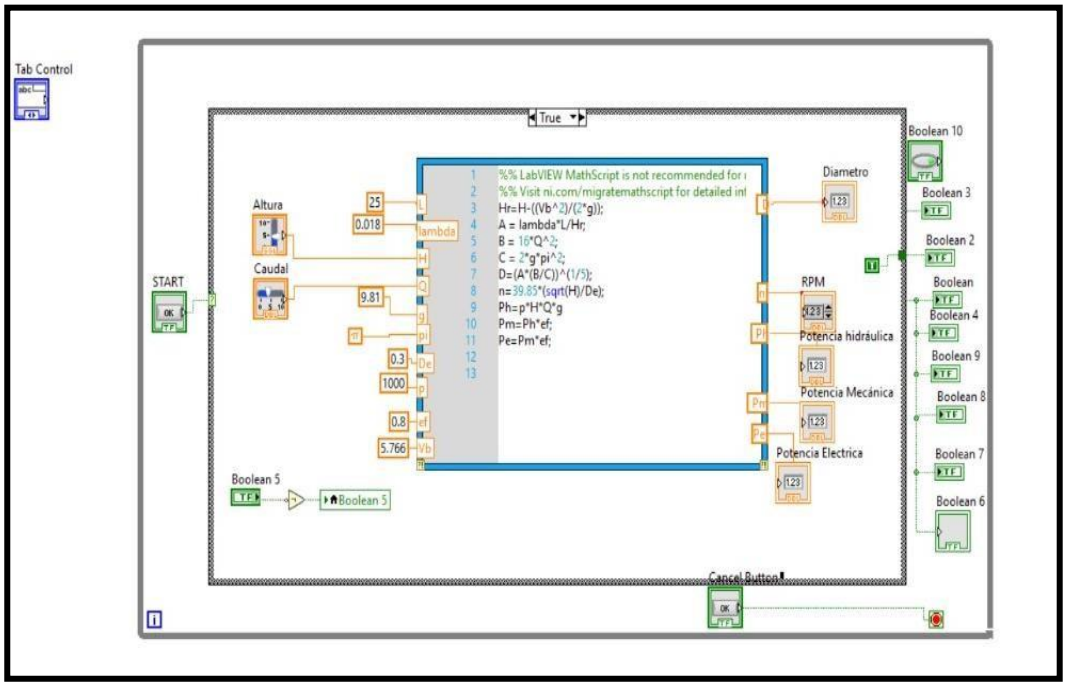


Figura 45. Ventada de programación en el módulo de Mathscript.

Figura 46. Ventana DCC de interfaz para el usuario.

5.11 Análisis de costos de implementación

En las Tablas 11-14 se presenta un análisis de precios unitarios del sistema donde se emplea un 20% de utilidad de sus componentes, basados en la tabla salarial del 2021 de la contraloría General del Estado.

Esta tabla implementada se basa principalmente en la descripción, cantidad, horas, y costo total de los siguientes factores:

- Equipos y herramientas,
- Materiales,
- Transporte

- Mano de obra.

Siendo la sumatoria de todas estas con la utilidad, el que representa el valor total necesario para la implementación del sistema.

Tabla 11. Costos unitarios para el tanque de captación

PROYECTO: PICO CENTRAL HIDROELECTRICA					
ÁNALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
NOMBRE DEL OFERENTE:	**GIE**				
PROYECTO: PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA					
ITEM:	**1**				
DESCRIPCIÓN:	***TANQUE DE CAPTACIÓN***				
UNIDAD:	**u**				
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
DESCRIPCIÓN		**CANTIDAD A**	**TARIFA HORA B**	**RENDIMIENTO HORAS/U C**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Herramienta menor		3%MO			35.38
				PARCIAL M	35.38
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		**UNIDAD**	**CANTIDAD A**	**PRECI/U**	**COSTO TOTAL C=A*B**
Arena		m3	2.00	15.00	30.00
Graba		m3	3.00	15.00	45.00
Piedra		m3	1.00	10.00	10.00
Cementro		u	8.00	8.00	64.00
Clavos		u	5.00	0.60	3.00
Tablas de encofrado		u	10.00	3.00	30.00
Varilla 10mm		u	1.00	12.00	12.00
Ladrillos		u	200.00	0.20	40.00
Vigas de madera		u	9.00	10.00	90.00
Compuerta metálica		u	1.00	400.00	400.00
Regilla para cámara de carga		u	1.00	20.00	20.00
				PARCIAL N	**744.00**
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**CANTIDAD A**	**TARIFA/U B**	**DISTANCIA C**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Transporte Cuenca Paute	u	1	100.00	1	100.00
				PARCIAL O	100.00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN		**CANTIDAD A**	**S.R.H. B**	**RENDIMIENTO HORAS/U**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Maestro de obra		1	4.00	80	320.00
Albañiles		3	3.58	80	859.20
				PARCIAL P	1179.20
TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)					**2058.58**
INDIRECTOS Y UTILIDAD				20.00%	411.72
COSTO TOTAL DEL RUBRO					
VALOR PROPUESTO					**2470.29**

Tabla 12. Costos unitarios para la tubería de presión

PROYECTO: PICO CENTRAL HIDROELECTRICA					
ÁNALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
NOMBRE DEL OFERENTE:	**GIE**				
PROYECTO: PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA					
ITEM:	**2**				
DESCRIPCIÓN:	***TUBERIA DE PRESIÓN***				
UNIDAD:	**u**				
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
DESCRIPCIÓN		**CANTIDAD A**	**TARIFA HORA B**	**RENDIMIENTO HORAS/U C**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Herramienta menor		3%MO			18.38
				PARCIAL M	18.38
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		**UNIDAD**	**CANTIDAD A**	**PRECI/U**	**COSTO TOTAL C=A*B**
Tubo desague PE-HD Ø 6in x 3m		m	30.00	54.00	1620.00
Válvula de compuerta		u	2.00	40.00	80.00
Abrazadera de sujesión		u	30.00	3.00	90.00
Postes de apoyo		u	30.00	10.00	300.00
				PARCIAL N	**2090.00**
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**CANTIDAD A**	**TARIFA/U B**	**DISTANCIA C**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Transporte Cuenca Paute	u	1	150.00	1	150.00
				PARCIAL O	150.00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN		**CANTIDAD A**	**S.R.H. B**	**RENDIMIENTO HORAS/U**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Plomero		1	4.00	80	320.00
Albañiles		1	3.66	80	292.80
				PARCIAL P	612.80
TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)					**2871.18**
INDIRECTOS Y UTILIDAD				20.00%	574.24
COSTO TOTAL DEL RUBRO					
VALOR PROPUESTO					**3445.42**

Tabla 13. Costos unitarios para la turbina Michell Banki

PROYECTO: PICO CENTRAL HIDROELECTRICA					
ÁNALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
NOMBRE DEL OFERENTE:	**GIE**				
PROYECTO: PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA					
ITEM:	**3**				
DESCRIPCIÓN:	***TURBINA MICHELL BANKI***				
UNIDAD:	**u**				
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
DESCRIPCIÓN		**CANTIDAD A**	**TARIFA HORA B**	**RENDIMIENTO HORAS/U C**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Herramienta menor		3%MO			33.70
				PARCIAL M	33.70
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		**UNIDAD**	**CANTIDAD A**	**PRECI/U**	**COSTO TOTAL C=A*B**
Plancha A 36 1200mm x 2440mm x 3mm		u	2.00	67.00	134.00
Eje AISI 4540 Ø 1 1/5 in x 1m		m	1.00	50.00	50.00
Chumaceras SYNT 35 F		u	2.00	34.00	68.00
Pernos M8 x 45		u	4.00	10.00	40.00
Pernos M10 x 45		u	52.00	1.34	69.68
				PARCIAL N	**361.68**
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**CANTIDAD A**	**TARIFA/U B**	**DISTANCIA C**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Transporte Cuenca Paute	u	1	150.00	1	150.00
				PARCIAL O	150.00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN		**CANTIDAD A**	**S.R.H. B**	**RENDIMIENTO HORAS/U**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Mecánico General		2	4.06	120	974.40
Tornero		1	3.72	24	89.28
Soldador		1	3.72	16	59.52
				PARCIAL P	1123.20
TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)					**1668.58**
INDIRECTOS Y UTILIDAD				20.00%	333.72
COSTO TOTAL DEL RUBRO					
VALOR PROPUESTO					**2002.29**

Tabla 14. Costos unitarios para la casa de máquinas.

PROYECTO: PICO CENTRAL HIDROELECTRICA					
ÁNALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
NOMBRE DEL OFERENTE:	**GIE**				
PROYECTO: PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA					
ITEM:	**4**				
DESCRIPCIÓN:	***Casa de Máquinas***				
UNIDAD:	**u**				
EQUIPO Y HERRAMIENTA					
DESCRIPCIÓN		**CANTIDAD A**	**TARIFA HORA B**	**RENDIMIENTO HORAS/U C**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Herramienta menor		3%MO			26.78
				PARCIAL M	26.78
MATERIALES					
DESCRIPCIÓN		**UNIDAD**	**CANTIDAD A**	**PRECI/U**	**COSTO TOTAL C=A*B**
Arena		m3	10.00	15.00	150.00
Graba		m3	11.00	15.00	165.00
Piedra		u	6.00	10.00	60.00
Cemento		u	15.00	8.00	120.00
Bloque		u	420.00	0.45	189.00
Varillas 10 mm		u	4.00	12.00	48.00
Eternit		u	24.00	16.00	384.00
Correa G 6m		u	10.00	22.00	220.00
Cadena corrugada para construcción		u	12.00	23.00	276.00
				PARCIAL N	**1612.00**
TRANSPORTE					
DESCRIPCIÓN	**UNIDAD**	**CANTIDAD A**	**TARIFA/U B**	**DISTANCIA C**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Transporte Cuenca Paute	u	1	100.00	1	100.00
				PARCIAL O	100.00
MANO DE OBRA					
DESCRIPCIÓN		**CANTIDAD A**	**S.R.H. B**	**RENDIMIENTO HORAS/U**	**COSTO TOTAL D=A*B*C**
Maestro de obra		1	4.00	80	320.00
Albañiles		2	3.58	80	572.80
				PARCIAL P	892.80
TOTAL COSTOS DIRECTOS X = (M+N+O+P)					**2631.58**
INDIRECTOS Y UTILIDAD				20.00%	526.32
COSTO TOTAL DEL RUBRO					
VALOR PROPUESTO					**3157.90**

Tabla 15. Costo total pico central hidroeléctrica.

6 Resultados y discusión

6.1 Resultados para los parámetros de selección.

Luego de analizar el lugar en donde se pretende implementar el sistema de Pico-generación se logró obtener un caudal de $Q = 0.13\ {}^{m^3}\!/_{s}$ después de las mediciones realizadas.

Realizado el estudio topográfico se tiene que desde la cota superior de la laguna hasta el lugar de implementación un salto de agua de 8m, lo que garantiza el diseño para la picoturbina de generación (Figura 47) (Anexo 3)

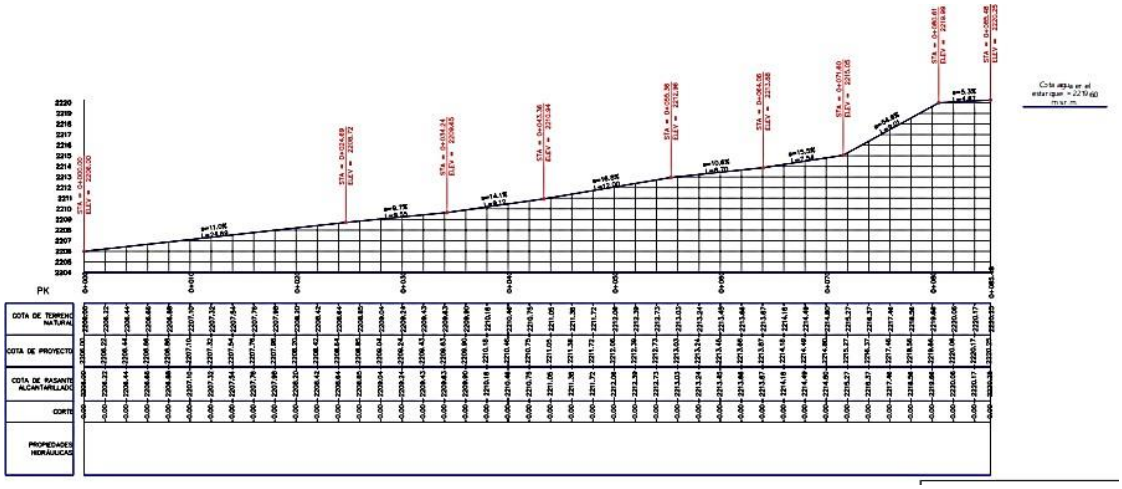


Figura 47. Plano Topográfico.

6.2 Resultados del diseño, modelamiento y simulación.

Luego de realizar el diseño, modelamiento y simulación en al software AUTODESK INVENTOR se logró determinar que el dimensionamiento de los componentes de la turbina esta diseñados para que soporten las cargas de presión y esfuerzos que se generan

cuando el fluido atraviesa las paredes de toda la turbina, partiendo desde la tobera ingresando por el inyector, el rodete y la carcasa. En la Tabla 16 se puede ver el comportamiento de la deformación de cada una de las partes de la turbina michell banki cuando se aplica la presión de agua, teniendo como la deformación máxima en el inyector de 0.9416mm en comparación a 45 mm de deformación que soporta el acero inoxidable 304.

Tabla 16. Deformaciones de las partes de la turbina Michell Banki.

	Carcasa Turbina Michell Banki **Deformación max:** 0.1125mm **Deformación min:** 0.0225mm
	Inyector Turbina Michell Banki **Deformación max:** 0.9416mm **Deformación min:** 0.1883mm
	Álabe Directriz Turbina Michell Banki **Deformación max:** 0.0.01868mm **Deformación min:** 0.0.00374mm

	Álabe Turbina Michell Banki **Deformación max:** 0.2758mm **Deformación min:** 0.0552mm
	Álabe Rodete **Deformación max:** 1.613e-04mm **Deformación min:** 3.255e-05mm

6.3 Resultados del análisis de costos y de la implementación.

Luego de realizar todo el análisis de costos para la implementación se pudo denotar que es viable la implementación de la PCH debido a que todos los materiales para la construcción existen a nivel nacional por lo que no se tiene que pensar en trámites de importación ahorrando tiempos y costos, por otro lado también la disponibilidad de fabricar dentro del país hace que el sistema sea mucho más asequible dando viabilidad para la implementación del sistema incluso por costo ya que es relativamente económico teniendo en cuenta que una vez implementada la PCH el usuario no deberá preocuparse por gastos en energía eléctrica y por otro lado se podrá implementar el sistema en las Zonas no Interconectadas.

Hay que recalcar que los costos más elevados se lleva la implementación de la tubería de presión y la obra civil esto debido a la topografía del terreno se tiene que extender una longitud de hasta 90m para alcanzar la mínima altura de 8m para poder generar energía eléctrica, pudiendo minimizar este costo para otros proyectos en donde se pueda aprovechar de mejor manera los recursos hídricos y la topografía del terreno.

7 Conclusiones.

- Con la finalidad de realizar un análisis de los parámetros mínimos de caudal y salto para la generación de energía hidroeléctrica en los afluentes hídricos del Austro Ecuatoriano, se tomó como base de estudio la quebrada que traviesa el Colegio Técnico Agronómico Salesiano el mismo que a su paso forma una laguna con fines de reservorio para el riego, considerando un caudal de $0.13 m^3/s$ y salto hídrico de $8\ m$ para realizar el análisis; esto con la finalidad de promover el uso de los pequeños recursos hídricos disponibles en la zona.
- De acuerdo a los cálculos realizados de las partes que componen la Turbina Michell Banki se puede concluir que luego de las pérdidas por fricción y transmisión de potencia se obtiene una Potencia Mecánica de **6.12 kW** teniendo una eficiencia de 0.8% en la turbina hidráulica y una Potencia Eléctrica de **4.9 kW** con una eficiencia de 0.8% del generador la cual va a ser entregada al usuario.
- Por otra parte, para realizar la simulación de los esfuerzos y deflexiones de las partes internas y externas de la turbina se usó el software *Autodesk Inventor* con lo que se pudo comprobar que cada una de las partes soportan los esfuerzos y la deformación máxima generada con una presión máxima de 11.4 psi, concluyendo que el material y el espesor con el que fue diseñada es el idóneo para garantizar su correcto funcionamiento.
- Por último, se concluye que para este tipo de proyectos se garantiza la existencia de materiales a nivel nacional e incluso a nivel local para la parte de la obra civil y se dispone de personal calificado en el país para la construcción e implementación de la turbina lo que hace que los costos sean relativamente económicos teniendo en cuenta que una vez el sistema ya instalado y dando un correcto mantenimiento el usuario contara con energía renovable de por vida.

8 Recomendaciones.

- Debido a que no se cuenta con un historial de las variaciones del caudal del recurso hídrico es importante hacer un estudio completo de la hidrología para así asegurar la factibilidad del montaje de una Pico Central Hidroeléctrica.
- Se sugiere que el modelamiento de la turbina se realice teniendo un buen entendimiento sobre las diferentes turbinas que existen, debido a que se debe

considerar la más efectiva de acuerdo a la relación con el caudal y la altura que se disponga para la implementación del proyecto.

- Una vez ya instalada el sistema se recomienda realizar un mantenimiento permanente al tanque de captación de agua para la PCH con la finalidad de impedir el ingreso de partículas sólidas a la tubería para así evitar daños severos en los equipos.
- Se debería realizar un estudio de impacto real de la energía eléctrica en la mejora de la calidad de vida en las poblaciones rurales. Pues nos ayudaría a identificar capacidades sociales que se hayan puesto en riesgo con el ingreso de esta innovación, cuáles son los usos más frecuentes de la energía, si ha contribuido o no a la mejora de las actividades socio-económicas y educativas o ha planteado nuevas necesidades.

9 Referencias.

[1] «Estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano – ARCONEL». https://www.regulacionelectrica.gob.ec/boletines-estadisticos/ (accedido may 19, 2020).

[2] OLADE, *Apuntes para un manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas.* Bucaramanga, 1988. Accedido: jul. 30, 2021. [En línea]. Disponible en: http://biblioteca.olade.org/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=3477&shelfbrowse_itemnumber=3498

[3] E. F. S. Amaguaya y W. M. V. Herrera, «"DISEÑO E INSTALACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN LA HACIENDA LA ISABELA".», p. 199.

[4] A. Trujillo, «DISEÑO DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN LA LOCALIDAD DE USME, BOGOTÁ.», Universidad Catolica de Colombia, 2017.

[5] T. Reyna, S. Reyna, M. Lábaque, C. Riha, y C. Góngora, «DESAFIOS AMBIENTALES PARA USO DE LA HIDROGENERACIÓN», 2017.

[6] N. G. Tenorio Zurita, «Diseño e implementación de un Prototipo de una PCH para uso Rural», p. 168, dic. 2015.

[7] Foro Nuclear, «¿Qué es una central hidroeléctrica?», *Foro Nuclear*. https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-una-central-hidroelectrica/ (accedido ago. 10, 2021).

[8] «MICRO-HIDROELÉCTRICA TIPO MICHELL BANKI, FUNCIONAMIENTO, MANTENIMIENTO Y COMPONENTES». Accedido: may 12, 2020. [En línea]. Disponible en: http://www.biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0550_M.pdf

[9] J. A. B. Morazán, «PROYECTOS PICO HIDROELÉCTRICOS PARA ELECTRIFICACIÓN DE FINCAS CAFETALERAS EN ZONAS AISLADAS», p. 7.

[10] B. E. Vivas Rodríguez, «Diseño de una Micro Central hidroeléctrica para la Hacienda Las Garzas». feb. 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjq_aj2vqryAhWURTABHRGMDaUQFnoECA4QAQ&url=http%3

A%2F%2Frepositorio.utn.edu.ec%2Fhandle%2F123456789%2F10289&usg=AOvVaw39A6ajduMCXYs2PLK9JKfq

[11] S. Vargas, «Cómo Funciona una Central Hidroeléctrica | CurioSfera-Ciencia », *CurioSfera Ciencia*, jul. 2018. https://curiosfera-ciencia.com/como-funciona-una-central-hidroelectrica/ (accedido ago. 11, 2021).

[12] Deingenierias.com, «LAS PARTES DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA - Deingenierias.com», mar. 08, 2019. https://deingenierias.com/hidroelectricas/partes-de-una-central-hidroelectrica/ (accedido jul. 30, 2021).

[13] F. E. S. Vargas, A. F. S. Alarcón, y C. A. G. Fajardo, «Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica.», *Inf. Téc.*, vol. 75, dic. 2011, doi: 10.23850/22565035.22.

[14] CABAL S.A., «Guia de buenas prácticas Minicentrales Hidroeléctricas», ene. 2014.

[15] P. Maher y N. Smith, «Un Manual Practico para Instalaciones de hasta 5kW en terrenos de Pendientes Fuertes.», en *Pico Hidro Potencia para Aldeas*, Gran Bretania, 2001.

[16] T. Sánchez, R. Escobar, S. Ramírez, W. Canedo, A. Gamarra, y Y. Guzmán, «Microcentrales hidroelectricas Una alternativa para el desarrollo Rural», p. 24, 2010.

[17] C. Conza y D. Soto, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA PICOCENTRAL HIDRÁULICA CON TURBINAS TIPO TURGO», Universidad Nacional de Loja, 2012. Accedido: may 04, 2020. [En línea]. Disponible en: https://docplayer.es/41287077-Carrera-de-ingenieria-electromecanica.html

[18] Instituto Tecnológico de Canarias, «Energías renovables y eficiencia energética», abr. 2008.

[19] D. C. A. Alejandro y P. F. C. Ismael, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE UNA CENTRAL PICO HIDROELÉCTRICA PARA LA VISUALIZACIÓN DE LAS VARIABLES ELÉCTRICAS PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA DE LA UNIDAD ACADÉMICA CIYA PERÍODO 2014.», p. 130, 2015.

[20] C. V. Patiño Guiracocha y J. D. Loja Bravo, «Diseño de una Microcentral Hidroeléctrica». jul. 2016.

[21] M. L. Zapata y A. X. P. Vásquez, «DISEÑO DE UNA MICROCENTRAL HIDROELÉCTRICA PARTIENDO DE UN SALTO HIDRÁULICO NATURAL LOCALIZADO EN LA VEREDA JARDÍN DE LAS PEÑAS, JURISDICCIÓN DEL MUNICIPIO DE MESETAS DEL DEPARTAMENTO DEL META», p. 93, 2017.

[22] M. S. M. Duarte, «"DISEÑO POR CFD DE UNA ROTO BOMBA ACCIONADA CON TURBINA MICHELL-BANKI, PARA EL BOMBEO DE AGUA DE RIEGO EN SECTORES VULNERABLES".», p. 118.

[23] J. Estrella, F. Zambrano, y C. San Martin, «Dimensionamiento de una Microcentral Hidroeléctrica», dic. 2016.

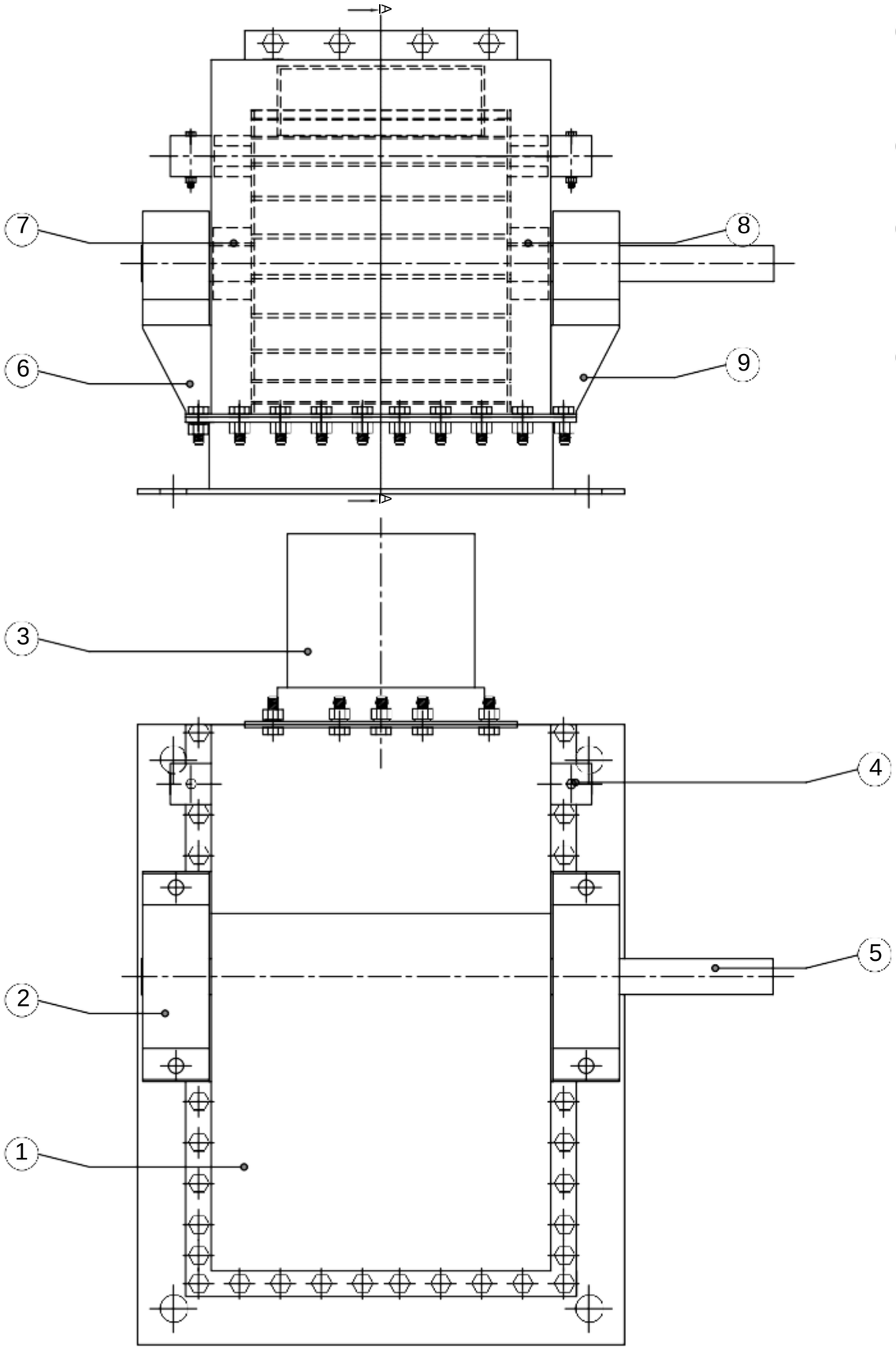
[24] C. Sullivann, «Turbina Kaplan», jun. 2017. https://3dwarehouse.sketchup.com/model/750f89c94569e4dd984c0ddecfd73cea/Turbina-Kaplan (accedido ago. 11, 2021).

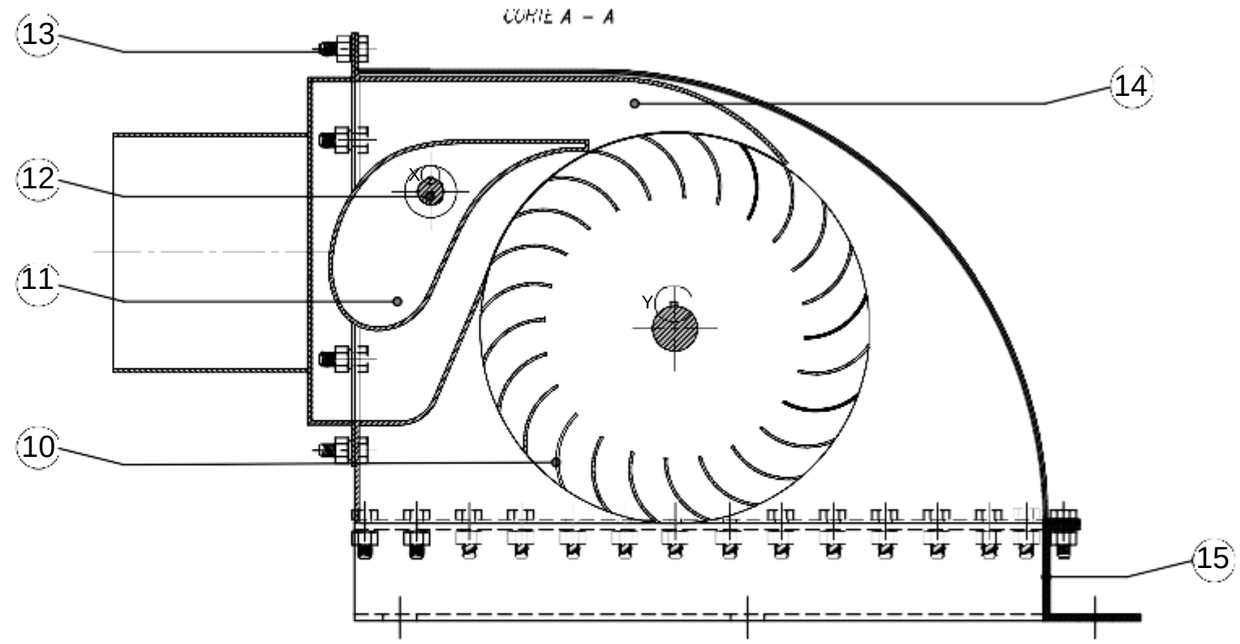
[25] I. T. D. G. ITDG-Perú, «Ficha Técnica Turbina Michell Banki 2», 2012. https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-hidroelectrica.html (accedido jul. 25, 2021).

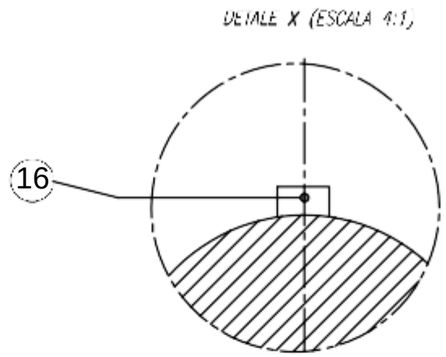
[26] B. Simón, «DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA DE FLUJO CRUZADO PARA LA REDUCCIÓN DEL COSTE ENERGÉTICO EN LAS CODUCCIONES FLUIDAS», p. 13, 2016.
[27] L. I. Caisachana Vega y W. G. Molina Zapata, «DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO GENERADORA HIDROELÉCTRICA APROVECHANDO EL RECURSO HÍDRICO EXISTENTE EN EL SECTOR ALUBILLO PERTENECIENTE AL CANTÓN CALUMA DE LA PROVINCIA DE BOLÍVAR», dic. 2014. https://docplayer.es/79198058-Universidad-tecnica-de-cotopaxi-unidad-academica-de-ciencias-de-la-ingenieria-y-aplicadas-carrera-de-ingenieria-electromecanica.html (accedido ago. 12, 2021).
[28] OLADE, *Guia de diseño de obras civiles de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Bucaramanga, 1985.
[29] R. Ortiz Flórez, *Pequeñas centrales hidroeléctricas*, 1. ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2011.
[30] R. T. P. Sahuinco, «BOCATOMA EN EL RÍO CHICAMA, EN LA ZONA DE FACALÁ», p. 138, feb. 2015.
[31] «Operación y mantenimiento de sistemas de riego.» ago. 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2016/03/1.pdf
[32] W. Balbuena Rojas y R. Capcha Salgado, «INFORME BOCATOMA ANGASMAYO», oct. 2014. https://cupdf.com/document/informe-bocatoma-angasmayo.html (accedido ago. 12, 2021).
[33] D. Inmaculada Fernandez y A. R. Robles Diáz, «Centrales de Generación de Energía Eléctrica». may 2016. [En línea]. Disponible en: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1160/course/section/1407/bloque-energia-III.pdf
[34] A. Leal, «Estudio sobre prefactibilidad en la instalaciòn de microcentral hidroeléctrica “LUTTI” Provincia de Cordoba», dic. 2013, [En línea]. Disponible en: http://hdl.handle.net/11086/1197
[35] I. T. D. G. ITDG-Perú, *Manual de mini y microcentrales hidráulicas, una guía para el desarrollo de proyectos*. Perú, 1995.
[36] U. J. S. Domínguez, *Máquinas hidráulicas*. Editorial ECU; N.º 1 edición (26 diciembre 2012), 2012.
[37] I. C. Hernandez, I. E. Indacochea, y I. R. P. Gomez, «TURBINAS MICHELL BANKI», p. 193.
[38] C. Mataix, «MECÁNICA DE FLUIDOS Y MAQUINAS HIDRÁULICAS, CLAUDIO MATAIX, SEGUNDA EDICIÓN», *MECÁNICA FLUIDOS MAQUINAS HIDRÁULICAS SEGUNDA Ed.*, oct. 1996, Accedido: jul. 30, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/43191075/MEC%C3%81NICA_DE_FLUIDOS_Y_MAQUINAS_HIDR%C3%81ULICAS_CLAUDIO_MATAIX_SEGUNDA_EDICI%C3%93N
[39] H. Goikoetxea, «CÁLCULOS DE LA TUBERÍA FORZADA DE UN CENTRAL HIDROELÉCTRICO», nov. 2016, Accedido: jul. 30, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/30252400/C%C3%81LCULOS_DE_LA_TUBER%C3%8DA_FORZADA_DE_UN_CENTRAL_HIDROEL%C3%89CTRICO

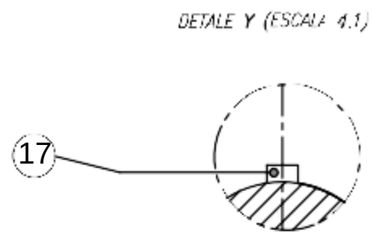
10ANEXOS

Anexo 1: Planos de la Pico-turbina.



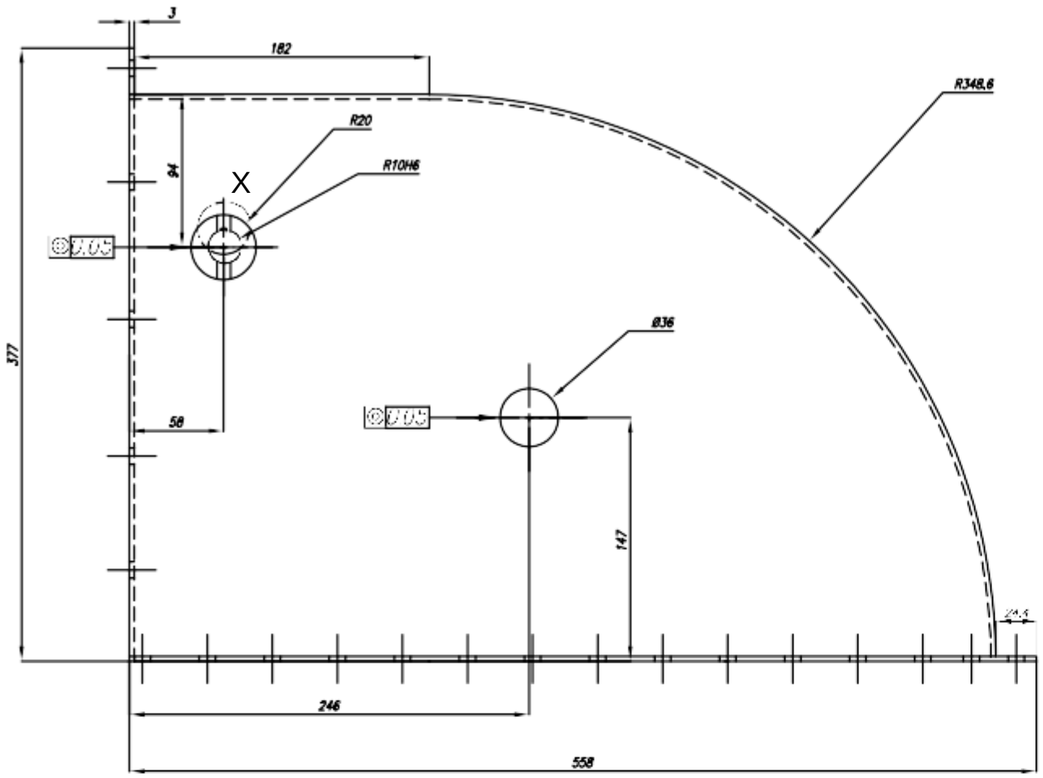


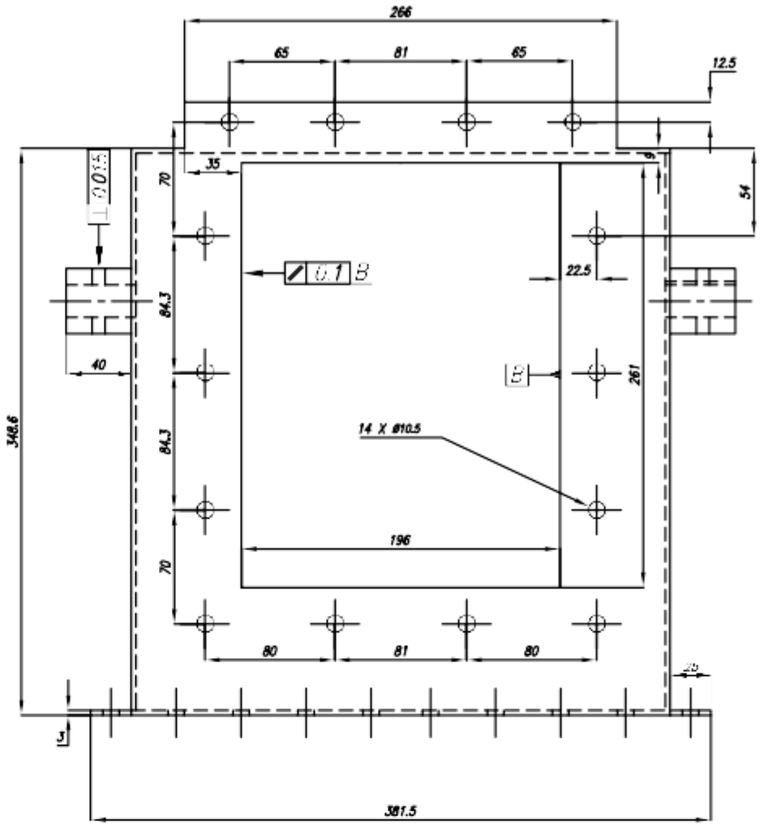


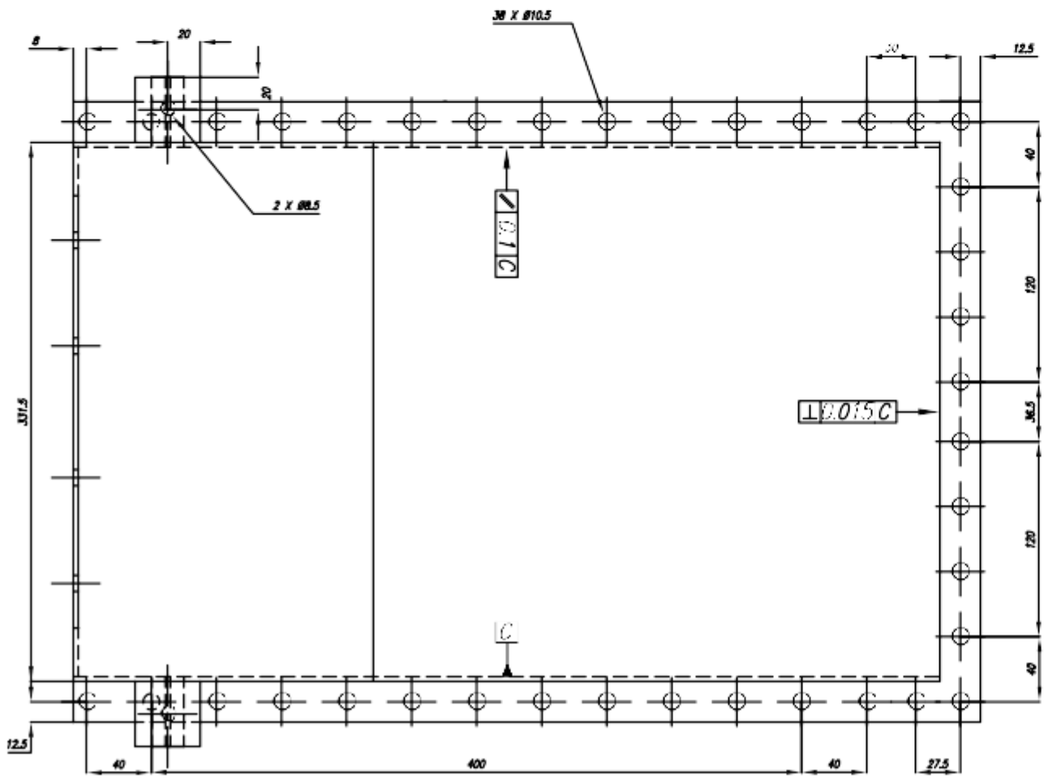


Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto
17	2	Chaveta Alabe Directriz		AISI 1045	20 X 5 X 5
16	2	Chaveta Rodete		AISI 1045	50 X 10 X 10
15	1	Base Turbina Michell Banki		A 36	1010 X 620
14	1	Inyector		AISI 304	1220 X 280
13	52	Perno M10 X 45	ISO 4017		
12	1	Eje Alabe Directriz		AISI 4140	Ø25.4 X 420
11	1	Alabe Directriz		AISI 304	1100 X 250
10	24	Alabe		AISI 304	1700 X 250
9	1	Base Chumacera Izquierda		A 36	180 X 210
8	1	Tapa Derecha Rodete		AISI 304	320 X 320
7	1	Tapa Izquierda Rodete		AISI 304	320 X 320
6	1	Base Chumacera Derecha		A 36	180 X 210
5	1	Eje Rodete		AISI 4140	Ø38.1 X 620
4	2	Perno M8 x 45	ISO 4017		
3	1	Tobera		AISI 304	900 X 270
2	2	Chumacera SYNT 35 F	Ind., SKF		
1	1	Carcasa Turbina Michell Banki		AISI 304	1220 X 550

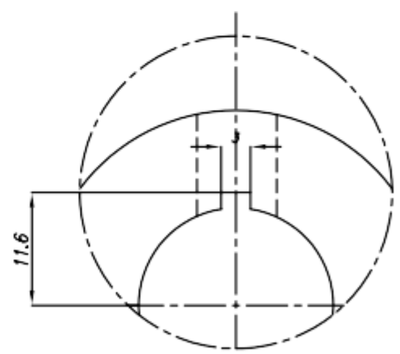
	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigüis & E. Medina	09/02/2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. John Calle	25/06/2021	
ESCALA: 1:2	Turbina Michell Banki		INGENIERIA MECANICA
			Lamina N° 01







DETALE X (ESCALA 4:1)



N6

Tolerancia ± 0.1

Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto
1	1	Carcasa Turbina Michell Banki		AISI 304	1220 X 550

	Nombre	Fecha
Dibujado:	B. Sigcho & E. Medina	09/02/2021
Revisado:	Ing. John Calle	23/06/2021

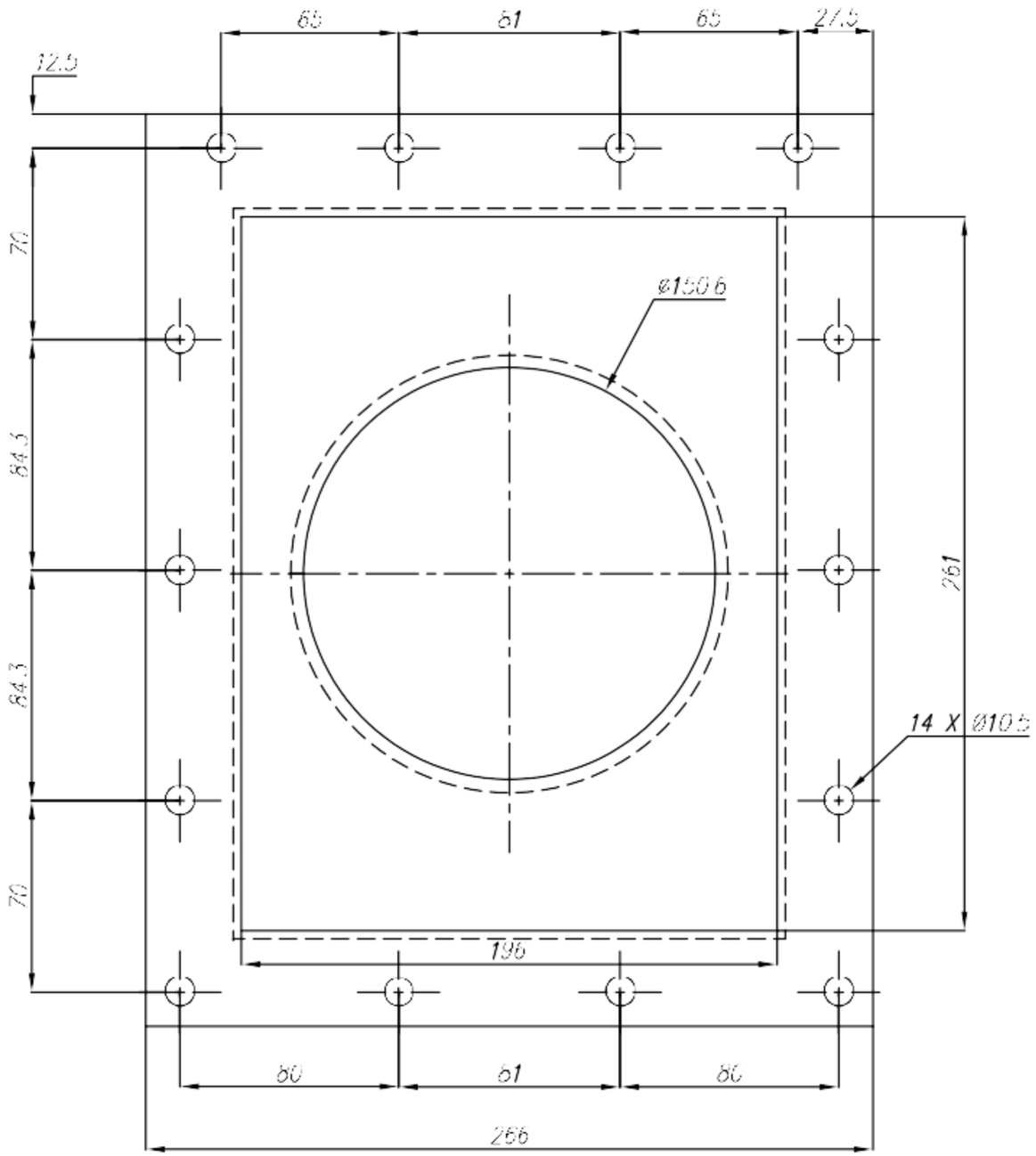
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

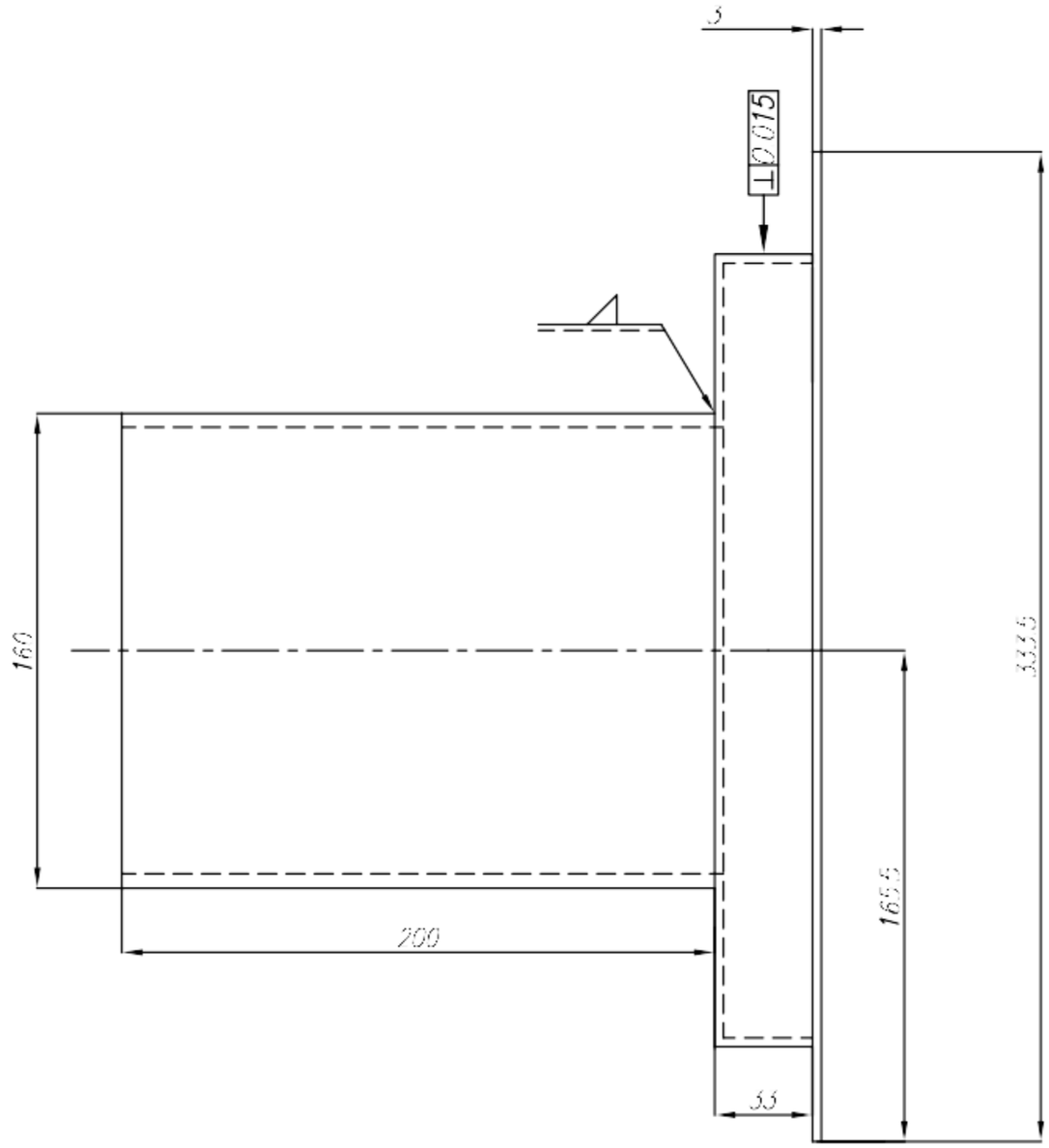
ESCALA: 1:2

Carcasa Turbina Michell Banki

INGENIERIA MECANICA

Lamina N° 02





N6

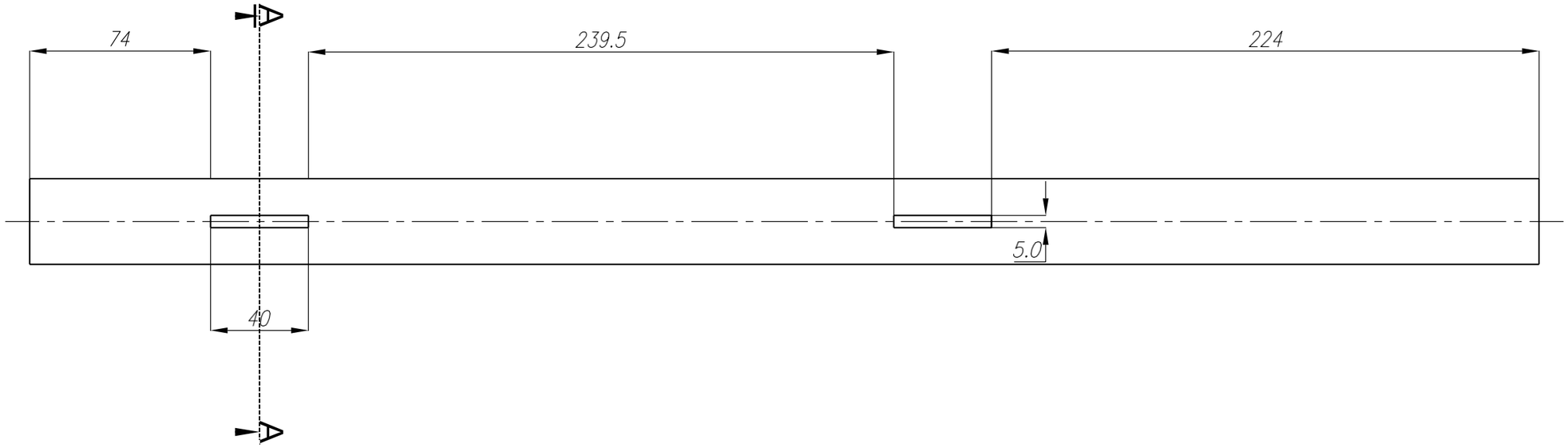
Tolerancia ± 0.1

3	1	Tobera		AIS 4140	900 X 270
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Materia	Dim. en bruto

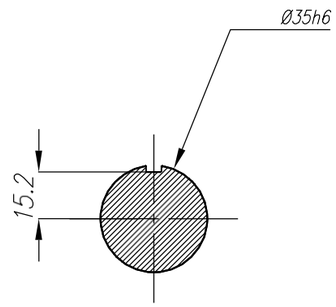
	Nombre	Fecha	
Dibujado.	B. Sigchi & E. Medina	09/02/2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado.	Ing. Juan Calle	23/06/2021	
ESCALA:	Tobera		INGENIERIA MECANICA
			Lamina N. 03

A6 105x148
A5 148x210
A4 210x297
A3 297x420
A2 420x594
A1 594x841
A0 841x1189

Hoja de enseñanza Técnica



CORTE A – A

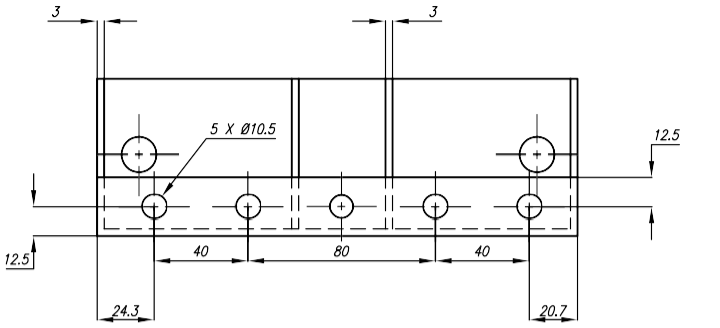


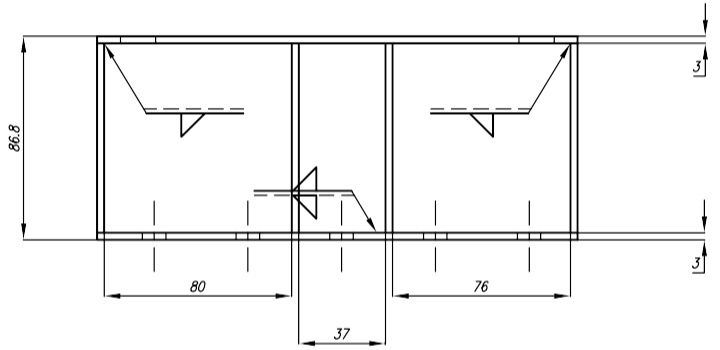
N6

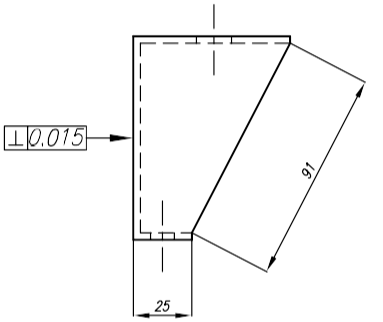
Tolerancia ± 0.1

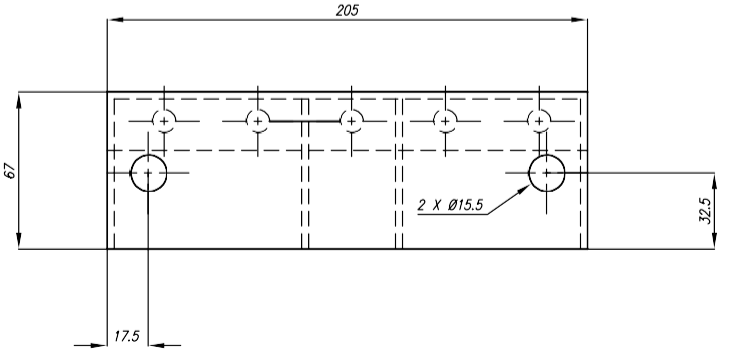
5	1	Ejé Rodete		AISI 4140	Ø38.1 X 620
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto

	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09 /02 /2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. John Calle	23 /06 /2021	
ESCALA:	Ejé Rodete		INGENIERÍA MECÁNICA
			Lamina N° 04









N6

Tolerancia ± 0.1

Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto
6	1	Base Chumacera Derecha		AISI 304	180 X 210

	Nombre	Fecha
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09/02/2021
Revisado:	Ing. John Calle	23/06/2021

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

ESCALA:

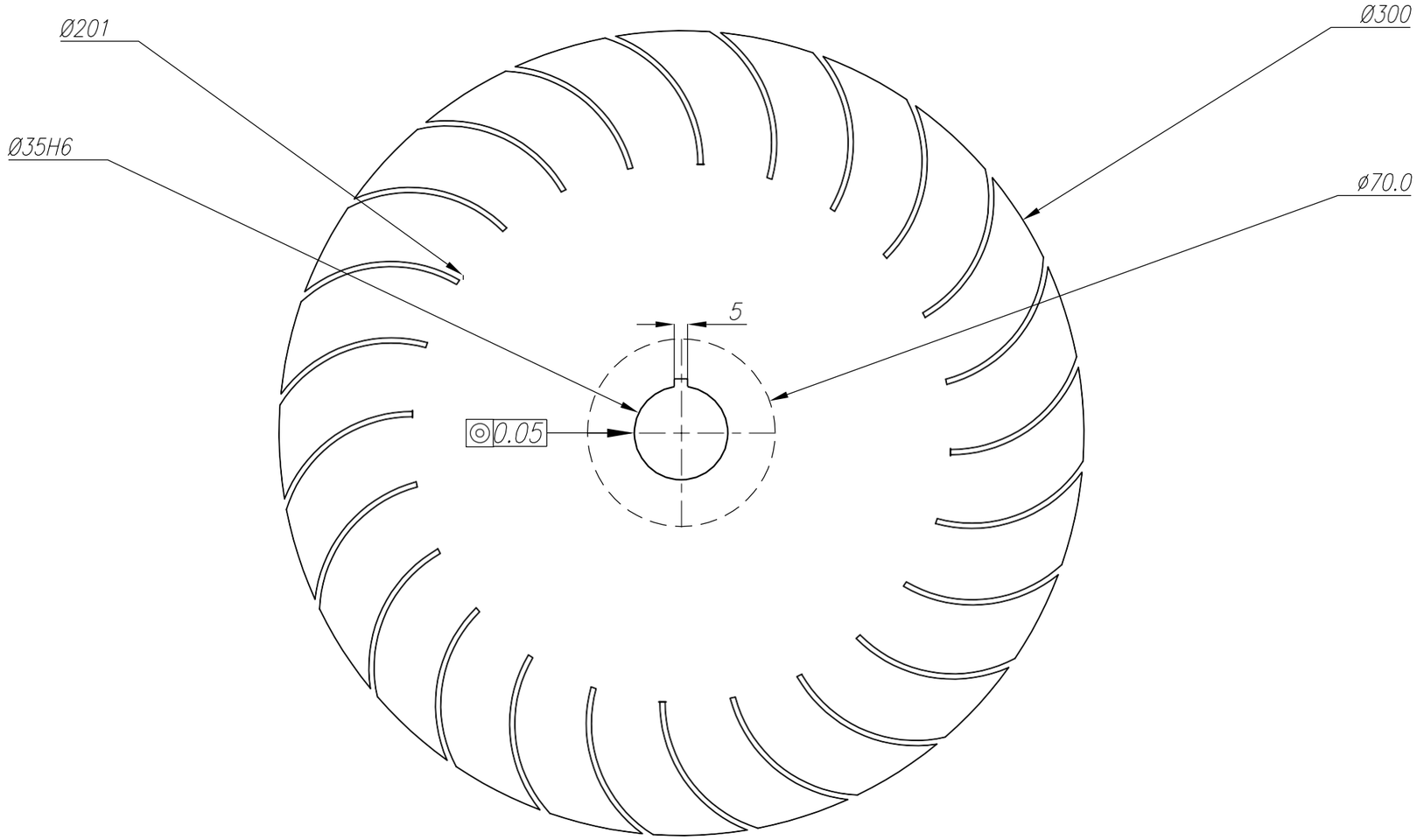
Base Chumacera Derecha

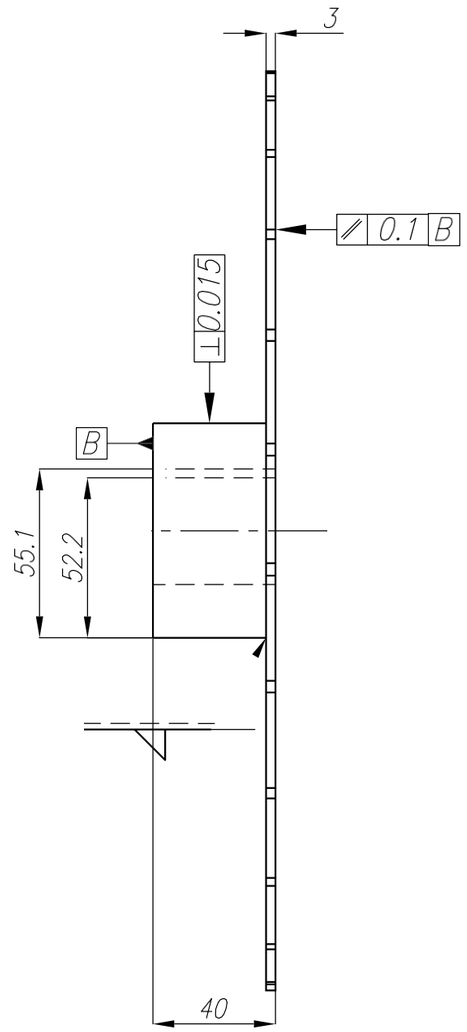
INGENIERÍA MECÁNICA

Lamina N° 05

A6 105x148
A5 148x210
A4 210x297
A3 297x420
A2 420x594
A1 594x841
A0 841x1189

Hoja de enseñanza Técnica





N6

Tolerancia ± 0.1

Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto
8	1	Tapa Izquierda Rodete		AISI 304	320 x 320

	Nombre	Fecha
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	03 02 2021
Revisado:	Ing. John Calle	23 06 2021

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

ESCALA: 1:1

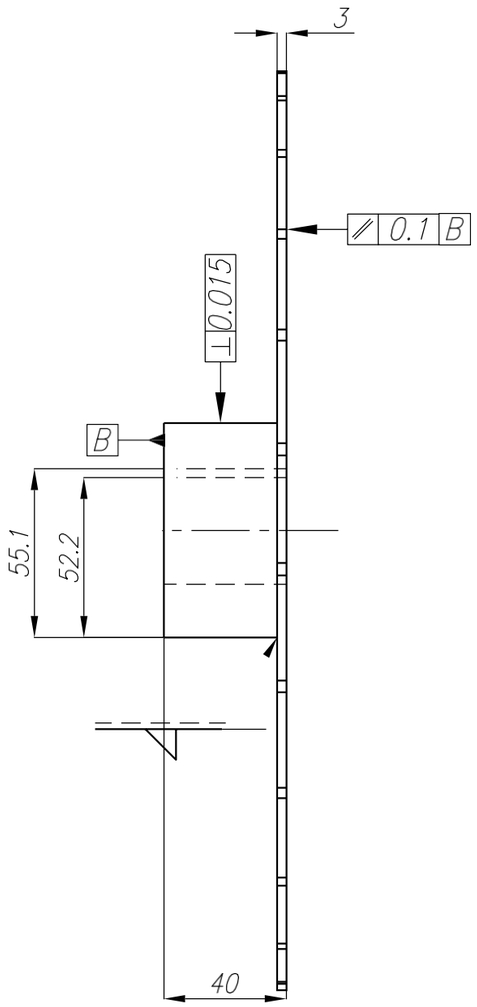
Tapa Izquierda Rodete

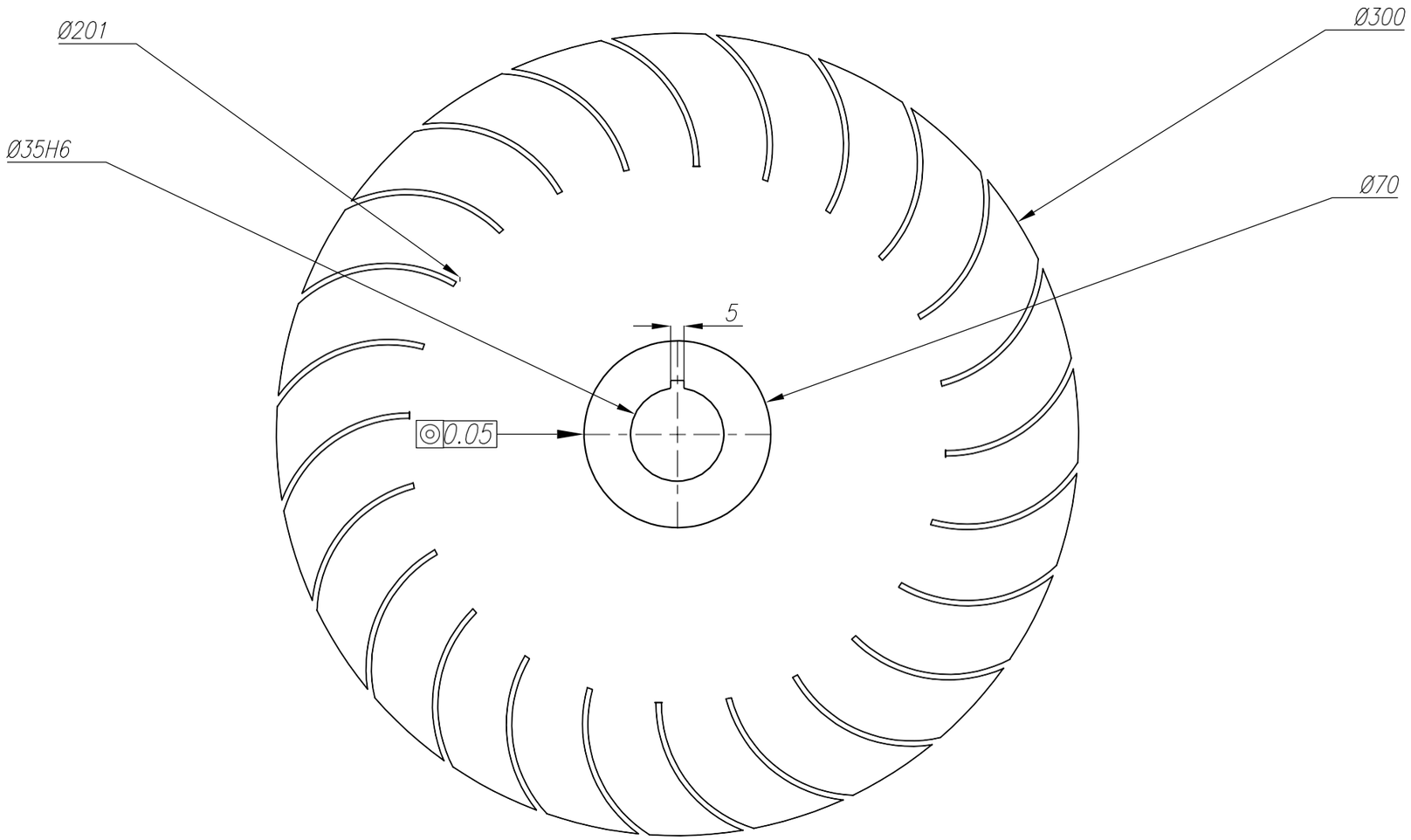
INGENIERÍA MECÁNICA

Lamina N° 07

A6 105x148
A5 148x210
A4 210x297
A3 297x420
A2 420x594
A1 594x841
A0 841x1189

Hoja de enseñanza Técnica





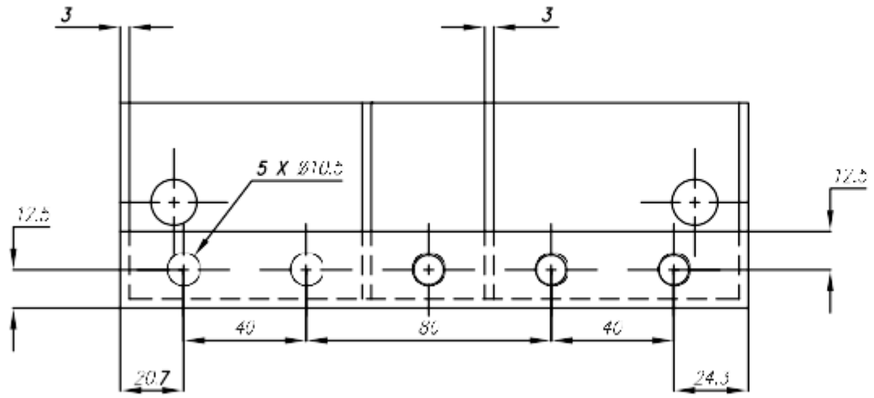
N6

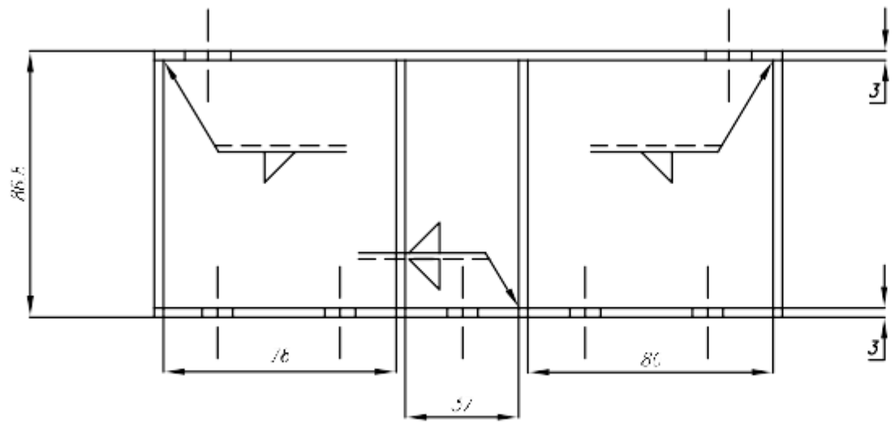
Tolerancia ± 0.1

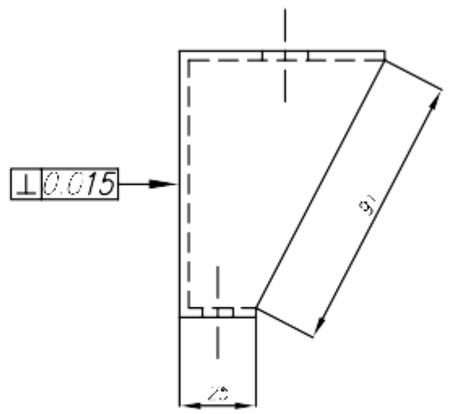
7	1	Tapa Derecha Rodete		AISI 304	320 x 320
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto

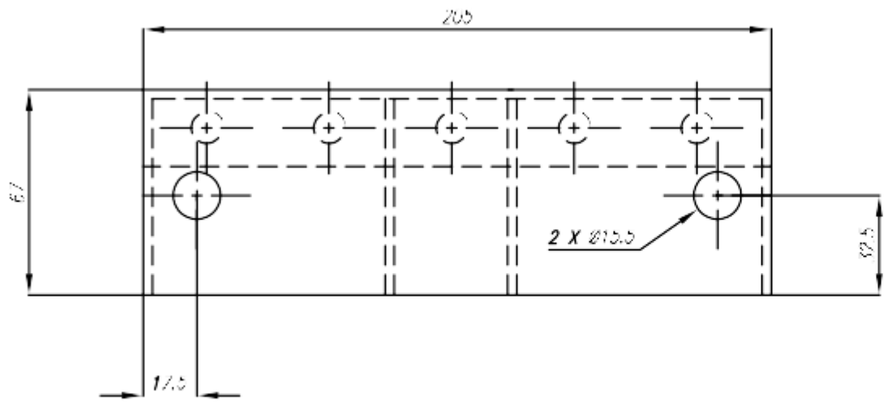
	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09 02 2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. John Calle	23 06 2021	

ESCALA: 1:1	Tapa Derecha Rodete	INGENIERÍA MECÁNICA
		Lamina N° 06









N6

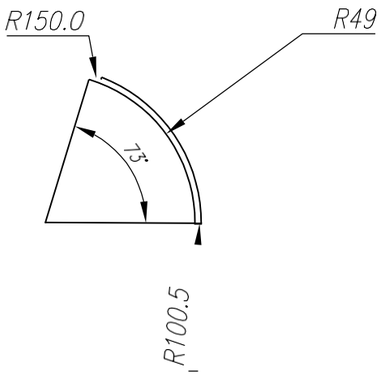
Tolerancia ± 0.1

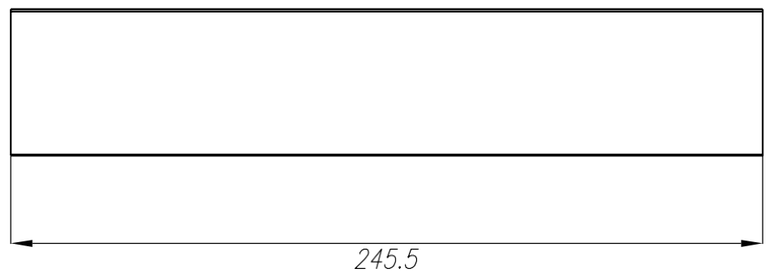
9	1	Base Chumacera Izquierda		AISI 304	180 X 210
Pos	Cant	Denominación	Norma	Materia	Dim en bruto

	Nombre	Fecha	
Dibujado.	B. Sigchi & E. Medina	09/02/2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado.	Ing. John Calle	23/06/2021	
ESCALA:	Base Chumacera Izquierda		INGENIERIA MECANICA
			Lámina N 06

A6 105x148
A5 148x210
A4 210x297
A3 297x420
A2 420x594
A1 594x841
A0 841x1189

Hoja de enseñanza Técnica





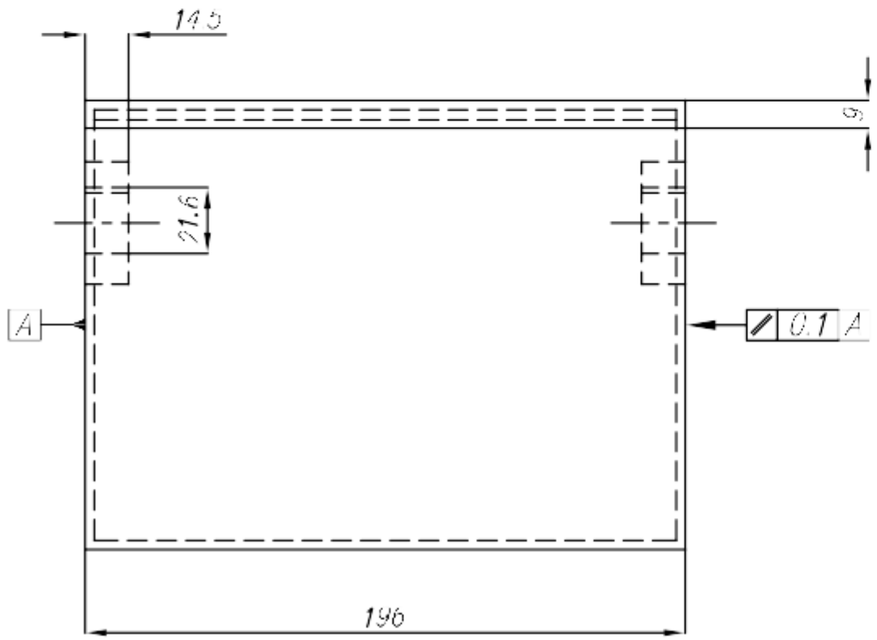
N6

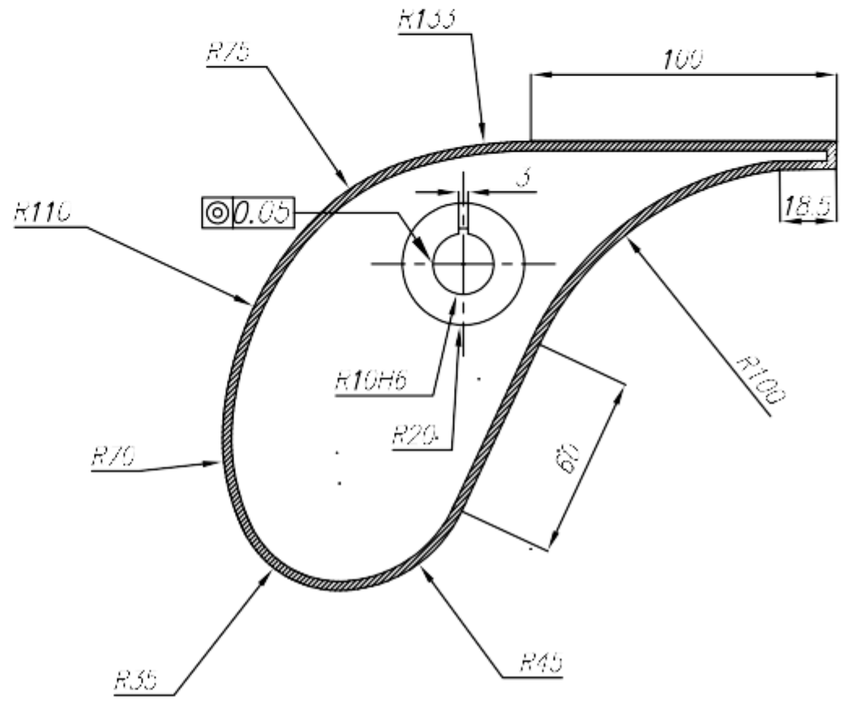
Tolerancia ± 0.1

10	1	Alabe		AISI 304	1700 X 250
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto

	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09 02 2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. John Calle	23 06 2021	

ESCALA:	Álabe	INGENIERÍA MECÁNICA
		Lamina N° 09





N6

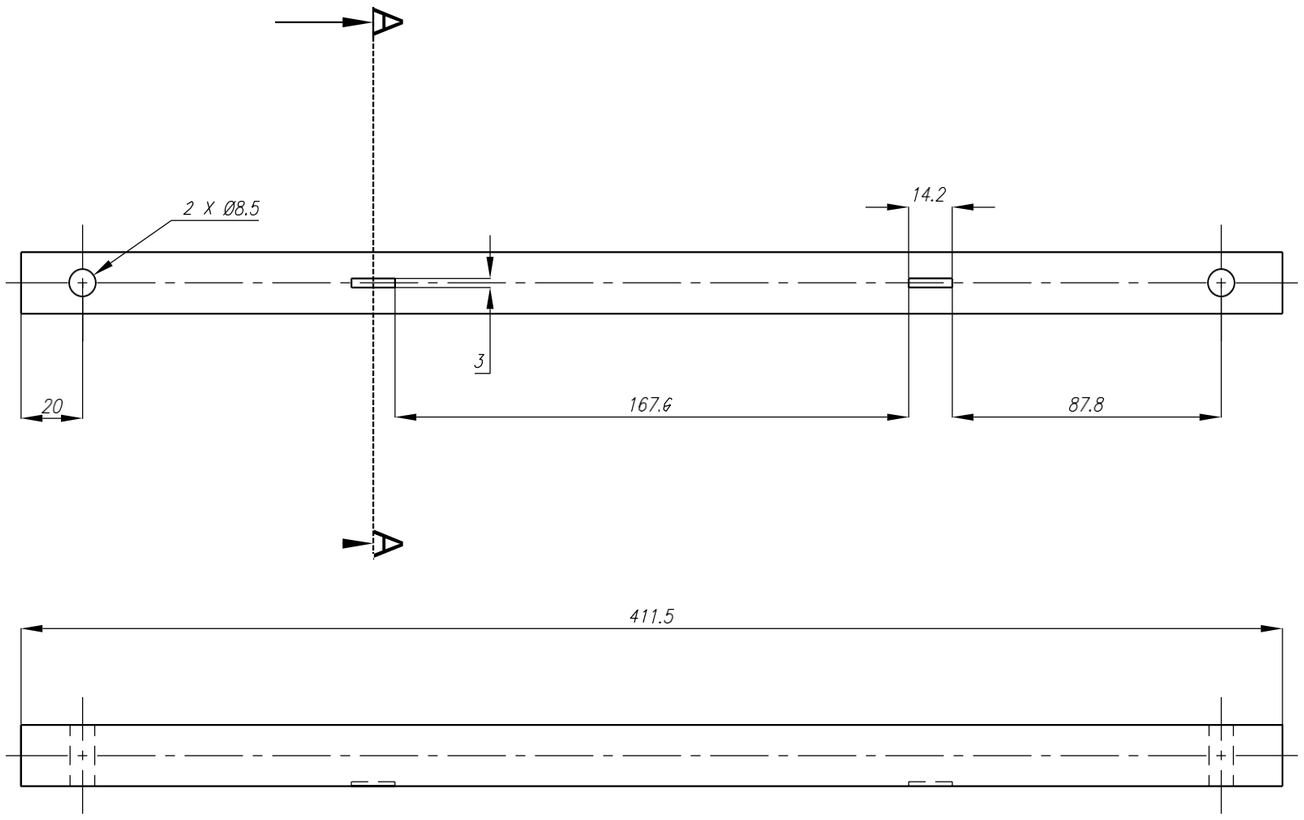
Tolerancia ± 0.1

11	1	Alabe Directriz		AISI 304	1100 X250
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Materia	Dim. en bruto

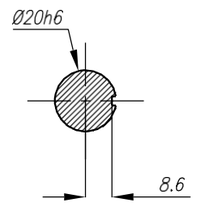
	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09/02/2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. Jaime Calle	23/06/2021	
ESCALA: 1:1	Alabe Directriz		INGENIERIA MECANICA
			Lámina N° 10

A6 105x148
A5 148x210
A4 210x297
A3 297x420
A2 420x594
A1 594x841
A0 841x1189

Hoja de enseñanza Técnica



CORTE A – A



N6

Tolerancia ± 0.1

Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto
12	1	Eje Alabe Directriz		AISI 4140	Ø25.4 X 420

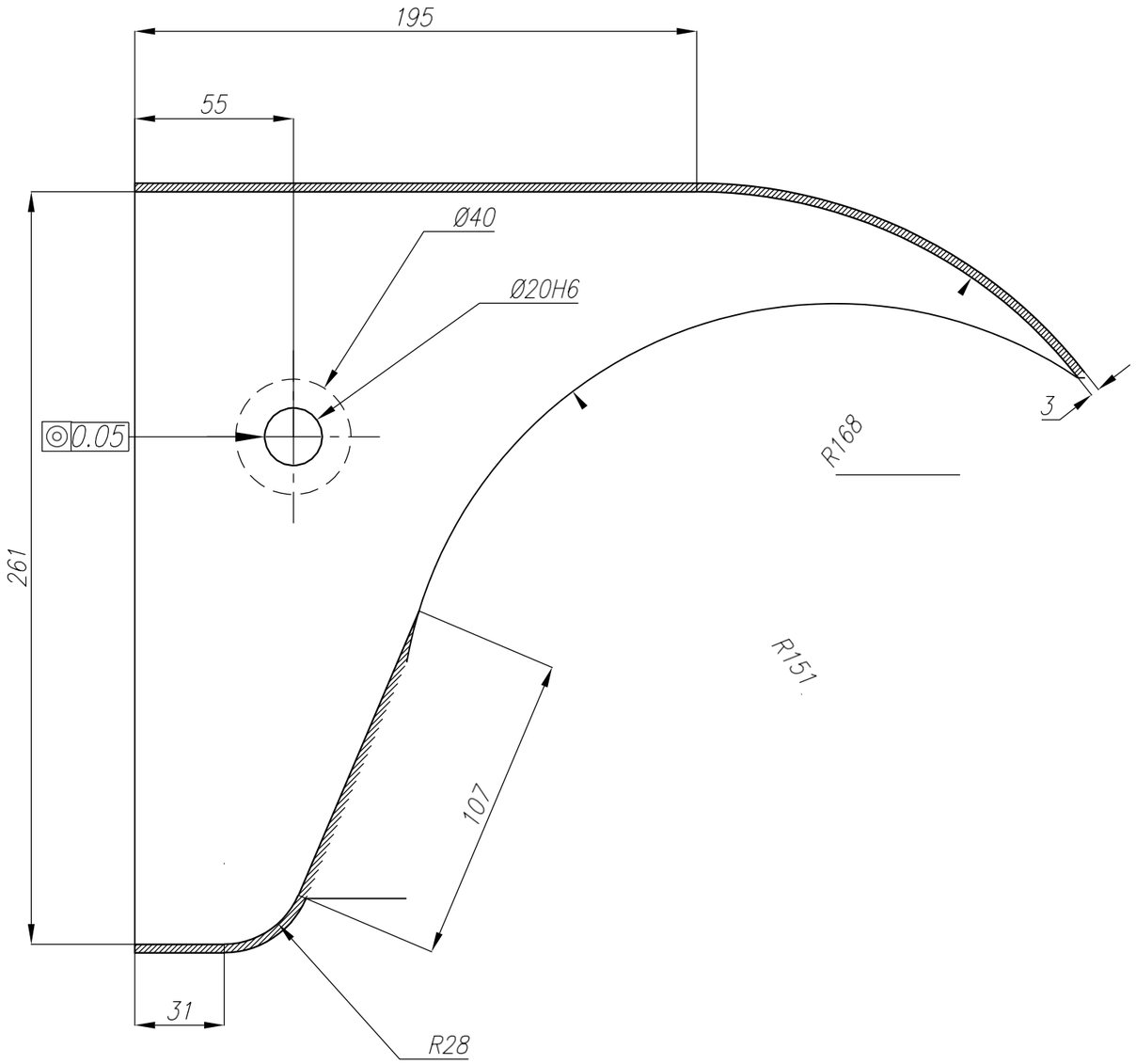
	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09 /02 /2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. John Calle	23 /06 /2021	

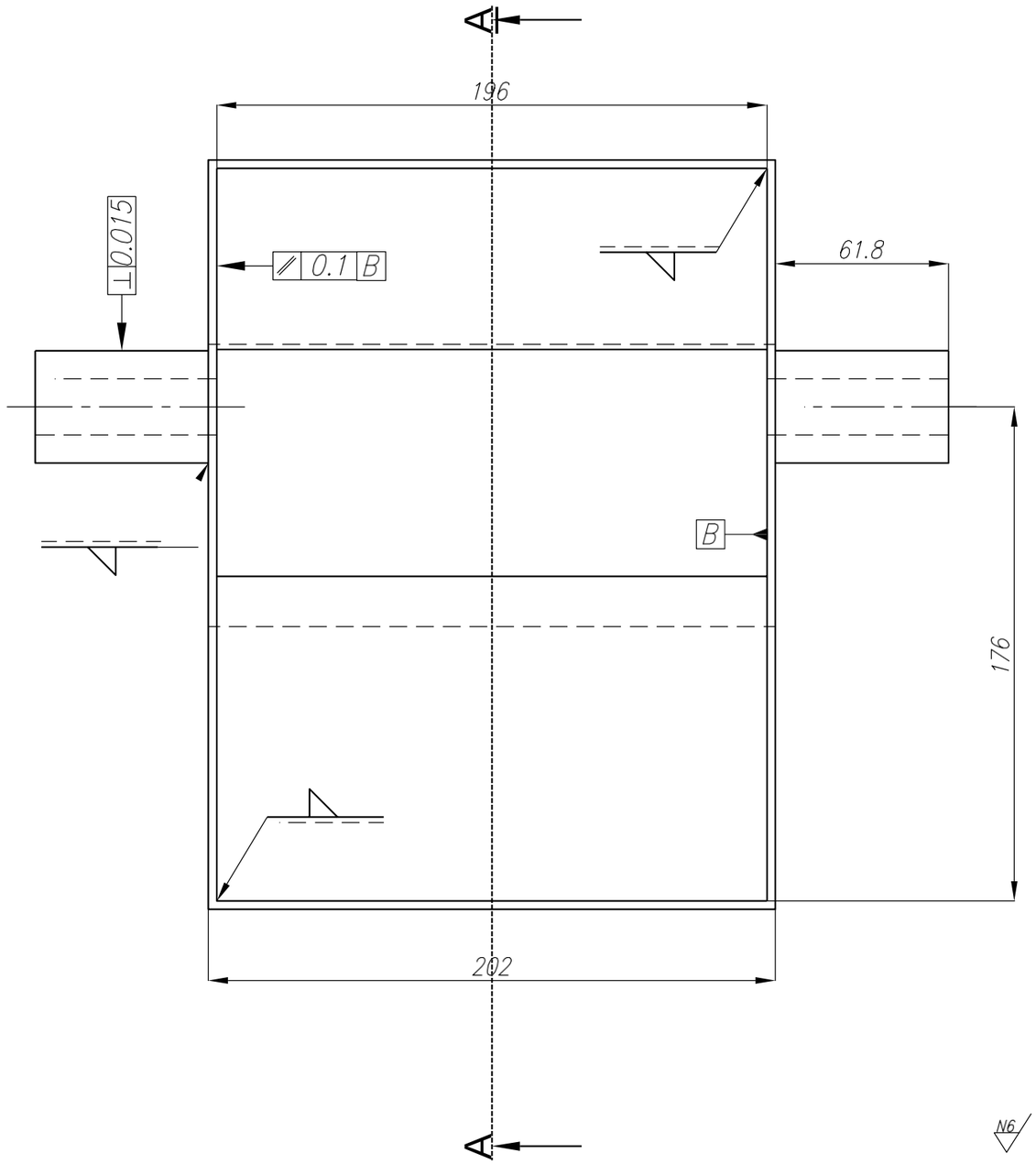
ESCALA:	Eje Alabe Directriz	INGENIERÍA MECÁNICA
		Lamina N° 11

A6 105x148
A5 148x210
A4 210x297
A3 297x420
A2 420x594
A1 594x841
A0 841x1189

Hoja de enseñanza técnica

CORTE A – A





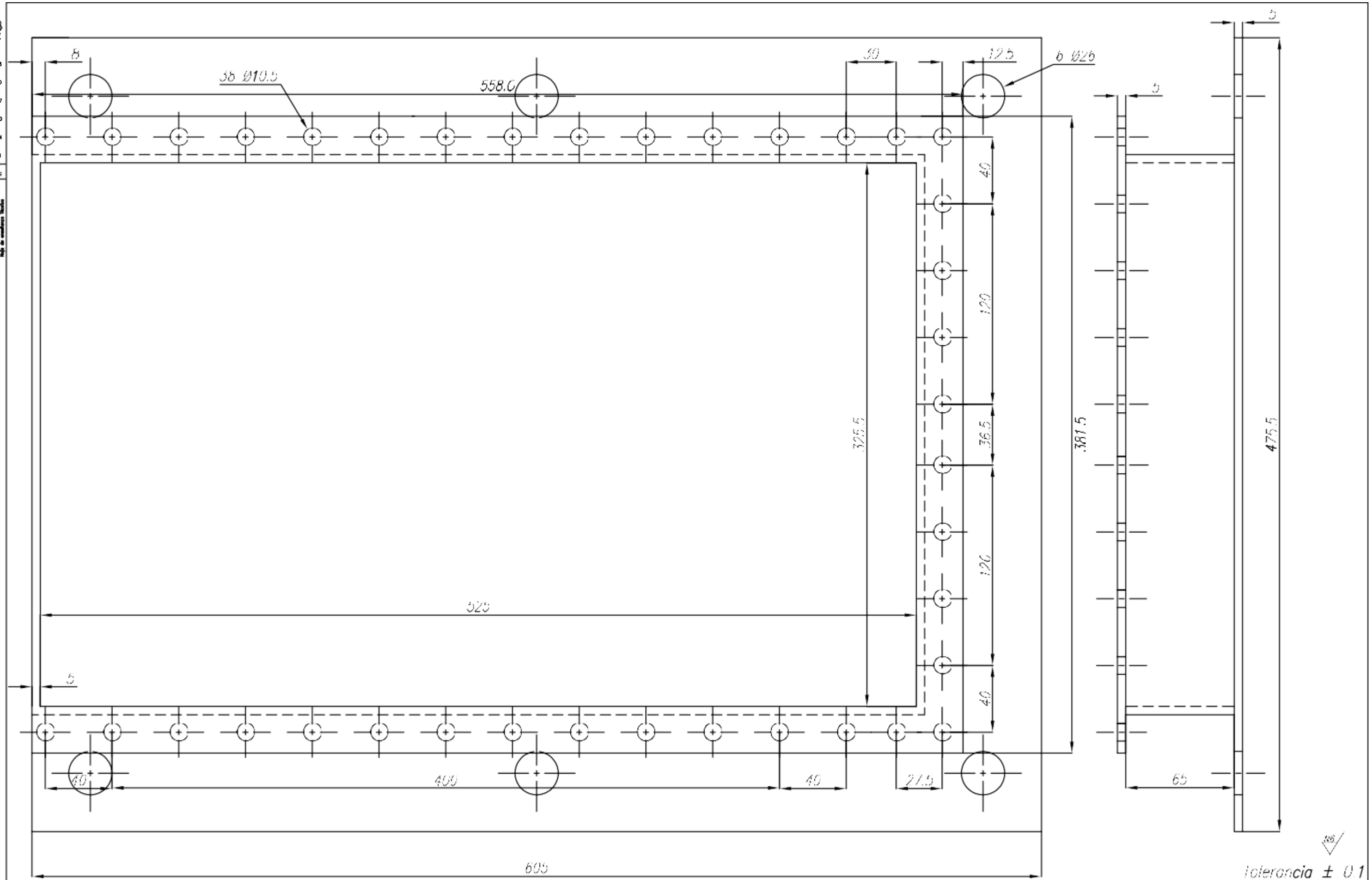
N6

Tolerancia ± 0.1

14	1	inyector		AISI 304	1220 X 280
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto

	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09/02/2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. John Calle	23/06/2021	

ESCALA: 1:1	Inyector	INGENIERÍA MECÁNICA
		Lamina N° 12



Tolerancia ± 0.1

15	1	Base Turbina Michell Banki		AISI 4140	858.1 X 620
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto

	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigchi & L. Medina	09/02/2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. John Calle	25/05/2021	

FECHA	Base Turbina Michell Banki	INGENIERÍA MECÁNICA Lámina N° 13

A6
105x148

A5
148x210

A4
210x297

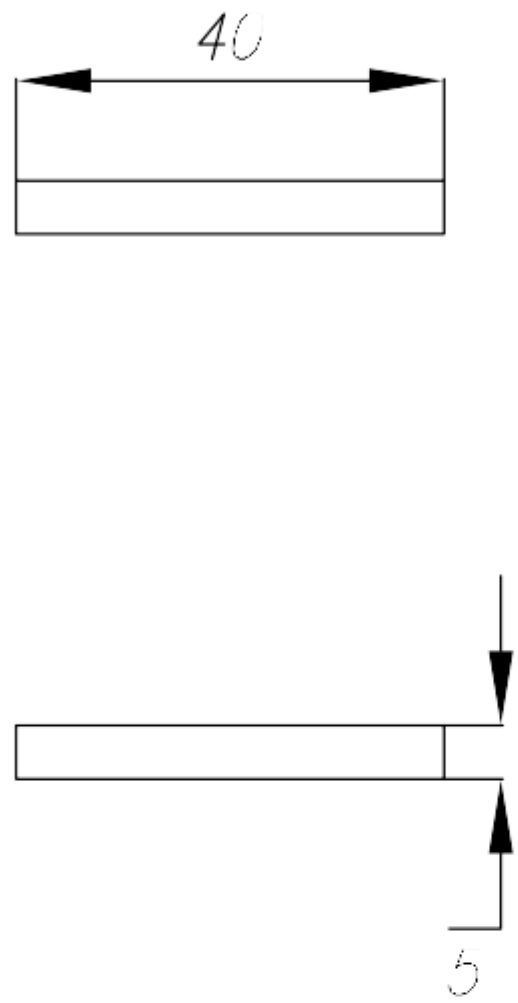
A3
297x420

A2
420x594

A1
594x841

A0
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica



N6

Tolerancia ± 0.1

16	1	Chaveta Rodete		AISI 1045	50 X 10 X 10
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto

	Nombre	Fecha	
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09/02/2021	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Revisado:	Ing. John Calle	23/06/2021	

ESCALA:	Chaveta Rodete	INGENIERÍA MECÁNICA
		Lamina N° 14

A6
105x148

A5
148x210

A4
210x297

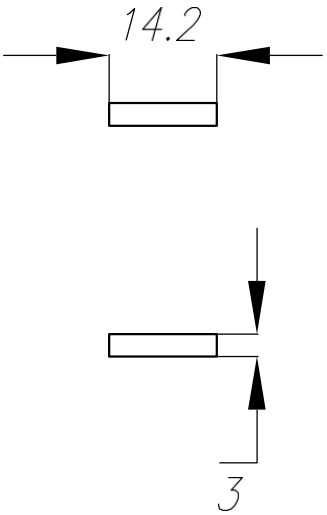
A3
297x420

A2
420x594

A1
594x841

A0
841x1189

Hoja de enseñanza Técnica



N6

Tolerancia ± 0.1

Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Dim. en bruto
17	1	Chaveta Alabe Directriz		AISI 1045	20 X 5 X 5

	Nombre	Fecha
Dibujado:	B. Sigchi & E. Medina	09 02 2021
Revisado:	Ing. John Calle	23 06 2021

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

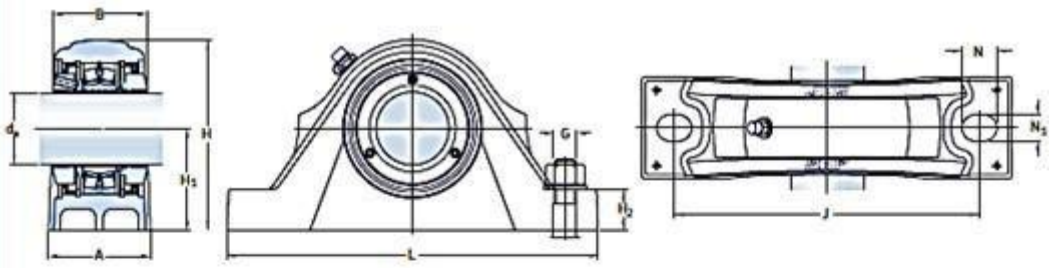
ESCALA:

Chaveta Alabe Directriz

INGENIERÍA MECÁNICA

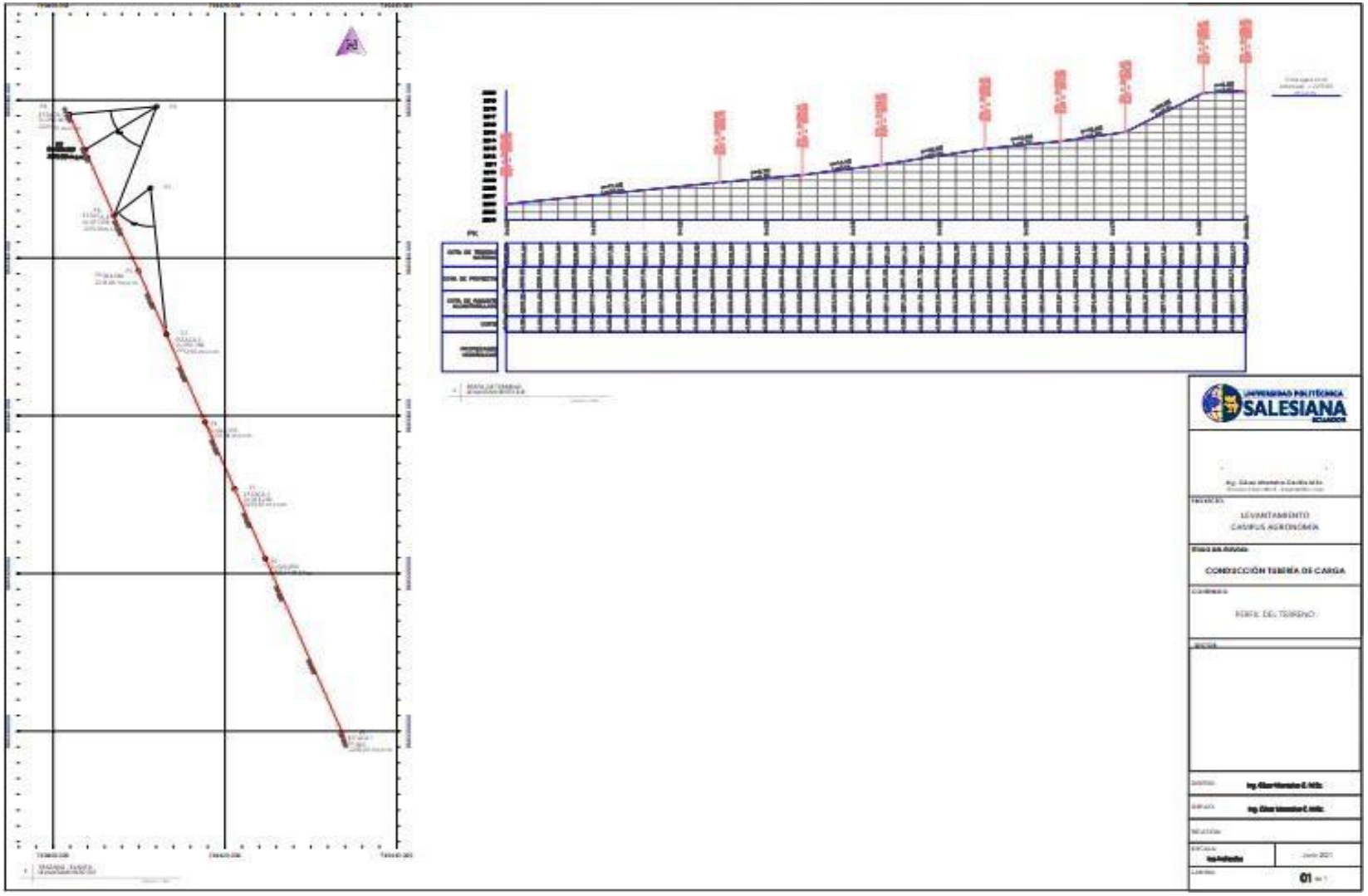
Lamina N° 15

ANEXO 2: Catalogo Chumacera



Shaft diam. d_a	Bearing unit dimensions A	B	H	H_1	H_2	J	L	N	N_1	G	Mass	Designations General Locating	Non-locating	High-speed Locating	Non-locating
mm	mm										kg	–			
35	60	65	111	60	25	170	205	20	15	12	3,8	SYNT 35 F	SYNT 35 L	SYNT 35 FTS	SYNT 35 LTS
40	60	65	115	60	25	170	205	20	15	12	3,9	SYNT 40 F	SYNT 40 L	SYNT 40 FTS	SYNT 40 LTS
45	60	65	120	60	25	170	205	20	15	12	4,5	SYNT 45 F	SYNT 45 L	SYNT 45 FTS	SYNT 45 LTS
50	70	65	131	70	28	210	255	24	18	16	5,7	SYNT 50 F	SYNT 50 L	SYNT 50 FTS	SYNT 50 LTS
55	70	65	135	70	30	210	255	24	18	16	6,3	SYNT 55 F	SYNT 55 L	SYNT 55 FTS	SYNT 55 LTS
60	80	71	150	80	30	230	275	24	18	16	7,5	SYNT 60 F	SYNT 60 L	SYNT 60 FTS	SYNT 60 LTS
65	80	71	160	80	30	230	280	24	18	16	8,5	SYNT 65 F	SYNT 65 L	SYNT 65 FTS	SYNT 65 LTS
70	90	71	180	95	32	260	315	28	22	20	11	SYNT 70 F	SYNT 70 L	SYNT 70 FTS	SYNT 70 LTS
75	90	71	180	95	32	260	320	28	22	20	11,6	SYNT 75 F	SYNT 75 L	SYNT 75 FTS	SYNT 75 LTS
80	100	86	200	100	35	290	345	28	22	20	15	SYNT 80 F	SYNT 80 L	SYNT 80 FTS	SYNT 80 LTS
90	110	86	230	112	40	320	380	32	26	24	20	SYNT 90 F	SYNT 90 L	SYNT 90 FTS	SYNT 90 LTS
100	120	86	255	125	45	350	410	32	26	24	25	SYNT 100 F	SYNT 100 L	SYNT 100 FTS	SYNT 100 LTS

ANEXO 3: Plano Topográfico



ANEXO 4: Proforma Turbina para la PCH

PROFORMA #1478

Cliente: Universidad Politécnica Salesiana.
Atención: Ing. Freddy Campoverde.
Dirección: Calle Vieja y Elia Liut.
Ciudad: Cuenca.

Atendiendo su gentil requerimiento, pongo a su disposición la siguiente proforma:

Cant.	Descripción.	V. unit.	V. total.
1	**Construcción de Turbina.** Construcción de elementos para turbina en base a su previo diseño proporcionados por la parte contratante, tales como: • Rodete, con sus respectivas placas laterales y alabes. • Construcción de eje de rodete. • Alabe Directriz, en base a su geometría. • Construcción de eje de alabe directriz. • Perfil Inyector. • Carcaza con sus respectivas placas de ensamblaje y geometría. • Tobera de Ingreso. Se deberá realizar el ensamblaje con sus respectivos elementos necesarios tales como: • Pernos. • Chumaceras. • Chavetas, entre otros. El material que se deberá utilizar para la construcción de dichos elementos es plancha A-36 en 3mm. Como característica importante se deberá realizar el balanceo dinámico del rodete para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.	2.936,69	2.936,69
		TOTAL.	2.936,69USD

ANEXO 5: Proforma para el tanque de captación y tubería de presión

	PRESUPUESTO CONSTRUCCIN OBRAS HIDROELECTRICA				
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	P. Total
1	Excavación a mano en Suelo sin clasificar, Profundidad entre 0 y 2 m	m3	71,01	15,387	1.092,68
2	Relleno compactado con material de mejoramiento	m3	16	28,5	456,00
3	Relleno compactado con material de sitio	m3	40,00	6,18	247,20
4	Hormigón Simple 240 Kg/cm2 incluye encofrado	m3	3,73	267	996,04
5	Mampostería de Ladrillo con mortero 1:3	m2	30,23	34,932	1.056,12
6	Enlucido con mortero 1:3	m2	16,73	16,728	279,83
7	Preparado y pintado de superficie	m2	5,71	5,712	32,63
8	Cubierta Eternit para UBS (Con estructura)	m2	4,60	26,34	121,16
9	Acero de Refuerzo (Incluye corte y doblado)	kg	2,94	430,00	1.265,92
10	Compuertas de ingreso de agua	u	1,00	1.200,00	1.200,00
11	Suministro e instalación tubería de Polipropileno de alta densidad d=160 mm	m	100,00	14,20	1.420,02
12	Suministro e instalación de válvulas de compuerta d=160 mm	u	2,00	455,91	911,81
				TOTAL	**9.079,41**