



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECÁNICA

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO MEDIANTE EL
USO DE UNA TURBINA EN EL RIO TOACHI PARA EL SECTOR DE
QUINTICUSIG**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de: Ingenieros Mecánicos

**AUTORES: ANTHONY SAÚL PALLASCO PILA
BRYAN STIVE ROMERO PARDO**

TUTOR: LUIS FERNANDO TOAPANTA RAMOS

Quito-Ecuador

2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Anthony Saúl Pallasco Pila con documento de identificación N° 1724756331 y Bryan Stive Romero Pardo con documento de identificación N° 2100606116; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 23 de marzo del año 2022

Atentamente,



Anthony Saúl Pallasco Pila
1724756331



Bryan Stive Romero Pardo
2100606116

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

Nosotros, Anthony Saúl Pallasco Pila con documento de identificación N° 1724756331 y Bryan Stive Romero Pardo con documento de identificación N° 2100606116, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Trabajo de Titulación bajo la opción Propuestas Tecnológicas: “Diseño y Simulación de un Sistema Hidroeléctrico Mediante el Uso de una Turbina en el Río Toachi para el Sector de Quinticusig”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 23 de marzo del año 2022

Atentamente,



Anthony Saúl Pallasco Pila
1724756331



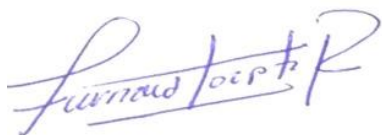
Bryan Stive Romero Pardo
2100606116

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis Fernando Toapanta Ramos con documento de identificación N° 1721113759, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO MEDIANTE EL USO DE UNA TURBINA EN EL RÍO TOACHI PARA EL SECTOR DE QUINTICUSIG, realizado por Anthony Saúl Pallasco Pila con documento de identificación N° 1724756331 y por Bryan Stive Romero Pardo con documento de identificación N° 2100606116, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 23 de marzo del año 2022

Atentamente,



Ing. Toapanta Ramos Luis Fernando, MSc.
1721113759

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico a mis padres, por darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes se ha logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido un orgullo y privilegio ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanos por estar siempre presentes y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de la vida. A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que abrieron sus puertas y compartieron sus conocimientos.

Anthony Pallasco

Dedico con todo mi corazón este trabajo a mi madre, sin ella no hubiese sido posible nada de lo que he logrado a lo largo de este proceso, tu paciencia y fuerza han hecho de mi la persona que soy. A mi padre por darme la fuerza necesaria para continuar luchando por mis sueños. Ustedes han sido mi ejemplo a seguir y por su dedicación he llegado hasta aquí, estoy orgulloso de tenerlos como mis padres.

A mi hermana y hermano por la motivación y apoyo que siempre me han brindado. A mi familia por abrirme las puertas de su hogar y estar pendientes de mi día a día, gracias a su apoyo se ha logrado la realización de este trabajo.

Bryan Romero

AGRADECIMIENTO

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda que muchas personas me han prestado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres que me han ayudado y apoyado en todo, a mi tutor, Fernando Toapanta, por haberme orientado en todos los momentos de dudas. A todos mis amigos y futuros colegas que me ayudaron de una manera desinteresada, gracias infinitas por toda su ayuda y buena voluntad.

Anthony Pallasco

En primer lugar, agradezco a mi madre por ser el pilar de mi familia y apoyarme en los momentos más difíciles, a mi padre y hermanos por toda su dedicación, paciencia y ayuda. Quiero dar las gracias a mi familia en general, mis amigos y a mi tutor por darnos las directrices necesarias para la realización del presente trabajo.

Bryan Romero

LISTA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. Estado del arte y aspectos teóricos de un sistema hidroeléctrico	4
1.1 Estado del arte	4
1.2 Aspectos teóricos.....	8
1.2.1 Energía hidroeléctrica	8
1.2.2 Captación de agua	8
1.2.3 Selección de la turbina	10
1.2.4 Generador eléctrico	10
1.2.5 Principio de funcionamiento de una central hidroeléctrica.....	11
1.2.6 Simulación CFD.....	12
1.3 Conclusiones del capítulo.....	12
Capítulo II. Formulación de un sistema hidroeléctrico y selección de alternativas para turbinas hidráulicas	14
2.1 Altura de diseño y caudal de una turbina	14
2.1.1 Determinación de salto o altura neta	14
2.1.2 Métodos de medición de caudal	15
2.1.3 Cálculo de caudal	19
2.2 Selección tipo de turbina	20
2.3 Velocidad específica.....	21
2.4 Tipos de potencia en una central hidroeléctrica	21
2.4.1 Potencia hidráulica	22
2.4.2 Potencia bruta.....	22
2.4.3 Potencia eléctrica.....	23
2.4.4 Potencia instalada.....	23
2.5 Rendimiento.....	24
2.6 Producción.....	24
2.7 Pérdidas de energía.....	25
2.7.1 Número de Reynolds.....	25
2.7.2 Ecuación de Darcy-Weisbach	26

2.7.3	Pérdidas menores en tuberías	27
2.7.4	Pérdida de carga total	29
2.8	Ecuación de la energía	29
2.9	Ecuaciones de Manning	30
2.10	Conclusiones del capítulo	32
Capítulo III. Cálculo para el diseño del sistema hidroeléctrico		33
3.1	Velocidad del río	33
3.2	Dimensiones de canal abierto para captación	34
3.3	Dimensiones del tanque de carga	37
3.4	Presión hidrostática en el tanque de carga	38
3.5	Cálculo del diámetro	38
3.5.1	Pérdida de carga mayor	38
3.5.2	Pérdidas de carga menores	39
3.5.3	Pérdida de carga total	40
3.5.4	Ecuación de la energía	41
3.5.5	Número de Reynolds	42
3.5.6	Rugosidad relativa	42
3.5.7	Verificación de diámetro	43
3.6	Propuestas para el dimensionamiento del sistema de tuberías	44
3.7	Presión	45
3.8	Altura neta	46
3.9	Potencia hidráulica	46
3.10	Potencia bruta	46
3.11	Potencia resultante en la turbina	47
3.12	Potencia eléctrica	47
3.13	Potencia instalada	48
3.14	Rendimiento	48
3.15	Producción en kWh/mes	48
3.16	Alternativas de diseño	49
3.16.1	Primera alternativa de diseño	49
3.16.2	Segunda alternativa de diseño	50

3.16.3	Tercera alternativa de diseño.....	50
3.17	Selección de Turbina	51
3.17.1	Evaluación de parámetros para selección.....	52
3.18	Costos	54
3.19	Conclusiones del capítulo.....	56
Capítulo IV. Análisis numérico del flujo de agua a través de tuberías y turbina del sistema hidroeléctrico		57
4.1	Geometría del sistema hidroeléctrico	57
4.2	Diseño del sistema hidroeléctrico.....	57
4.3	Modelos de análisis numéricos utilizados	58
4.3.1	Ecuación RNG k- ϵ	58
4.3.2	Ecuaciones de conservación de energía	59
4.3.3	Ecuación de conservación del momento	59
4.4	Mallado del diseño.....	60
4.4.1	Mallado de tubería.....	60
4.4.2	Mallado de tubería.....	62
4.5	Conclusiones del capítulo.....	64
CONCLUSIONES GENERALES		65
RECOMENDACIONES GENERALES.....		67
LISTA DE REFERENCIAS		68
ANEXOS.....		73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Factor de corrección requerido para determinar caudales</i>	17
Tabla 2. <i>Ejemplos de modelos de molinete y sus ecuaciones de calibración</i>	18
Tabla 3. <i>Clasificación de turbinas Francis en relación a la velocidad específica</i>	21
Tabla 4. <i>Longitud equivalente en diámetros de tubería para válvulas y accesorios</i>	27
Tabla 5. <i>Rugosidad de diferentes materiales</i>	28
Tabla 6. <i>Valores del coeficiente n de Manning</i>	30
Tabla 7. <i>Parámetros iniciales para el diseño del sistema hidroeléctrico</i>	33
Tabla 8. <i>Medición de tiempos para velocidad media de flujo</i>	34
Tabla 9. <i>Parámetros de dimensionamiento de canal abierto</i>	34
Tabla 10. <i>Resultados de iteraciones para verificación de factor de fricción</i>	43
Tabla 11. <i>Parámetros de trabajo propuestos para diseño del sistema de tuberías</i>	45
Tabla 12. <i>Resultados de trabajo para cada alternativa de diseño</i>	50
Tabla 13. <i>Parámetros de evaluación para selección de turbina</i>	52
Tabla 14. <i>Selección de turbina mediante calificación de parámetros</i>	53
Tabla 15. <i>Rangos de operación de turbina de flujo axial tipo anfibia</i>	53
Tabla 16. <i>Costos generales del sistema</i>	54
Tabla 17. <i>Costos de tubería para 630 mm de diámetro</i>	54
Tabla 18. <i>Costos de tubería para 500 mm de diámetro en HDPE</i>	55
Tabla 19. <i>Costos de tubería para 315 mm de diámetro en PVC</i>	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Capacidad hidroeléctrica mundial instalada (GW) por país en 2014</i>	5
Figura 2. <i>Diagrama para preselección de turbinas hidráulicas</i>	10
Figura 3. <i>Proceso de transformación energética</i>	11
Figura 4. <i>Componentes de una central hidroeléctrica</i>	12
Figura 5. <i>Alturas obtenidas por un salto de agua</i>	15
Figura 6. <i>Selección de sitio adecuado para medición de velocidad del cauce</i>	17
Figura 7. <i>Partes de molinete modelo OTT C31</i>	18
Figura 8. <i>Curva de caudales clasificados</i>	19
Figura 9. <i>Diagrama Caudal vs Salto neto para selección de tipo de turbina</i>	20
Figura 10. <i>Diagrama de Moody para tuberías</i>	28
Figura 11. <i>Coefficiente de resistencia para entradas de tubería</i>	29
Figura 12. <i>Dimensionamiento de un canal abierto rectangular</i>	31
Figura 13. <i>Dimensiones del canal abierto rectangular</i>	36
Figura 14. <i>Dimensiones del tanque de carga mediante vista lateral</i>	37
Figura 15. <i>Dimensiones del tanque de carga mediante vista superior</i>	37
Figura 16. <i>Preselección de tipo de turbina para alternativas de diseño</i>	51
Figura 17. <i>Representación 3D de la captación previo a la tubería</i>	58
Figura 18. <i>Mallado de la sección final de la tubería</i>	60
Figura 19. <i>Convergencia de malla para la tubería con la herramienta Skewness</i>	61
Figura 20. <i>Convergencia de malla de la tubería con herramienta Element Quality</i>	61
Figura 21. <i>Velocidad del flujo al final de la tubería mediante ANSYS</i>	62
Figura 22. <i>Mallado de la unión entre la tubería y turbina</i>	62
Figura 23. <i>Convergencia de malla para turbina mediante herramienta Skewness</i>	63
Figura 24. <i>Convergencia de malla para turbina con herramienta Element Quality</i>	63
Figura 25. <i>Simulación de la turbina mediante ANSYS</i>	64

RESUMEN

La finalidad de este proyecto es realizar el diseño y simulación de un sistema hidroeléctrico haciendo uso del software de simulación ANSYS Fluent. El diseño del sistema está basado en diferentes etapas entre las cuales se encuentran el diseño del canal abierto, la ubicación del desarenador, dimensionamiento del tanque de carga, diseño del sistema de tuberías de presión y la selección de la turbina. Para el proceso de diseño del sistema hidroeléctrico se define de forma teórica los diferentes componentes que se involucran para el diseño de una central hidroeléctrica y la clasificación de los diferentes tipos de centrales en base a su capacidad instalada. A su vez, se determinan las ecuaciones y variables con las que trabajará el sistema como lo son la altura bruta y la distancia entre el punto de captación con la casa de máquinas los cuales se definen mediante un estudio topográfico de la zona. El diseño del sistema de tuberías y la selección de turbinas presenta diferentes propuestas las cuales pueden operar dentro de los valores establecidos y permiten cubrir la demanda energética tomando en cuenta la determinación de variables como la velocidad de flujo, diámetros de tubería, cantidad de accesorios, regímenes de flujo y pérdidas de carga que se presentarán en el sistema dando como resultado diferentes alternativas de diseño cada una con una determinada capacidad de producción eléctrica y potencia instalada. Por último, se presenta la simulación entre los puntos de conexión de la tubería y la turbina corroborando los valores calculados.

Palabras claves: altura, caudal, pérdidas carga, sistema de tuberías, turbina

ABSTRACT

The purpose of this project is to carry out the design and simulation of a hydroelectric system using the ANSYS Fluent simulation software, the design of the system is based on different stages, among which are the design of the open channel, the location of the sand trap, sizing of the cargo tank, design of the pressure piping system and the selection of the turbine. For the design process of the hydroelectric system, the different components that are involved in the design of a hydroelectric plant and the classification of the different types of plants based on their installed capacity are theoretically defined. In turn, the equations and variables with which the system will work are determined, such as the gross height and the distance between the catchment point and the power house, which are defined by means of a topographical study of the area. The design of the piping system and the selection of turbines presents different proposals which can operate within the established values and allow to cover the energy demand taking into account the determination of variables such as flow velocity, pipe diameters, number of accessories, etc. flow regimes and load losses that will occur in the system, resulting in different design alternatives, each with a certain electrical production capacity and installed power. Finally, the simulation between the connection points of the pipe and the turbine is presented, corroborating the calculated values.

Keywords: altitud, caudal, load losses, pipe system, turbine

INTRODUCCIÓN

El uso de energía eléctrica dentro de la industria es algo de gran importancia ya que sin esta es imposible tener una producción competente en el mercado. A causa del constante avance tecnológico y la modernización de la sociedad, la energía eléctrica se ha convertido en un factor fundamental para que las empresas puedan trabajar y a su vez competir en el mercado. En el caso de empresas ubicadas en el sector rural se presenta la misma situación en la que a pesar de los problemas que presenta llevar energía a estas zonas, buscan la forma de cubrir su demanda energética. Al hablar de empresas ubicadas en sectores rurales, se refiere a empresas con limitados recursos como mano de obra, capital, agua potable y energía eléctrica a causa de la lejanía.

La edificación de centrales de generación eléctrica son proyectos de gran envergadura que se realizan a partir de grandes fuentes naturales, sin embargo, es posible desarrollar proyectos de este tipo a pequeña escala como es la puesta en obra de las mini y micro centrales hidroeléctricas. Este tipo de proyectos siempre buscan beneficiarse de pequeñas fuentes naturales procurando extraer la mayor cantidad posible de energía. Cabe recalcar que la energía que puede ser aprovechada depende de varios factores y a su vez se ve condicionada por las leyes medioambientales las cuales pretenden mantener la fauna y flora marina existente en estas fuentes naturales.

Actualmente, el cuidado medioambiental es un tema regulado en todo el mundo a causa del incremento brusco en los niveles de contaminación, representando un riesgo para el ser humano debido al uso excesivo de energías procedentes de combustibles fósiles como el petróleo. Con el paso de los años y el uso constante de energías no renovables se ha generado el llamado “efecto invernadero” y el “cambio climático” los cuales son cada vez más evidentes en las diferentes regiones del planeta.

La energía eléctrica es indispensable para la vida cotidiana y para el sector industrial, en vista de que se utiliza para el funcionamiento de máquinas, generación de luz, producción de calor, sistemas de refrigeración, entre otros. Este tipo de energía la provee principalmente el estado mediante la red pública de electricidad, generando así dependencia del mismo. La red de energía eléctrica, normalmente se centra en los lugares más poblados, por ende, existen sectores en el área rural en los cuales no se encuentra disponible.

El problema de estudio se presenta a causa de la necesidad de energía eléctrica continua para el correcto funcionamiento de las distintas maquinarias que posee la empresa Perla Andina ubicada en el sector Quinticusig del cantón Sigchos provincia de Cotopaxi. A pesar de que los gobiernos sectoriales se encarguen de que la red pública llegue a estos lugares, la calidad de la energía no es la adecuada para el uso industrial, ya que, existen cortes de energía de manera frecuente lo que afecta directamente la producción.

Adicional a esto, los elevados costos que se producen por el consumo energético junto con la conciencia ambiental que maneja la empresa son un incentivo para acceder al uso de energías renovables que se pueden obtener en el sector. Por lo tanto, con el fin de regular el suministro de electricidad que llega a la planta, se busca alternativas entre las cuales se encuentra el uso de la energía hidroeléctrica.

De esta manera se recurre al diseño de un sistema que permita proveer la energía requerida por la empresa aprovechando el caudal máximo extraíble del río. Se propone un sistema de captación mediante un canal abierto que redirecciona el flujo del agua hacia el sistema de tuberías pasando por un desarenador el cual retiene los sedimentos, seguido de un tanque de carga el cual genera presión en el fluido que ingresa a las tuberías. Para el diseño del canal abierto se utiliza el valor de caudal establecido y las ecuaciones de Manning.

En el sistema de tuberías a presión se analiza el diámetro y las pérdidas de carga existentes a lo largo del conducto mediante las ecuaciones de energía y Darcy-Weisbach respectivamente. Cabe recalcar que, mediante un estudio topográfico previo se determina el punto de captación respecto a la casa de máquinas donde se ubica la turbina obteniendo así una altura bruta, este diferencial de altura y las pérdidas de energía permiten determinar la carga neta la cual junto al caudal de operación posibilitan seleccionar la turbina.

Se realiza la selección de la turbina entre tres diferentes tipos de acuerdo a ciertos parámetros de estudio, a la vez se diseñan tres distintas propuestas para el sistema de tuberías, dichas propuestas se plantean con su respectivo costo de implementación y capacidad de producción. Por último, se diseña mediante el software ANSYS el sistema con el fin de comprobar los valores calculados teóricamente, verificando los valores de velocidad de flujo con los que trabaja el sistema de tuberías y turbina.

El objetivo general consiste en diseñar y simular un sistema hidroeléctrico mediante el uso de una turbina en el Río Toachi en el sector de Quinticusig, es decir, se plantea diseñar un sistema hidroeléctrico que permita sustentar los requerimientos de la empresa Perla Andina y la posibilidad de suministrar energía a las poblaciones aledañas, de este modo el gasto de consumo eléctrico es eliminado de sus obligaciones, se brinda autonomía a la empresa y se aprovecha un recurso natural disponible en el sector.

Los objetivos específicos son:

- Conocer los requerimientos energéticos que debe cubrir el sistema hidroeléctrico.
- Establecer las alternativas de diseño que mejor se adapten a las condiciones hidrológicas y requerimientos del Río Toachi para el sector de Quinticusig del cantón Sigchos.
- Simular mediante software especializado el comportamiento del sistema hidroeléctrico en base a las condiciones hidrológicas del sector.
- Evaluar económicamente la implementación del sistema de generación eléctrica para el sector de Quinticusig.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS DE UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO

El presente capítulo tiene como propósito exponer el uso de los diferentes tipos de energías renovables, específicamente la energía hidroeléctrica, sus beneficios en comparación con otro tipo de recursos, el nivel de producción a nivel mundial y su desarrollo en Ecuador. Se realizará una recopilación y revisión literaria de trabajos investigativos existentes relacionados al uso de energía hidroeléctrica y diseños de sistemas de este tipo.

El objetivo del presente capítulo es definir los conceptos fundamentales acerca de los sistemas hidroeléctricos, selección de elementos específicos del sistema, métodos de aplicación y principio de funcionamiento de una micro central hidroeléctrica.

1.1 Estado del arte

Quinaluisa et al. [1] afirman que, el hilo que junta la sostenibilidad ambiental, igualdad social y el aumento económico es la energía, la cual es esencial para el incremento de estos. Aquí nace el desarrollo de planes que den acceso a la producción de electricidad por medio de la acción de la fuerza del agua construyendo centrales hidroeléctricas.

En su estudio León [2] menciona que, se identifica a las energías renovables por reponerse de igual o a un ritmo mayor al que son consumidas. Se determina como la energía que se recibe desde corrientes de energía sucesivas y ordinarias en el planeta, así mismo se puede identificar como un flujo de energía que se recupera al mismo tiempo que es utilizado.

Espejo y García [3] señalan que, existe una manera clásica y simultáneamente opción de producción eléctrica la cual es la hidroelectricidad, gracias a que es limpia, renovable y de producción inmediata. El agua es de enorme capacidad, muy flexible, una gran velocidad de contestación y alta potencia unitaria.

Kahraman y Tasgin [4] destacan que, gracias a los impactos del medio ambiente bajos, precios de operación y mantenimiento baratos, las centrales hidroeléctricas son las más relevantes fuentes de energía renovable de todo el mundo actualmente. La generación del 71 % de energía renovable internacionalmente es gracias al uso de recursos hídricos. Como se ilustra en la

figura 1 en diferentes territorios del mundo, la capacidad de energía instalada en el año 2014, en el año 2016 alcanzó los 1064 GW de potencia, creando así el 16.4 % de producción de energía mundial, observando así el diminuto crecimiento de capacidad energética instalada entre el año 2016 y 2014. Existen varias modalidades en el planeta para incrementar la cantidad de centrales hidroeléctricas, concediendo que los costes de producción energética disminuyan, gracias a la disponibilidad de este potencial hidráulico en el tamaño de lo viable que incrementará la estabilidad del abastecimiento energético en el planeta

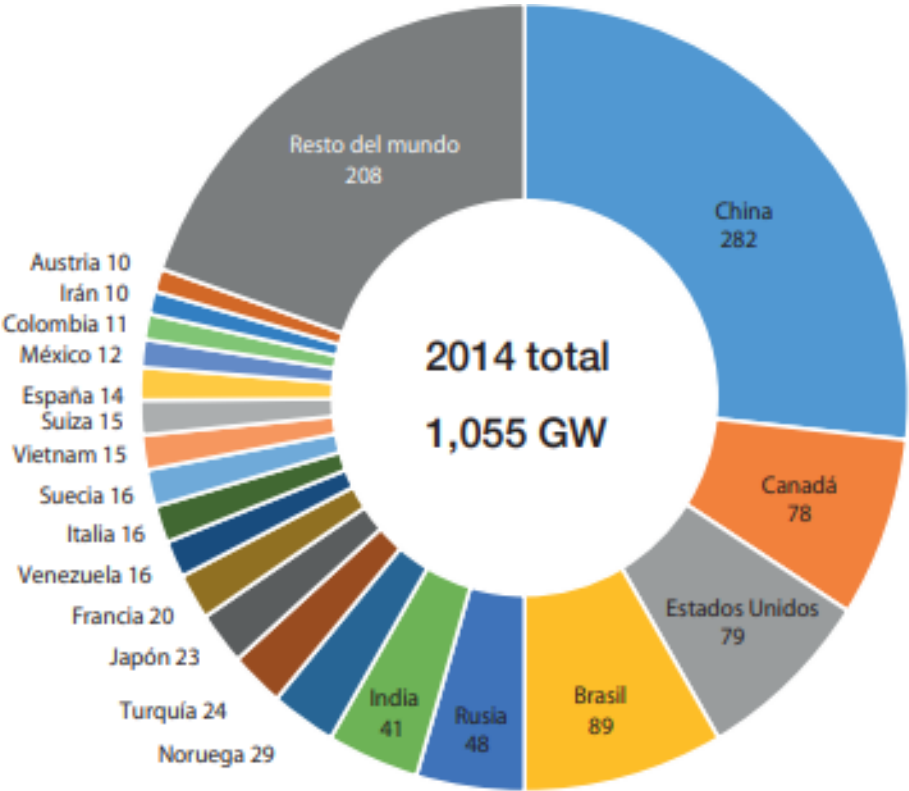


Figura 1. Capacidad hidroeléctrica mundial instalada (GW) por país en 2014 [5].

Existen tres recursos primordiales para la edificación de una central: la parte civil, que ayuda para la producción del salto y conducción del agua; los accesorios hidromecánicos que se usan para aprovechar y transformar la energía potencial generada por el flujo de agua; y los equipamientos eléctricos convenientes. Las necesidades progresivas de energía en la sociedad a determinado el avance de estos en funcionalidad de los condicionantes técnicos que se ha demandado en todo el tiempo mientras la sociedad progresa [3].

Rojas et al. [6] en 2017 enfatizan que, en el Ecuador existen ocho proyectos hidroeléctricos importantes los cuales suman en general una potencia de 2827.4 MW, por consiguiente, en el

momento que funcionen en su totalidad se espera una producción mayor al 93 % a la producción de energía nacional. Esto ayudaría al Ecuador a destacar a nivel mundial por tener una de las matrices de energía renovable más limpia.

En la actualidad en el Ecuador, las tendencias de desarrollo son cada vez más presionadas sobre el medio ambiente acuático gracias a una demanda más grande de agua para los servicios económicos y socio medio ambientales. Las fuentes hidráulicas tuvieron además su colaboración en esta durante la historia. Debido a los cambios que se ha experimentado en el medio ambiente a lo largo de los años, los cuales se deben en su mayoría a los gases tóxicos que emitan distintas actividades llevadas a cabo por los individuos, la producción de electricidad ha sido primordial llevar a la matriz energética y uno de los pasos más importantes es la construcción de proyectos hidroeléctricos por todo lo largo de la región nacional [1].

Como afirma Guastay [7], la primera planta de energía eléctrica de Ecuador ubicada en Loja hizo posible que la energía eléctrica este presente a partir de 1987, sin embargo, es alrededor del siglo XX cuando pasa a ser parte importante para el desarrollo de los sectores más importantes del Ecuador y en todos los puntos o zonas que requiere potenciar el país. Se estableció una política para el “cambio de matriz energética” la cual ha representado un elevado efecto para la electricidad nacional, en una investigación se evidenció que por lo menos el 70 % de energía eléctrica se produce gracias a la ayuda de la energía hidráulica.

Ecuador se convirtió en una potencia energética debido a que es el quinto país de todo el mundo que produce energía eléctrica hídrica, lo que le posibilita abastecer el mercado propio y generar ingresos al exportar a otros países gracias al bajo precio de producción. Desde la perspectiva ambiental se pudo confirmar el efecto del uso de la energía hidroeléctrica y Ecuador ha logrado reducir la emisión de gases contaminantes y elevadas temperaturas que afectan a la atmósfera, además de una importante reducción en gastos por combustibles fósiles permitiendo ahorro en los mismos lo cual representa un ingreso importante para el país [7].

Desde el año de 1992 Quinaluisa [1] asegura que, debido a la disminución de generación por la carencia de infraestructura y largos periodos de caudal mínimo, se desató una secuencia de crisis eléctricas, lo que obligó en repetidas situaciones a distribuir el abasto eléctrico. El régimen ecuatoriano dio mayor prioridad al nombrado cambio de matriz energética con el fin de incrementar la generación de energía a partir del año 2007.

Actualmente en el país se ha elaborado proyectos de mucha importancia que poseen el propósito de producir energía haciendo uso de la fuente de energía del agua con responsabilidad social, lo que involucra un enorme desarrollo beneficioso y energético a grado nacional. Su propósito es obtener independencia energética, minimizar emisiones de gases, cubrir la necesidad energética y generar empleos a mediano y largo plazo [1].

De acuerdo con Avilés [8], para que el Ecuador pueda tener beneficio es necesario primordialmente el trabajo por parte del sector político para la planificación y desarrollo de proyectos de abastecimiento de electricidad por medio de fuentes renovables como los cuerpos de agua. Para el 2025 el país necesita alrededor de 8000 y 12500 MW de volumen de producción ya instalado con el objetivo de cubrir la demanda energética y de este modo reducir el uso de combustibles en la producción, considerando valores reales. Se necesita un aproximado de 16380 millones de dólares para realizar esta generación.

Se recurre al uso de softwares en computadoras para las resoluciones numéricas de ecuaciones utilizadas en la dinámica de fluidos, esto se implementó en el año 2010 debido a la dificultad de solucionar de manera analítica. Se usa las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes debido a que el comportamiento dinámico de los fluidos se apoya en conceptos de la conservación de la mecánica y la termodinámica [9].

Actualmente, es necesario verificar en una aplicación específica para conocer la efectividad del modelo numérico bajo el marco de la simulación CFD (Computational Fluid Dynamics). Para estimar los resultados de la simulación de las propiedades para rotar una turbina mediante datos experimentales es necesaria esta solución general. Para el cálculo de las fuerzas creadas por la composición mecánica de la turbina es necesario introducirse en el proceso de la simulación dinámica por medio de un modelo de función definida por el usuario [10].

Marturet [9] recalca que, la ventaja del uso de herramientas de CFD involucra una reducción importante de tiempos y precios relacionados con la utilización de nuevos diseños, la disponibilidad de aprender sistemas donde la dificultad de controlar el experimento es alta, ayuda a cambiar los datos de experimentación y su análisis en atmosferas peligrosas.

1.2 Aspectos teóricos

En el presente apartado se elabora una exploración teórica de los conceptos más importantes a conocer para el diseño de un sistema hidroeléctrico, la selección del tipo de turbina adecuada para el sistema requerido, los métodos de captación del recurso hídrico y el principio de operación de una central de generación eléctrica con el fin de dar a comprender como se produce energía a partir fuerzas que provee la naturaleza como lo es la fuerza del flujo de agua y las energías que actúan en dicho sistema, los elementos que lo componen y las diferentes etapas de generación.

1.2.1 Energía hidroeléctrica

En su investigación Sierra et al. [11] enfatizan que, la energía hidroeléctrica es uno de los primeros métodos utilizados en la generación de electricidad, en la actualidad se distingue por ser la forma más extendida y conocida después de los combustibles fósiles. Por acción de la energía potencial obtenida de la fuerza del flujo de agua y su aprovechamiento se hace posible la transformación energética gracias a que esta fluye hacia un lugar más bajo desde un punto de captación y así producir trabajo eliminando efectos contaminantes.

La dependencia de un flujo constante en distintas épocas del año en las cuales se presentan condiciones extremas como lluvias o sequías representan una desventaja importante, añadiendo a su vez el elevado coste que generan la construcción de centrales de generación eléctrica al tomar en cuenta que son obras civiles de gran magnitud [11].

Este tipo de construcciones pueden también representar un impacto ecológico debido a sus dimensiones, sin mencionar que para su ejecución es necesario realizar estudios de factibilidad con el fin de reducir los daños ambientales y aprovechar al máximo el recurso hídrico del sector, dichos estudios pueden llevar años de ejecución siendo esta una desventaja más para este modelo de producción energética [12].

1.2.2 Captación de agua

La captación se define como uno o más de un punto de origen de agua para un suministro y a también las obras que se realizan para su recolección. La captación de agua es realizada en base a un estudio previamente ejecutado sobre la zona, principalmente de la hidrología de dicho

ecosistema con el fin de justificar los valores de caudal que son utilizables, dicha captación se ejecutará mediante obras para toma tanto en la corriente de agua como en sus bordes [13].

- *Captación Superficial de agua*

La captación superficial se realiza en corrientes de agua que permitan garantizar un flujo permanente y de este modo contar con la operación durante todo el año de las obras realizadas para la captación de agua y sus demás componentes. Para diseñar obras con este tipo de características es recomendable considerar los siguientes ítems [14]:

- Gasto medio, mínimo y máximo del cauce.
- Nivel normal, mínimo y extraordinario de agua.
- Rasgos de la cuenca.
- Estudio de desbordamiento, arrastre y desplazamiento de elementos flotantes.
- Existencia de fuentes contaminantes en cercanías de la localidad.

- *Captación directa de agua*

Según el tipo de corriente se define la obra que puede realizarse para la toma del recurso, el caudal requerido y sus características de suelo tomando en cuenta que pueden ser tubos sumergidos o grandes torres para su diseño. Para la ubicación de este tipo de captación se requiere tomar en consideración las siguientes recomendaciones [14]:

- Con el fin de abastecer se debe realizar la obra de captación aguas arriba del sector.
- La toma de agua (captación) se debe ubicar en tramos uniformes y su entrada debe localizarse a menor nivel que el de aguas mínimas del cauce.
- Para definir el punto al que llega el agua salada del mar, es necesario un estudio minucioso que determine la calidad que tiene el fluido en diferentes temporadas del año, esto en caso de existir mareas que afecten la corriente.
- Es necesario tomar en cuenta la velocidad del agua en las diferentes temporadas del año en las cuales presentará caudales mínimos (estiaje) o caudales máximos como en temporadas de lluvia, a su vez se toma en cuenta características litológicas del canal, estabilidad y posibles socavaciones.

1.2.3 Selección de la turbina

Como plantean Nava y García [15], la selección de la turbomáquina a utilizar en el sistema se realiza mediante los valores de carga, es decir, diferencial de altura desde la captación hasta el punto en el que llega a la turbina y también dependerá del caudal. Ambos parámetros se presentan mediante intervalos que permitirán determinar el tipo de turbina que se debe implementar como se ilustra en la figura 2.

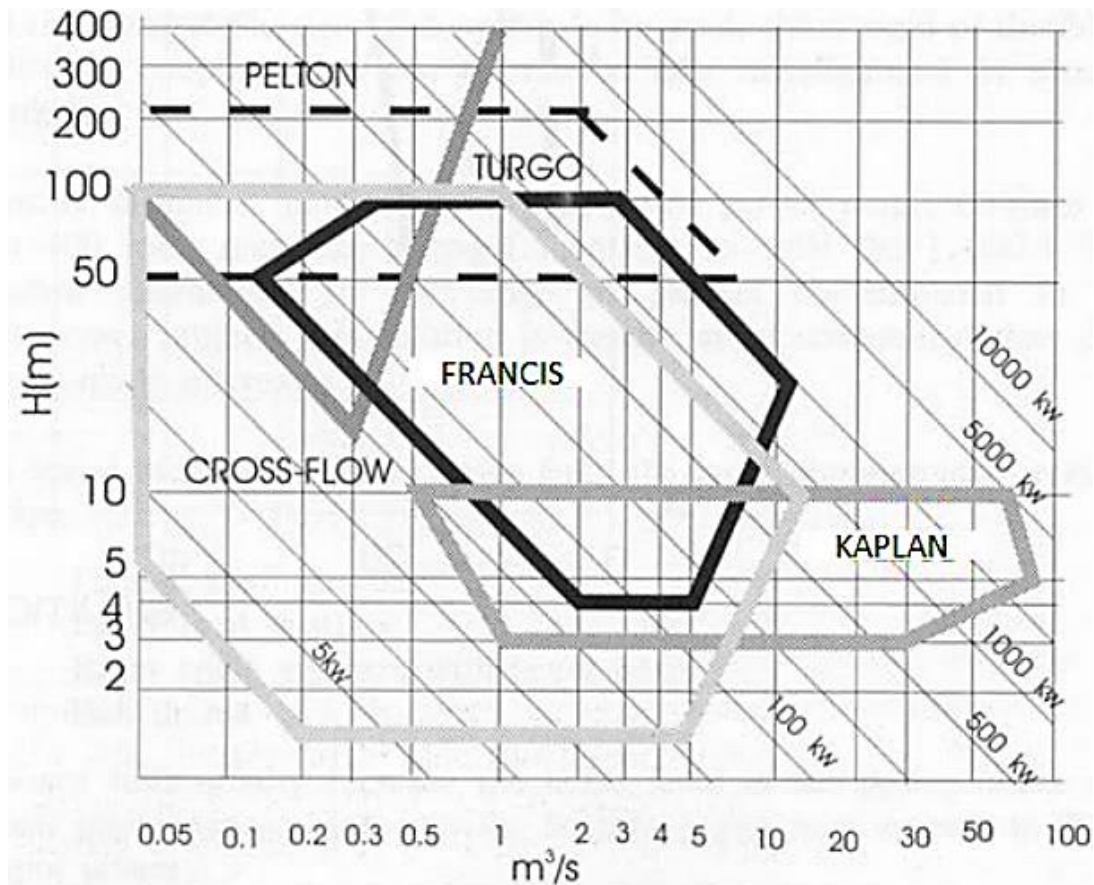


Figura 2. Diagrama para preselección de turbinas hidráulicas [16].

1.2.4 Generador eléctrico

La función de producir energía eléctrica mediante la rotación del eje de la turbina obtenida por el flujo de agua es trabajo del generador eléctrico, dicha transformación será realizada por la rotación a cierta velocidad de un eje el cual posee un par y la energía eléctrica producida se transmitirá mediante líneas eléctricas [17].

Generalmente en sistemas de micro producción de electricidad, el elemento encargado de transformar la energía potencial adquirida por el flujo del agua es la turbina hidráulica, esta pone en marcha al generador eléctrico en un proceso desarrollado por etapas como se visualiza en la figura 3, que abreviadamente puede definirse como un conjunto constituido por: un rodete el cual gira gracias a la fuerza producida por el fluido en los álabes de este; el estator el cual se encuentra fijo y se encarga de diferentes funciones en cada turbina como la regulación de caudal, direccionamiento del flujo, transformación de energía de presión en cinética, por último está la carcasa que cubre y da soporte a los demás componentes como se puede visualizar en la figura 4 la cual muestra el proceso de generación de energía eléctrica [11].

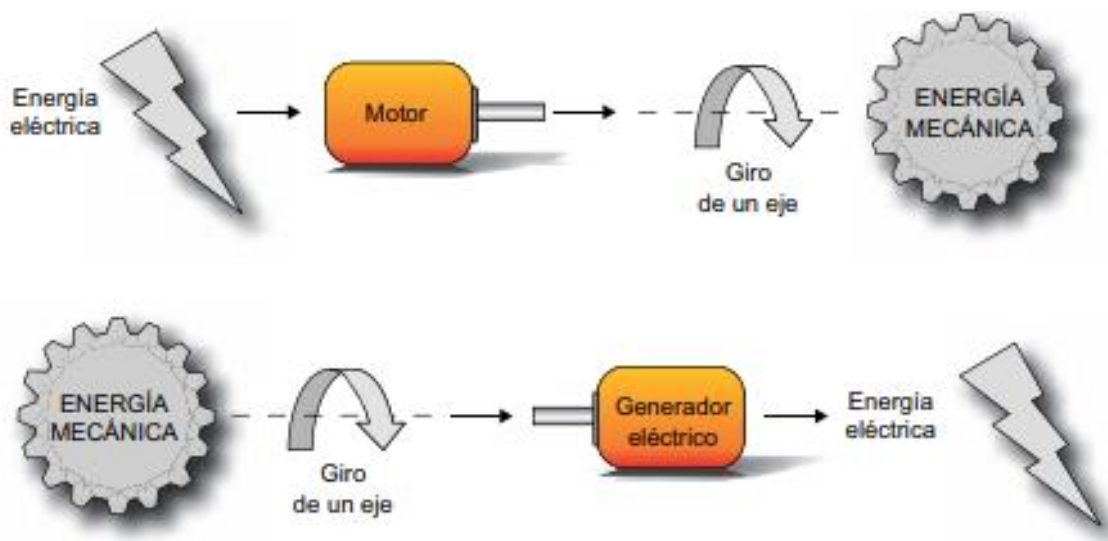


Figura 3. Proceso de transformación energética [17].

Desde un enfoque técnico, el generador eléctrico está conformado por un imán de gran potencia el cual genera un campo, en su parte interna se ubica una espira conductora que gira conectada al eje de una turbina, un motor, entre otros [17].

1.2.5 Principio de funcionamiento de una central hidroeléctrica

Soria [12] señala que, las centrales hidráulicas aprovechan la energía producida por la caída de flujo del agua (energía potencial) convirtiéndola en gracias al uso de la turbina en energía mecánica, para consecuentemente transformar dicha energía en electricidad como se visualiza en la figura 4 donde se aprecian los componentes que posee una central hidroeléctrica y el proceso que se sigue para la generación energética.

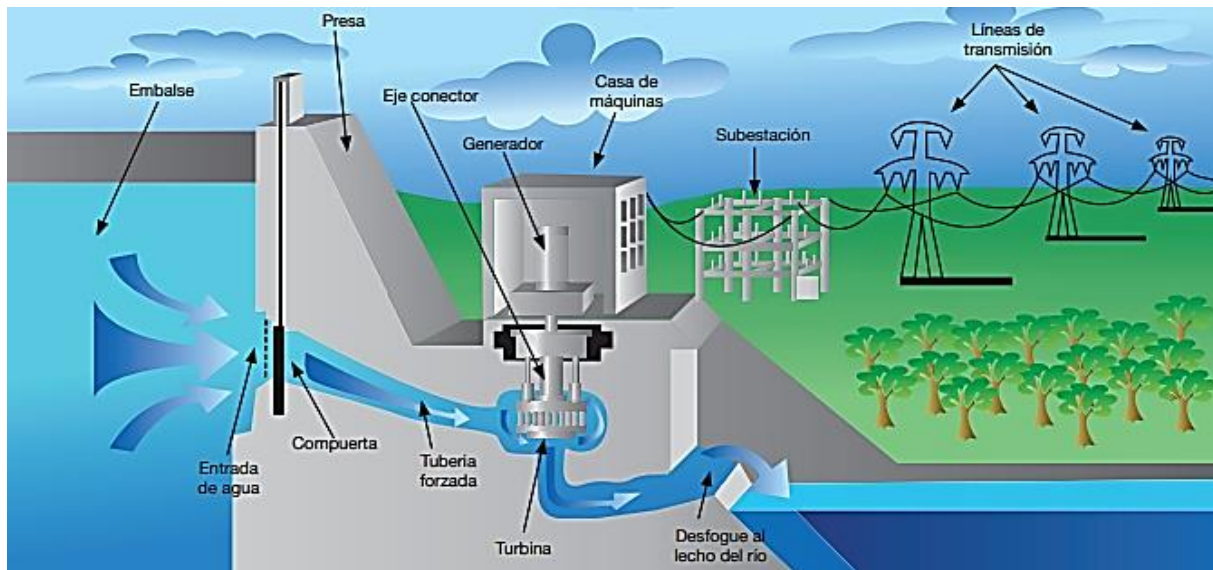


Figura 4. Componentes de una central hidroeléctrica [5].

Las centrales minihidráulicas típicas poseen elementos como la presa, toma o captación de agua, líneas de conducción del recurso, depósito de carga, conducto forzado, central, dispositivos electromecánicos, línea de descarga, subestaciones y líneas de energía eléctrica [12].

1.2.6 Simulación CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD es un área de estudio destinado o centrado en la simulación numérica de diferentes fenómenos como lo son el desplazamiento de fluidos o flujo de estos y la transmisión de calor, reacciones de compuestos químicos, entre otros. ANSYS en específico es un software el cual permite realizar diferentes tipos de simulación tanto mecánicas, estructurales, electromagnéticas, fluidos entre otros [18].

La realización de simulaciones que se comparen con proyectos que pueden llevarse a cabo en la vida real permiten evitar importantes pérdidas de dinero previo al diseño y ejecución de los mismos, siendo la principal ventaja de la simulación CFD [19].

1.3 Conclusiones del capítulo

En el capítulo I se concluye que, el uso de los recursos renovables es de gran importancia. Actualmente, estos brindan mayor seguridad medio ambiental y permiten ser aprovechados de forma indefinida debido a que son consideradas como fuentes inagotables de energía. Sin

embargo, es indispensable hacer uso correcto de estos para no afectar la fauna del sector en donde son implementados.

La selección de la turbina es la parte principal de un sistema hidroeléctrico ya que a partir de este componente es posible realizar la transformación de la energía mecánica producida por el recurso hídrico. Es importante considerar que para escoger el tipo de turbina que se utilizará parte de parámetros que se establecen en base a una serie de estudios del sector y el recurso, logrando concluir la factibilidad del sistema hidroeléctrico.

CAPÍTULO II

FORMULACIÓN DE UN SISTEMA HIDROELÉCTRICO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA TURBINAS HIDRÁULICAS

En el capítulo I se definieron conceptos para el funcionamiento de un sistema hidroeléctrico al igual que los distintos componentes que lo conforman. Por lo tanto, en el capítulo II se realiza un enfoque analítico de las ecuaciones requeridas para determinar las diferentes alternativas de turbina a seleccionar para el diseño del sistema planteado en base a las condiciones hidrográficas de la zona.

2.1 Altura de diseño y caudal de una turbina

Para la operación de una turbina a su máxima eficiencia es necesario los valores de diseño como altura y caudal netos. Así mismo, con el objetivo de trabajar con una máxima eficacia por parte de la turbomáquina se requiere del caudal de diseño. La información sobre caudales y alturas deben ser tomados por el diseñador del sistema de modo que el mismo determine el tipo y modelo de turbina adecuado y así conseguir que la central trabaje el mayor tiempo posible en rangos de eficiencias mayores de las turbinas [20].

2.1.1 Determinación de salto o altura neta

Como afirma Mataix [21] la diferencia entre alturas, específicamente la altura total de entrada y la de salida a la turbina representan el valor de la altura neta. Dicho diferencial de altura llamada altura teórica será la que la turbina absorberá. En la figura 5 se muestran las alturas que intervienen en un sistema de tuberías para generación eléctrica, las mismas pueden definirse como [22]:

- Salto bruto (H_b): Está determinado por la elevación existente entre el sitio de embalse donde se almacena el agua y el lugar de descarga del caudal para el funcionamiento de la turbina hacia el río.
- Salto útil (H_u): Representa la variación de alturas existente entre el punto de toma del fluido en la represa y el punto en que la turbina recibe el fluido.
- Salto neto (H_n): Simboliza la energía máxima con la que trabajará la turbina y se obtiene al restar las pérdidas producidas en los canales o tuberías, del salto bruto ya mencionado.

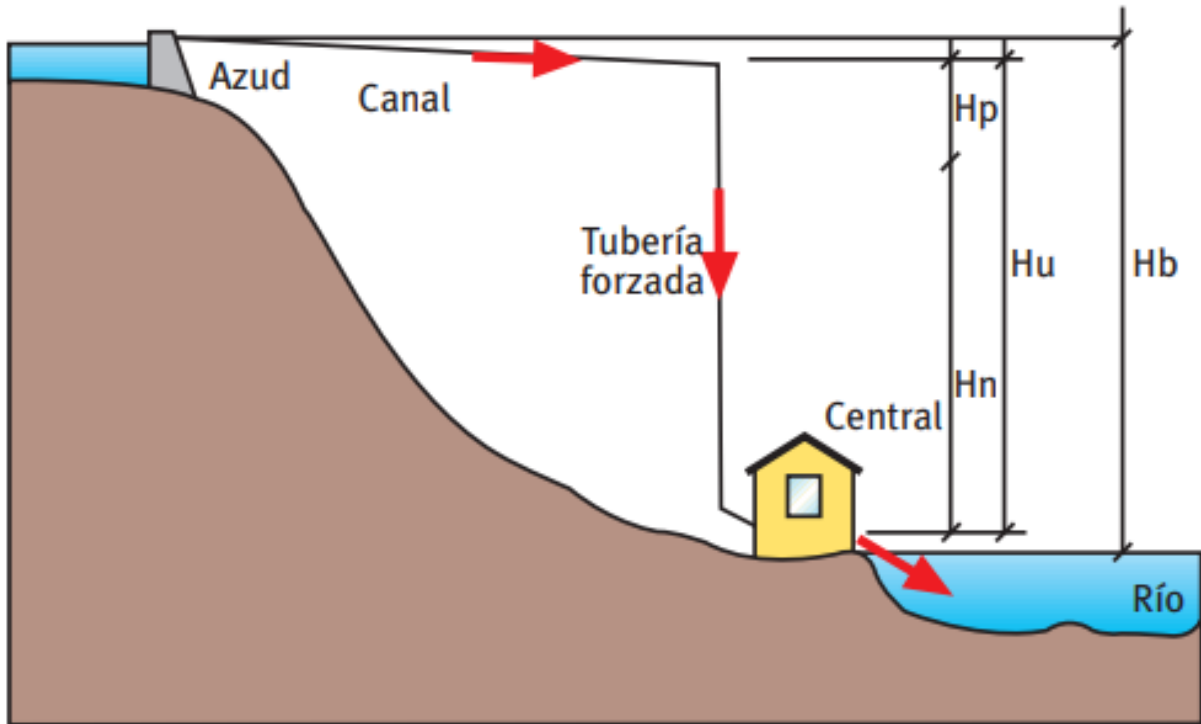


Figura 5. Alturas obtenidas por un salto de agua [22].

Conociendo la definición que presenta la altura neta la cual es a su vez llamada carga neta e interviene en la evaluación del potencial eléctrico del sistema de generación, se presenta la siguiente ecuación:

$$H_n = H_b - H_L \quad (1)$$

2.1.2 Métodos de medición de caudal

De acuerdo con Díaz et al. [23] el aforo de un canal de agua es fundamental para determinar si existe una carga contaminante en este y a su vez elegir el tratamiento correcto que puede darse a esta. También permite conocer información del recurso hídrico como lo son su disponibilidad mediante la información ya obtenida, esto dará paso a la realización de la pertinente gestión del cauce o cuenca hidrológica.

Herrera y Peña [24] señalan que, la medición y el control de los recursos hídricos son actividades de vital importancia que deben ser realizadas con la finalidad de recaudar la información necesaria para la ejecución e implementación de actividades o sistemas que permitan el aprovechamiento del recurso hídrico.

Para la medición de caudales existen diferentes métodos los cuales permiten recolectar esta información, las maneras comúnmente utilizadas son las que se mencionan a continuación:

- Método de sección – velocidad con flotador
- Método sección – velocidad con molinete
- ***Velocidad media del agua en una corriente***

Kennedy et al. [25] establecen que, la velocidad del fluido en los conductos abiertos variará dependiendo de diferentes parámetros entre los cuales están la sección transversal, rozamiento, tensión superficial y viscosidad. Existen corrientes internas al cauce que son paralelas entre ellas las cuales tienen mismos valores de velocidad tanto en los costados del cauce como en el fondo de este. Cabe tomar en cuenta que existe una disminución ligera en cuanto al valor de velocidad.

King et al. [26] postulan que, en base a las mediciones experimentales de repartición de velocidades que se presentan en base a la profundidad de la corriente y seleccionando un tramo del canal que presente la mayor uniformidad posible como se puede observar en la figura 6, pudieron concluir las siguientes pasos o condiciones para la práctica:

- Los valores máximos de velocidad se pueden encontrar a diferentes profundidades dependiendo del tipo de cauce o corriente, generalmente dicha velocidad máxima se encuentra en el intervalo de valores entre 5 y 25 % de hondura del cauce y existe un aumento de este porcentaje a medida que aumenta la profundidad. En canales de poca profundidad con lecho rugoso se debe tomar estas velocidades muy cercanas a la superficie.
- En un tubo vertical la velocidad media es representada a 0.6 de la hondura. Esto produce un error de 1 % y un máximo de 3 %.
- El promedio de velocidades en el canal se toma a profundidades entre 0.2 y 0.8 del cauce. Esta media se produce con un error medio de 0 y un máximo de 1 %.
- Verticalmente se puede encontrar una velocidad media del 85 al 95 % con respecto a la de la superficie, dando así un 90 % en promedio de varios análisis.



Figura 6. Selección de sitio adecuado para medición de velocidad del cauce [27].

Es posible determinar la velocidad media del agua del recurso hídrico mediante métodos tanto directos como son el uso de flotador o molinete, también métodos indirectos como el uso de fórmulas [25].

- ***Método de sección – velocidad con flotador***

Este método permite estimar el caudal de manera sencilla mediante la aproximación de la rapidez del fluido y la medición del área de sección transversal del cauce, para esta metodología es aplicable la siguiente fórmula [28]:

$$\dot{Q} = F_c \cdot A \cdot \frac{L}{T} \quad (2)$$

Siendo, F_c un factor de corrección el cual está relacionado a la velocidad para lo cual es necesario tomar en cuenta la tabla 1 y seleccionar dicho factor en base al tipo de cauce y sus dimensiones. La variable A indica el área de la tubería o conducto por el que circulará el fluido, la variable L es la distancia existente entre el punto A y B del tramo medido como se muestra en la figura 6 y por último la variable T que representa el tiempo promedio en que el cuerpo flotante demora en desplazarse desde la posición inicial (punto A) a la posición final (punto B).

Tabla 1. Factor de corrección requerido para determinar caudales [28].

Tipo de canal	Factor de corrección (F_c)
Conducto recubierto en concreto y hondura > 15	0.8
Canal de tierra con profundidad > 15 cm	0.7
Arroyos con profundidad > 15 cm	0.5
Conducto de tierra con hondura < 15 cm	0.25– 0.50

- **Método de sección – velocidad con molinete**

Alvarado [29] define que, el molinete también conocido como correntómetro es un dispositivo que posee una hélice o una rueda de copas como se visualiza en la figura 7, dichas hélices o ruedas giran al entrar en contacto con el agua en movimiento. Las velocidades tanto de rotación de las hélices como de la corriente de agua serán directamente proporcionales por lo cual a mayor velocidad de flujo de agua existe una rotación de la hélice más rápida.

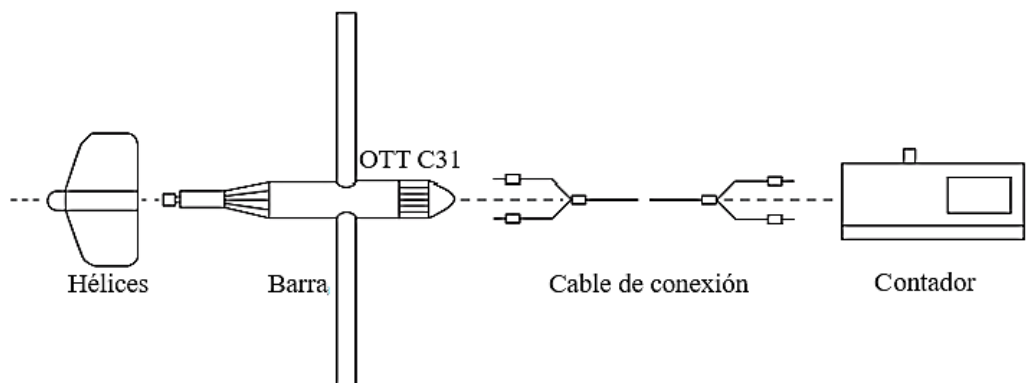


Figura 7. Partes de molinete modelo OTT C31 [29].

La velocidad se mide en base al número de vueltas que realiza la hélice y el tiempo que le toma hacerlo, esto se registra en un contador y de forma automática se expresa dicha velocidad en metros por segundo. Existen diferentes métodos de medición con molinete los cuales varían en base a la profundidad a la que se coloca el mismo [29].

Desde el momento en que se elaboran los molinetes se calibran y se marcan con una tabla la cual porta las ecuaciones que usan parámetros como la velocidad angular obtenida del giro de las hélices del molinete para determinar la velocidad del río. En la tabla 2 se puede observar algunos ejemplos de ecuaciones para calibrar los molinetes que se utilizan generalmente [30].

Tabla 2. Ejemplos de modelos de molinete y sus ecuaciones de calibración [30].

Modelo de molinete	Ecuación de calibración
SIW-017	$v = 0.658N + 0.009$
Gurley-622	$v = 0.690904N + 0.014694$
Price-622	$v = 0.6735N + 0.0091$

Donde: v = velocidad del río [m/s]
 N = cantidad de rev/seg

2.1.3 Cálculo de caudal

De acuerdo con Castro [22] para determinar el caudal de diseño es indispensable conocer cada uno de los caudales del cauce en el lugar a la captación de agua. Los volúmenes de agua que existe en el cauce, volumen turbinando y el volumen que es vertido por servidumbre entre otro el posible obtenerse mediante la gráfica de curva de distintos caudales. En general, el caudal es calculado a través de la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = V \cdot A \quad (3)$$

La curva de caudales requiere de la determinación de parámetros como el caudal mínimo, máximo, de servidumbre y caudal mínimo técnico para su elaboración mostrado en la figura 8.

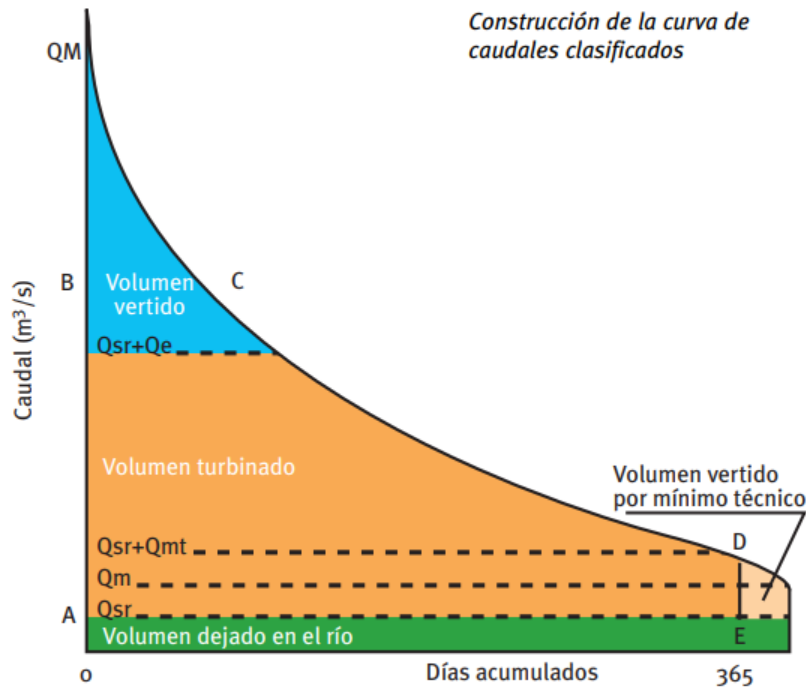


Figura 8. Curva de caudales clasificados [31].

- \dot{Q}_M :El caudal máximo se caracteriza por ser de grandes dimensiones y se ve manifestado en largos ciclos de retorno [32].
- \dot{Q}_m :El caudal mínimo y el caudal ecológico se relacionan por lo cual se utiliza dicho caudal como referencia para la obtención del caudal ecológico considerando la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{\min} = \frac{\bar{P} \cdot A}{10^6} = \dot{Q}_{eco} \quad (4)$$

donde la variable \bar{P} simboliza el promedio de las precipitaciones anuales de la cuenca y la variable A representa el área de esta. El caudal ecológico en un 97 % de ocasiones es como se propone. Sin embargo se debe tomar en cuenta que su valor no supera al caudal mínimo en más de 2.5 veces este para ocasiones diferentes a la propuesta [33].

- \dot{Q}_{sr} : Caudal de servidumbre es el valor de caudal requerido que se debe desechar para mantener la normalidad del cauce [34]. El caudal ecológico forma parte de este y es definido como el caudal mínimo requerido para sostener la vida acuática [35].
- \dot{Q}_{mt} : El caudal mínimo técnico como se muestra por la siguiente expresión, tiene una relación proporcional con el caudal de equipamiento pero a su vez depende del factor de proporcionalidad k el cual es determinado en base al tipo de turbina [34].

$$\dot{Q}_{mt} = k \cdot \dot{Q}_e \quad (5)$$

2.2 Selección tipo de turbina

Para la elección del modelo de turbina es indispensable determinar el caudal de diseño y el salto neto del lugar elegido. Mediante un diagrama de caudal vs altura es posible determinar de forma efectiva el tipo de turbomáquina adecuado como se ilustra en la figura 9 [36].

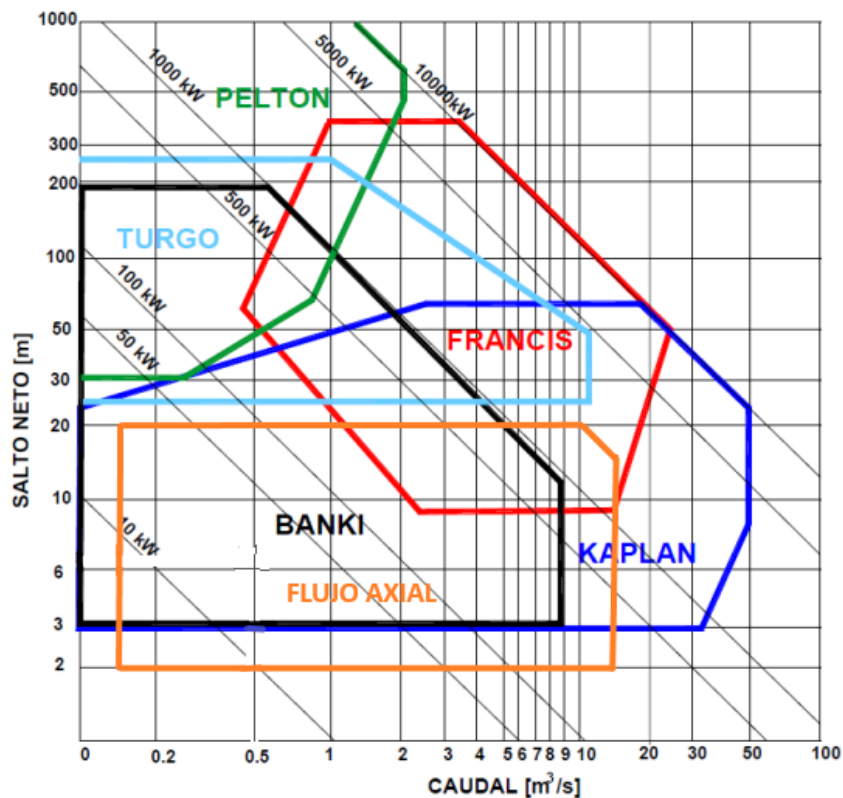


Figura 9. Diagrama Caudal vs Salto neto para selección de tipo de turbina [37].

2.3 Velocidad específica

Polo [38] señala que, para comprobar el procedimiento de una turbina es necesario considerar la velocidad específica, ya que es uno de los parámetros más importantes, gracias a que esto permite determinar la rapidez con que gira la turbina a través de la siguiente expresión:

$$N_s = \frac{n \cdot \sqrt{P}}{H_n^{5/4}} \quad (6)$$

Donde:

N_s : Es el número de revoluciones específicas

n : Son las revoluciones por minuto

P : Potencia de la turbina al frenado

H_n : Es la altura neta

Coz et al. [39] señalan que, en base a la velocidad específica (número de revoluciones) las turbinas pueden clasificarse en diferentes tipos como observa en la tabla 3:

Tabla 3. Clasificación de turbinas Francis en relación a la velocidad específica [39].

Tipo de Turbina	Velocidad específica
	Ns (rpm)
Lenta	60 – 150
Normal	150 – 250
Rápida	250 – 400

2.4 Tipos de potencia en una central hidroeléctrica

Dentro del funcionamiento de una central de generación eléctrica existen diferentes variables las cuales son necesarias para determinar la capacidad de producción que puede ofrecer una central con el fin de abastecer los requerimientos, entre dichas variables se encuentra la potencia la cual puede ser clasificada en diferentes tipos para cada una de las fases de generación de energía.

2.4.1 Potencia hidráulica

De acuerdo con Mallitásig y Tapia [40] se puede obtener energía eléctrica en una pequeña central aprovechando la fuerza del agua que obtiene el caudal \dot{Q} al desplazarse a determinada altura H_n transformándola en energía mecánica por la turbina y posteriormente transformándose en electricidad debido al generador. La siguiente expresión permite determinar la potencia hidráulica:

$$W = \gamma \cdot \dot{Q} \cdot H_n \quad (7)$$

Donde:

W : Es la potencia hidráulica [kW]

γ : Peso específico [kN/m³]

H_n : Es la altura [m]

2.4.2 Potencia bruta

La potencia "bruta" W_b , que puede ser obtenida del salto hidráulico como se muestra a continuación:

$$W_b = \gamma \cdot \dot{Q} \cdot H_b \quad (8)$$

siendo H_b el salto bruto disponible, γ el peso específico (agua) y \dot{Q} el caudal a turbinar como se ha mencionado para las ecuaciones ya mostradas, es imposible aprovechar la instalación real de todo el salto bruto [41]. Si la eficiencia de la turbomáquina es η_t , entonces la potencia resultante en la turbina W_T es determinada mediante:

$$W_T = \eta_t \cdot \gamma \cdot \dot{Q} \cdot H_n \quad (9)$$

$$W_T = \eta_t \cdot W_H \quad (10)$$

2.4.3 Potencia eléctrica

Zamora y Viedma [41] señalan que, comúnmente a la relación H_n/H_b se la denomina como el nivel de aprovechamiento de la hidroeléctrica. Por otro lado, las pérdidas de carga que se producen en el generador se ven representadas a través de un rendimiento total del generador η_g . Se puede determinar la potencia eléctrica que se suministra a los consumidores, teniendo en cuenta las pérdidas eléctricas en los diferentes elementos de conducción de esta. Es posible incluirse pérdidas que se generan en la instalación eléctrica en el rendimiento del generador. La potencia eléctrica obtenida W_e puede determinarse como:

$$W_e = \eta_g \cdot \eta_t \cdot \gamma \cdot \dot{Q} \cdot H_n \quad (11)$$

$$W_e = \eta_g \cdot \eta_t \cdot W_H \quad (12)$$

2.4.4 Potencia instalada

También conocida como potencia útil nominal, la potencia instalada está definida a través del producto de los rendimientos de todos los componentes del sistema dando como resultado un rendimiento global y se puede calcular mediante el uso de la siguiente ecuación [42]:

$$W_{inst} = \gamma \cdot \dot{Q}_e \cdot H_n \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \quad (13)$$

$$W_{inst} = W_H \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \quad (14)$$

donde:

W_{inst} : Potencia instala de la central hidroeléctrica [kW]

\dot{Q}_e : Caudal de equipamiento [m^3/s]

η_m : Rendimiento del multiplicador

η_{tr} : Rendimiento del transformador

Fernández y Robles [42] señalan que, es posible utilizar valores comprendidos entre 0.80 y 0.85 como el producto de los rendimientos de todos los componentes para una central hidroeléctrica.

Considerado una primera iteración en caso de que no se conozcan los calores reales de los elementos, se utiliza la siguiente ecuación:

$$W_{ins} = 0.8 \cdot \gamma \cdot \dot{Q}_e \cdot H_n \quad (15)$$

Se debe tener en cuenta que el caudal tomado para el cálculo permitirá obtener una potencia diferente, es decir, si se toma el caudal de equipamiento \dot{Q}_e se puede obtener la potencia instalada, en cambio, si se utiliza el caudal en un momento dado lo que se obtiene es una potencia instantánea.

2.5 Rendimiento

De acuerdo con el razonamiento mencionado anteriormente, se puede determinar el rendimiento de la instalación total como el cociente entre la potencia teórica que se puede obtener del salto hidráulico y la potencia eléctrica que se entrega a la red [41].

$$\eta_{central} = \frac{W_e}{W_b} = \eta_g \cdot \eta_t \left(1 - \frac{\Delta H_{inst}}{H_b} \right) \quad (16)$$

Siendo ΔH_{inst} la distancia que recorre el fluido desde la represa hasta la hidroeléctrica.

2.6 Producción

Zamora y Viedma [41] señalan que, habitualmente se expresa la producción como la potencia que se desarrolla en un determinado intervalo de tiempo (comúnmente un año). Definiendo así a la producción en $W \times \text{hora/año}$ mediante la siguiente ecuación:

$$W = f_u \cdot W_e \cdot t_{año} = f_u \cdot \eta_g \cdot \eta_t \cdot \gamma \cdot \dot{Q}_e \cdot H_n \cdot t_{año} \quad (17)$$

donde f_u es el factor de utilización el cual es determinado tomando en cuenta las paradas realizadas a lo largo de ese intervalo de tiempo debido a diferentes factores como la falta del recurso hídrico, mantenimiento del sistema hidroeléctrico, entre otros. Otra variable que se añade es $t_{año}$ la cual representa el número de horas respectivo a un año [41].

Cabe recalcar que todos los parámetros de diseño estudiados para una central tienen la finalidad de maximizar la producción energética que esta pueda ofrecer, dentro de los cuales dichos parámetros están relacionados entre sí.

2.7 Pérdidas de energía

Las pérdidas de carga también denominadas pérdidas de energía en tuberías son aquellas que se generan a causa de la fricción entre los muros de la tubería y el fluido, en donde las variables que interactúan son la longitud del conducto, diámetro, velocidad de flujo, cantidad y tipo de accesorios influyen en el valor de pérdida que se eliminará de la altura bruta para la obtención de la carga neta.

2.7.1 Número de Reynolds

Predecir la manera de trasladarse del flujo independientemente del tipo de fluido con el que se trabaje es fundamental para el estudio de pérdidas energéticas presentes en un sistema. Para determinar dicho comportamiento es necesario un medio, esto debido a la dificultad que representa observar el fluido de trabajo dentro de tuberías las cuales están conformadas por tubos opacos que no permiten la visualización del mismo [43].

Pronosticar dicho comportamiento ya sea laminar, turbulento o transitorio para un fluido es posible mediante la obtención de un valor adimensional conocido como número de Reynolds, nombrado así debido a su inventor Osborne Reynolds quien fue el primero en demostrarlo. El número de Reynolds verifica y demuestra tanto experimental y analíticamente el movimiento de un fluido en un conducto basándose en cuatro diferentes variables conocidas como son: la densidad ρ , la viscosidad dinámica η , el diámetro del conducto y la velocidad del fluido V [44].

$$N_R = \frac{V \cdot D \cdot \rho}{\eta} \quad (18)$$

El número de Reynolds al no tener unidades se evaluará dentro de un rango específico. Si el valor obtenido es un número menor que 2000 entonces el comportamiento del fluido es laminar, en cambio si el valor es mayor a 4000 es un flujo turbulento. Existe a su vez un rango en el cual el comportamiento del fluido no es posible de determinarse, a dicho rango con un valor entre 2000 y 4000 se lo denomina región crítica y no es posible tener valores precisos. Cuando se

obtiene un fluido de este tipo es recomendable cambiar el valor de caudal o el diámetro de la tubería [44].

2.7.2 Ecuación de Darcy-Weisbach

El rozamiento que se genera por el flujo que pasa a través de tuberías es parte de las pérdidas de energía, por lo cual se define a la variable h_L como el valor de pérdida por fricción que se genera en el conducto mediante el contacto del fluido con la tubería y accesorios como válvulas que se dan en el sistema. Para determinar dicha pérdida se hace uso de la ecuación de Darcy-Weisbach mostrada a continuación [45]:

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (19)$$

donde, h_L se refiere a las pérdidas por rozamiento dentro del conducto, la longitud de la tubería se representa mediante la variable L , la variable D es el diámetro interno del tubo de conducto estando todas estas variables ya mencionadas en metros, la velocidad del fluido en unidades de m/s representada por la letra v , g es la gravedad en m/s^2 y por último está el factor de fricción con la letra f .

El factor de fricción es un valor adimensional de gran importancia ya que este factor se determina mediante el número de Reynolds y su ecuación dependerá del tipo de flujo con el que se trabaja. Si el flujo de trabajo es laminar, se utiliza la siguiente ecuación [43]:

$$f = \frac{64}{N_R} \quad (20)$$

En cambio, si se trata de un flujo turbulento se utiliza la siguiente expresión [44]:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (21)$$

Donde la variable buscada f representa el factor de fricción, D es el diámetro interior del conducto y la variable ϵ se conoce como la rugosidad del material.

2.7.3 Pérdidas menores en tuberías

La causa de que existan pérdidas de energía es debido al uso de accesorios en el sistema tuberías a los cuales se les denomina como pérdidas menores, las mismas se determinan a través de la siguiente ecuación [46]:

$$h_L = k \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (22)$$

Donde, las pérdidas generadas por accesorios son representadas por h_L , la variable k simboliza el coeficiente de resistencia.

- **Coeficiente de resistencia k**

El coeficiente k se encuentra relacionado con el diámetro, se encuentra determinado como la pérdida de elevación y velocidad para accesorios y válvulas, este tipo de pérdidas comúnmente son mínimas en comparación con las mayores, este valor se considera independiente tanto de un factor de rozamiento como del valor de Reynolds [47].

$$k = \left(\frac{L_e}{D} \right) f_T \quad (23)$$

Siendo L_e la longitud efectiva en metros, D el diámetro de tubería en metros y f_T el factor de fricción. En base al tipo de accesorio utilizado en el sistema de tuberías se tomará diferentes valores para la relación de L_e/D cómo se puede visualizar en la tabla 4:

Tabla 4. Longitud equivalente en diámetros de tubería para válvulas y accesorios [44].

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de mariposa – completamente abierta	
- 2" a 8"	45
- 10" a 14"	35
- 16" a 24"	25
Codo de 90°	30
Codo 90° con radio largo	20
Codo de 45°	16
Codo roscado de 45°	26

Para obtener un factor de rozamiento para el sistema de tuberías es necesario el uso del esquema de Moody el cual se muestra en la figura 10, el mismo relaciona la rugosidad relativa (rugosidad del material mostrado en la tabla 5 dividido por el diámetro del tubo por donde circula el fluido) y el número de Reynolds de acuerdo con los parámetros del sistema.

Tabla 5. Rugosidad de diferentes materiales [48].

Materia Prima	Rugosidad ε (m)
PVC, CPVC, PEAD	1.5×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}
Concreto	$3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$
Hierro Galvanizado	1.5×10^{-4}
Hierro dúctil, recubierto	1.2×10^{-4}
Concreto	$3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$

Una vez conocido el resultado de la relación que se visualiza en la tabla 4 para cada accesorio que formará parte del sistema hidroeléctrico, es posible determinar el coeficiente de resistencia en función del factor de rozamiento que formará parte de la ecuación de energía mediante el uso de curvas del esquema de Moody el cual se visualiza en la figura 10.

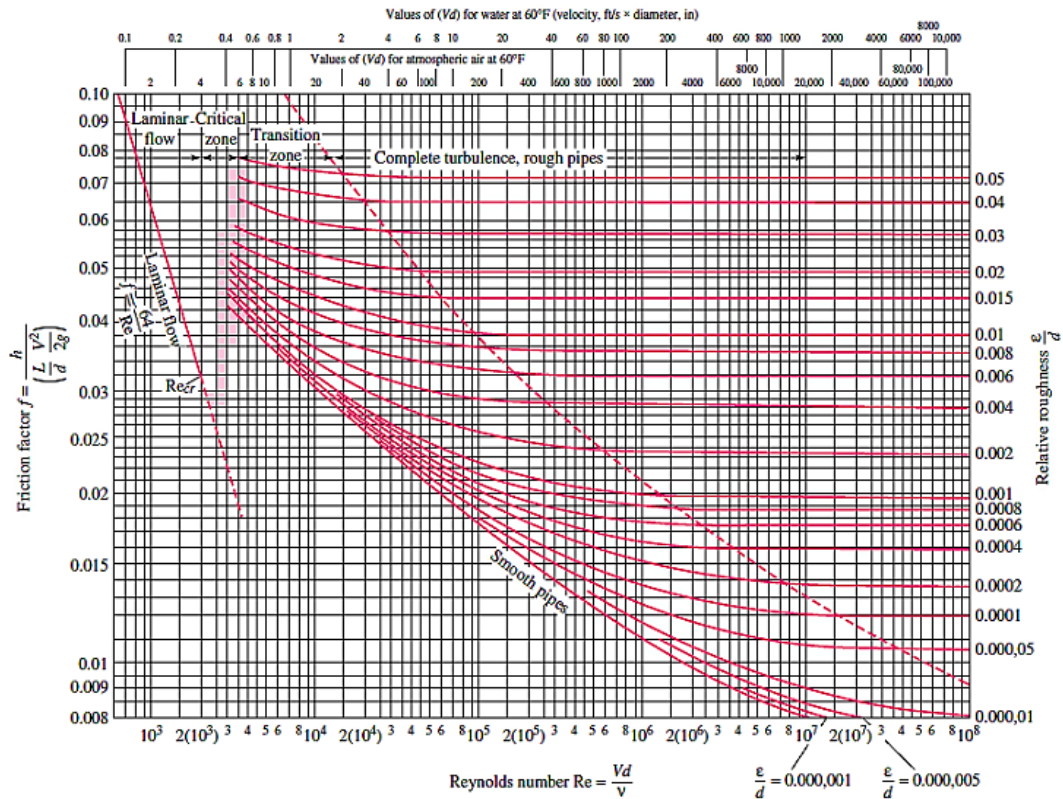


Figura 10. Diagrama de Moody para tuberías [46].

Al igual que los accesorios poseen un valor de coeficiente de resistencia (k), también se aplica para las entradas y salidas de tubería como se presenta en la figura 11.

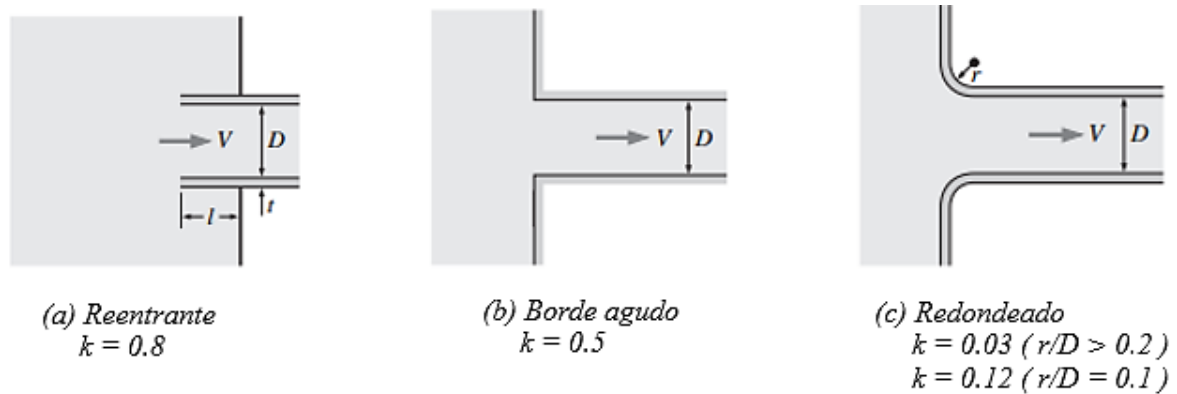


Figura 11. Coeficiente de resistencia para entradas de tubería [43].

2.7.4 Pérdida de carga total

Una vez definidos los coeficientes de pérdida, es posible analizar la pérdida de energía total (general) en el sistema mediante la siguiente expresión en la cual la variable i representa cada tramo de tubería con diámetros constantes, en cambio la variable j representa los accesorios:

$$h_{L, total} = h_{L, mayor} + h_{L, menor} = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{V_i^2}{2g} + \sum_j k_j \frac{V_j^2}{2g} \quad (24)$$

Si el sistema de tuberías mantiene un diámetro de igual magnitud, entonces la ecuación se expresa como:

$$h_{L, total} = \left(f \frac{L}{D} + \sum k \right) \frac{V^2}{2g} \quad (25)$$

2.8 Ecuación de la energía

Esta ecuación se encuentra basada en la conservación de la energía al analizar un fluido en movimiento entre dos puntos, para la aplicación de esta ecuación se toma en cuenta tanto pérdidas, extracciones y adición de energías. El balance de dicha ecuación se define como [49]:

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) + H_A - H_L - H_R = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (26)$$

Donde:

H_A : Energía añadida [m]

H_L : Energía pérdida [m]

H_R : Energía extraída [m]

P : Presión [Pa]

γ : Peso específico [kN/m³]

V : Distancia que recorre el fluido en función del tiempo [m/s]

Z : Altitud [m]

2.9 Ecuaciones de Manning

Las ecuaciones de Manning permiten determinar los parámetros de velocidades y caudal del fluido que circula en canales abiertos y en tuberías dependiendo directamente de variables como la pendiente del canal, radio hidráulico, área y el coeficiente de Manning el cual está definido por el tipo de material del que está diseñado el canal, estos coeficientes se definen en la tabla 6.

Tabla 6. Valores del coeficiente n de Manning [50].

Material de pared	n de Manning
Madera sin cepillar	0.013
Concreto terminado	0.012
Concreto sin terminar	0.014
Tubo de desagüe	0.013
Ladrillo	0.016
Hierro forjado	0.015
Tubo de concreto	0.015

En base a lo mencionado, se pueden definir la velocidad y el caudal en un canal abierto como [51]:

$$V = \frac{a}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2} \quad (27)$$

$$\dot{Q} = \frac{a}{n} A_c R_h^{2/3} S_0^{1/2} \quad (28)$$

Siendo; A_c el área de sección, la variable a es un factor constante en la ecuación con un valor de 1 [$m^{1/3}/s$], la variable n es el coeficiente de Manning dependiente del material del canal en el que circula el fluido, R_h el radio hidráulico del canal o tubería y S_0 la pendiente.

Cengel y Cimbala [43] plantean que, en el análisis de canales abiertos rectangulares al hacer uso de los coeficientes y ecuaciones de Manning es necesario determinar ciertas variables que permiten definir los parámetros de diseño de los mismos. Para el dimensionamiento de canales abiertos de tipo rectangular se hace uso del área de sección y el perímetro mojado (sección del canal por donde fluye el agua) como se visualiza en la figura 12 obteniendo como resultado el radio hidráulico en función del ancho del canal como:

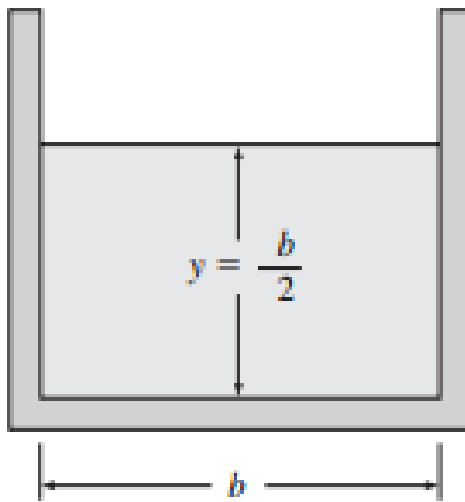


Figura 12. Dimensionamiento de un canal abierto rectangular [43].

$$A_c = by = \frac{b^2}{2} \quad (29)$$

$$p = b + 2y = 2b \quad (30)$$

$$R_h = \frac{A_c}{p} = \frac{b}{4} \quad (31)$$

Donde:

b : Ancho de sección del canal [m]

y : Altura de sección mojada [m]

p : Perímetro mojado del canal [m]

2.10 Conclusiones del capítulo

En el capítulo II se determinan los parámetros bajo los cuales trabaja un sistema hidroeléctrico, entre estos se encuentran principalmente el caudal tomado del cauce y la altura o carga existente entre los puntos de captación y conexión con la turbina, logrando diferenciar los tipos de carga presentes en sistemas de flujo en tuberías.

El dimensionamiento del sistema es indispensable realizarlo de forma secuencial iniciando en el tipo de captación a implementar. Cabe recalcar que el dimensionamiento depende principalmente de estudios topográficos e hidrológicos con el fin de definir tanto los puntos adecuados para la toma del recurso y la casa de máquinas. El perfil hidráulico permite delimitar el recorrido de la tubería de presión y la longitud de esta, estos datos junto al valor de caudal dan paso a la selección del diámetro del conducto y el cálculo de las pérdidas de energía existentes a lo largo de este.

Se definen las ecuaciones y las variables que serán aplicadas para determinar las potencias resultantes, a su vez con parámetros como altura neta y caudal es posible establecer el tipo de turbina adecuado para la generación energética y definir la proporción de energía eléctrica que puede producir la central al igual que la eficiencia de esta.

CAPÍTULO III

CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO

El capítulo III tiene como objetivo determinar los parámetros de funcionamiento del sistema hidroeléctrico mediante el uso de las ecuaciones descritas en el capítulo II. Los resultados obtenidos teóricamente permitirán realizar un análisis comparativo con los datos obtenidos mediante la simulación del sistema.

El caudal que ingresará a la tubería mediante el canal abierto tendrá un valor de 0.5 m³/s el cual será a su vez el máximo con el que trabajará el sistema, la altura bruta del sistema es de 20 m, el canal abierto a diseñar será de concreto y la tubería de presión se seleccionará en polietileno de alta densidad o en PVC. Con la finalidad de analizar distintas alternativas se propone tomar en cuenta diferentes valores de caudal que ingresan al sistema de tuberías y con los cuales una turbina pueda trabajar, permitiendo la reducción del diámetro de esta y cumpliendo con los requerimientos establecidos. Los parámetros iniciales utilizados para su diseño se visualizan en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros iniciales para el diseño del sistema hidroeléctrico.

Variable	Magnitud
Caudal [m ³ /s]	0.1 - 0.5
Altura bruta [m]	20
Longitud de la tubería [m]	1140

3.1 Velocidad del río

La velocidad de flujo en el río es medida mediante flotadores, para lo cual se tomó varias mediciones de tiempo y una distancia recorrida de 15 m como se muestra en la tabla 8. Las mediciones de tiempo y distancia que se indican en la tabla 8 permiten el uso de la siguiente relación para calcular el valor de la velocidad que posee el flujo de agua en el río estudiado:

$$Velocidad = \frac{distancia (m)}{tiempo (s)} \quad (32)$$

Tabla 8. Medición de tiempos para velocidad media de flujo.

Distancia recorrida por flotador [m]	Ensayo	Tiempo [s]
15	1	8.50
	2	9.59
	3	9.59
	4	9.56
	5	9.00
	6	10.87
	7	8.52
	8	10.04
	9	10.96
	Promedio	9.625

Conforme a los resultados obtenidos en la tabla 8, se determina la velocidad del flujo que posee el cauce del río en estudio mediante la ecuación (32).

$$V = \frac{d}{t}$$

$$V = \frac{15 \text{ m}}{9.625 \text{ s}}$$

$$V = 1.558 \text{ m/s}$$

3.2 Dimensiones de canal abierto para captación

El dimensionamiento del canal abierto utiliza distintos parámetros los cuales dependen del tipo de material de construcción con el que se diseña el canal, pendiente del canal y el caudal que circulará en el mismo como se ilustran en la tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de dimensionamiento de canal abierto.

Variable	Magnitud
Factor constante [m ^{1/3} /s]	1
Coefficiente de Manning del concreto	0.012
Pendiente del canal [m/m]	0.0184

A través de los valores mostrados tanto en la tabla 7 como la tabla 9 y haciendo uso de la ecuación (28) es posible determinar la dimensión que poseerá la base del canal abierto.

$$\dot{Q} = \frac{a}{n} \cdot A_c \cdot R_h^{2/3} \cdot S_o^{1/2}$$

Al reemplazar las ecuaciones (25) y (27) se obtiene la siguiente relación en función de la base del canal b como se muestra a continuación:

$$\dot{Q} = \frac{a}{n} \cdot \frac{b^2}{2} \cdot \left(\frac{b}{4}\right)^{2/3} \cdot S_o^{1/2} \quad (33)$$

$$0.5 \text{ m}^3/\text{s} = \frac{\left(1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}\right) \cdot b^2 \cdot \left(\frac{b}{4}\right)^{2/3} \cdot (0.0184)^{1/2}}{0.012 \cdot 2}$$

$$b = 0.5695 \text{ m}$$

Obtenido el valor que poseerá la base del canal, se utiliza un factor de seguridad con el fin de sobredimensionar el canal asumiendo un 80 % de precisión en cuanto a la altura mojada en el canal, entonces el factor de sobredimensionamiento utilizado será de 1.25 con el objetivo de evitar desbordamiento del fluido en casos de incremento en el nivel del río.

$$b_{\text{Real}} = 1.25 \cdot b$$

$$b_{\text{real}} = 1.25 \cdot (0.5695 \text{ m})$$

$$b_{\text{real}} = 0.7118 \text{ m} \approx 0.72 \text{ m}$$

En base a la relación que se muestra en la figura 12 entre el ancho del canal y altura mojada, se determina dicha altura mediante la siguiente expresión:

$$y = \frac{b}{2} \quad (34)$$

$$y = \frac{0.7118 \text{ m}}{2}$$

$$y = 0.3559 \text{ m} \approx 0.36 \text{ m}$$

Por lo tanto, las dimensiones que cubrirá el caudal del canal abierto para la captación del tanque de carga serán:

$$\text{ancho} = 0.72 \text{ m y altura}_{\text{mojada}} = 0.36 \text{ m}$$

Castellanos et al. [52] plantean que, la dimensión del borde libre (y_{BL}) equivale al 30 % de la altura total (H_T) y la altura del perímetro mojado (y_p) respecto a la altura total equivale al 70 % :

$$y_p = 0.7 \cdot H_T \quad (35)$$

$$H_T = \frac{y_p}{0.7}$$

$$H_T = \frac{0.36 \text{ m}}{0.7}$$

$$H_T = 0.5142 \text{ m} \approx 0.52 \text{ m}$$

Por lo tanto, para evitar que exista desbordamiento debido al incremento excesivo del nivel de río se ha sobredimensionado el canal abierto, se ha tomado en cuenta parámetros como el perímetro mojado y un nivel promedio del río. Como resultado el canal abierto tendrá las dimensiones mostradas en la figura 13.

$$\text{ancho} = 0.72 \text{ m y altura} = 0.52 \text{ m}$$

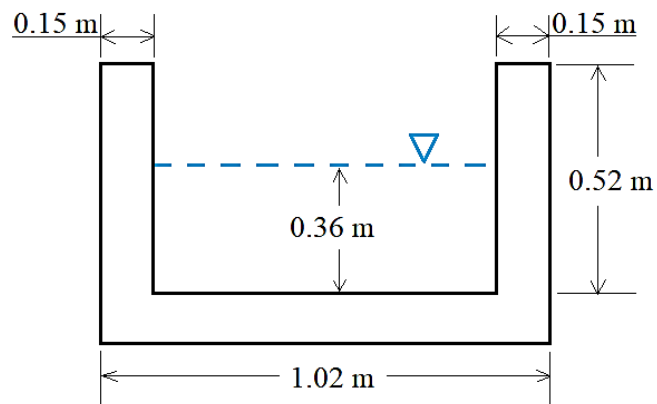


Figura 13. Dimensiones del canal abierto rectangular.

3.3 Dimensiones del tanque de carga

El tanque de carga se dimensionó para almacenar el recurso en caso de que se vea reducido el nivel del río, asegurando el funcionamiento constante de la turbina. Las dimensiones del tanque de carga se pueden observar mediante las vistas lateral y superior mostradas en la figura 14 y la figura 15 respectivamente.

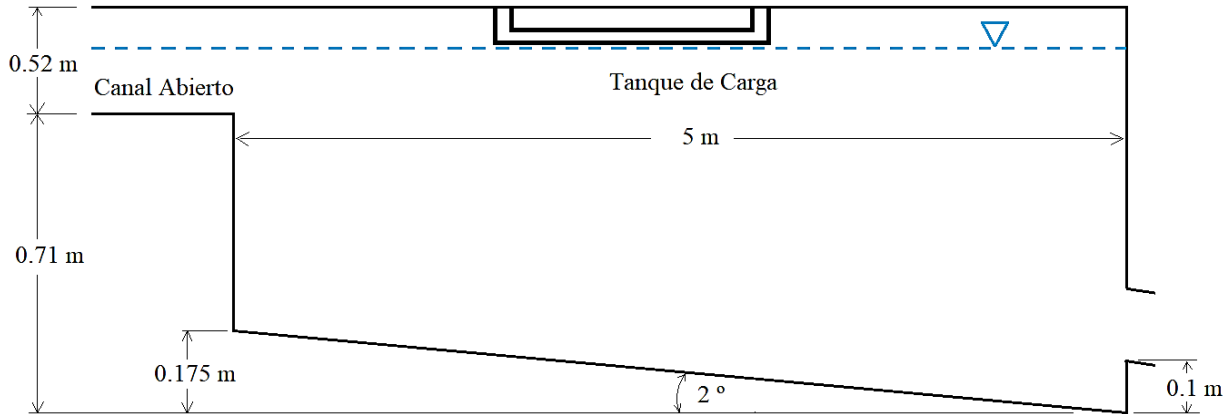


Figura 14. Dimensiones del tanque de carga mediante vista lateral.

Al tanque de carga se le adiciona un canal como se muestra en las vistas lateral y de planta, lo cual permite evitar el desbordamiento del recurso en caso de existir aumento de nivel excesivo y de este modo redirigir el exceso nuevamente al cauce del río. Su dimensionamiento se realizó en base al nivel del río, la altura que posee el tanque de carga y el espesor que posee todo el sistema diseñado en hormigón.

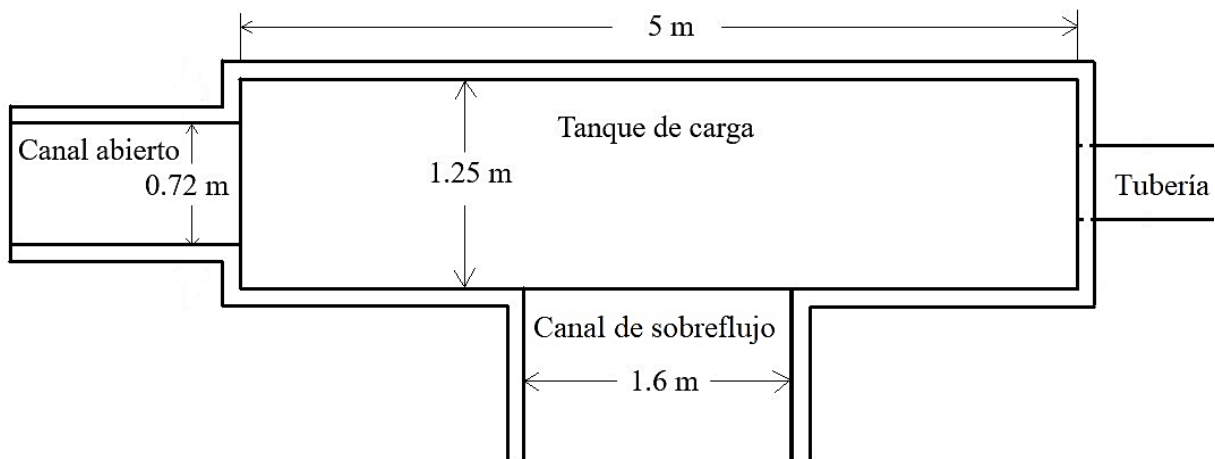


Figura 15. Dimensiones del tanque de carga mediante vista superior.

3.4 Presión hidrostática en el tanque de carga

El cálculo de la presión hidrostática que se ejerce en el tanque de carga tiene como fin determinar la presión inicial que soportará tanto la válvula como la tubería. La fuerza hidrostática será determinada a través de la siguiente ecuación:

$$F_H = \gamma \cdot h_c \cdot A \quad (36)$$

$$F_H = \left(9.806 \frac{kN}{m^3}\right) \cdot (0.5 m) \cdot (1.25 m^2)$$

$$F_H = 6.129 kN$$

La fuerza hidrostática y el área de la compuerta que está en la tubería permiten calcular la presión que se ejerce en la misma mediante:

$$P = \frac{F}{A} \quad (37)$$

$$P = \frac{6.129 kN}{\frac{\pi}{4} \cdot (0.45 m)^2}$$

$$P = 38.54 kPa$$

3.5 Cálculo del diámetro

Para el cálculo del diámetro a utilizar en el sistema como primer paso se toma un factor de fricción de 0.016 el cual toma como referencia el valor mínimo del número de Reynolds en un régimen turbulento mediante la aplicación de la ecuación (20), factor usado para determinar las fórmulas de pérdida de energía mayor y pérdidas de energía menores en donde se toma en cuenta la entrada a la tubería, accesorios como dos válvulas de mariposa y 22 codos usados a lo largo de toda la tubería.

3.5.1 Pérdida de carga mayor

Las pérdidas de energía mayores se dan a causa del rozamiento existente entre el material de la tubería y el fluido. Debido a que inicialmente no se conocen los valores de ciertas variables

como la velocidad y el diámetro, se hace uso de la siguiente relación obtenida con la ecuación (19) de la siguiente manera:

$$h_{L_{mayor}} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$h_{L_{mayor}} = 0.016 \cdot \frac{1140 \text{ m}}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$h_{L_{mayor}} = \frac{(18.24 \text{ m})V^2}{2gD}$$

3.5.2 Pérdidas de carga menores

Para determinar las pérdidas menores se debe tener en cuenta que la entrada a la tubería y los accesorios poseen un coeficiente de resistencia a la fricción distinto entre ellos, este coeficiente mencionado ya se encuentra definido en caso de entradas o salidas de tubería como se ilustra en la figura 11 y a su vez es calculado por medio de la ecuación (23) la cual depende de la relación de longitud equivalente en diámetros de tubería que posee cada accesorio como se detalla en la tabla 4.

$$k = \left(\frac{Le}{D} \right) \cdot f_T$$

$$h_L = k \frac{V^2}{2g}$$

– Entrada con borde agudo:

$$k = 0.5$$

$$h_{L1} = 0.25 \frac{V^2}{g}$$

– Válvula de mariposa totalmente abierta.

$$k = \left(\frac{Le}{D} \right) \cdot f_T$$

$$k = 25 \cdot 0.016 = 0.4$$

$$h_{L2} = \frac{0.4 V^2}{2g} \cdot 2 = 0.4 \frac{V^2}{g}$$

– Codos de 45°

$$k = 16 \cdot 0.016 = 0.256$$

$$h_{L3} = \frac{0.256 V^2}{2g} \cdot 22$$

$$h_{L3} = 2.816 \frac{V^2}{g}$$

- *Pérdida menor total*

Las pérdidas menores totales se dan mediante la sumatoria de todas las pérdidas menores producidas por cada uno de los accesorios, entradas y salidas que disponga el sistema utilizando la siguiente expresión:

$$h_{Lmenor} = h_{L1} + h_{L2} + h_{L3} \quad (38)$$

Dando como resultado la siguiente expresión en función de la velocidad de flujo:

$$h_{Lmenor} = 3.466 \frac{V^2}{g}$$

3.5.3 Pérdida de carga total

Este parámetro considera cada una de las pérdidas de carga presentes en el sistema, esto implica la sumatoria de las pérdidas mayores y menores como se detalla en la ecuación (24). Debido a que no se conocen variables como el diámetro y la velocidad, se obtiene una expresión en función de estas como se presenta en la ecuación (39).

$$h_L = h_{Lmenor} + h_{Lmayor}$$

$$h_L = 3.466 \frac{V^2}{g} + \frac{(18.24 \text{ m}) \cdot V^2}{2gD} \quad (39)$$

3.5.4 Ecuación de la energía

Para determinar inicialmente el diámetro del conducto, la velocidad de fluido y la presión en la salida de esta se utiliza la ecuación (26) en la cual se considera que $P_A - P_B = 0$; $V_A = 0$; $h_A = 0$; $h_R = 0$; $Z_B = 0$ ya que son parámetros de referencia.

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A + h_A - h_R - h_L = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B$$

$$\left(\frac{P_A - P_B}{\gamma} \right) + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A + h_A - h_R - h_L = \frac{V_B^2}{2g} + Z_B$$

$$\frac{V_B^2}{2g} = Z_A - h_L$$

Mediante la ecuación (3) para el cálculo de caudal, se despeja la variable de velocidad la cual será utilizada para la obtención del diámetro dentro de la ecuación de la energía.

$$\dot{Q}_B = V_B \cdot A_B = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot V_B$$

$$V_B = \frac{0.5 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 4}{\pi \cdot D^2} = \frac{2 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \cdot D^2}$$

$$V_B = \frac{2 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \cdot D^2}$$

$$\frac{V_B^2}{2g} = Z_A - 3.466 \cdot \frac{V_B^2}{g} - \frac{(18.24 \text{ m}) \cdot V_B^2}{2gD}$$

La ecuación de la velocidad del punto B y la de pérdidas de carga total son reemplazadas en la ecuación de la energía, obteniendo una ecuación en función del diámetro.

$$\frac{\left(\frac{2 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \cdot D^2} \right)^2}{2 \cdot (9.81 \text{ m/s}^2)} = 20 \text{ m} - 3.466 \cdot \frac{\left(\frac{2 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \cdot D^2} \right)^2}{(9.81 \text{ m/s}^2)} - \frac{(18.24 \text{ m}) \cdot \left(\frac{2 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi \cdot D^2} \right)^2}{2 \cdot (9.81 \text{ m/s}^2) \cdot D} \quad (40)$$

Mediante la resolución de la ecuación (40) se determina un diámetro aproximado para la tubería con el cual se determina la velocidad a través de la ecuación (3) y las pérdidas totales resolviendo la ecuación (39). Dando como resultado los siguientes valores:

$$D = 0.4689 \text{ m}$$

$$V_B = 2.895 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$h_L = 19.58 \text{ m}$$

3.5.5 Número de Reynolds

Una vez determinado el diámetro y la velocidad es posible hacer uso de la ecuación (18), estos valores junto con las características del fluido (agua) permiten determinar el número de Reynolds.

$$N_R = \frac{V_B \cdot D \cdot \rho}{\eta}$$

$$N_R = \frac{(2.895 \text{ m/s}) \cdot (0.4689 \text{ m}) \cdot (997 \text{ kg/m}^3)}{0.891 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}}$$

$$N_R = 1519389$$

El resultado obtenido al determinar el valor de Reynolds permite verificar el tipo de flujo que existe dentro de la tubería, debido a que su valor supera los 4000 se considera como un flujo turbulento.

3.5.6 Rugosidad relativa

Este parámetro se representa como la relación existente entre el coeficiente de rugosidad de la materia prima de la tubería y el diámetro de esta. Por lo tanto, una vez determinado el valor del diámetro y definido el coeficiente de rugosidad haciendo uso de la tabla 5 es posible calcular dicha relación mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{1.5 \times 10^{-6} \text{ m}}{0.4689 \text{ m}}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.000003198$$

Una vez obtenido el valor de la relación entre la rugosidad del material con su diámetro y el valor de Reynolds se determina el factor de rozamiento a través del esquema de Moody mostrado en la figura 10. Al establecer el nuevo factor de fricción es necesario realizar una comparativa con el fin de verificar la validez de los resultados. Cabe recalcar, que el proceso de cálculo es iterativo y depende de la verificación del factor de fricción, es decir, inicialmente se asume un valor estándar para este parámetro y mediante los cálculos mostrados anteriormente se determina si este coincide con el valor asumido o se procede a una nueva iteración hasta lograr coincidir dicho factor como se detalla en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados de iteraciones para verificación de factor de fricción.

Iteración	Diámetro D (m)	Velocidad V (m/s)	Pérdida total h_{Ltotal} (m)	N. Reynolds N_R	Rugosidad relativa (ε/D)	Factor de fricción
1 ^{era}	0.4689	2.646	19.58	1519389	0.00000319	0.01093
2 ^{da}	0.4347	3.37	19.42	1638833	0.00000345	0.01081
3 ^{era}	0.4337	3.384	19.15	1642510	0.00000345	0.01081

3.5.7 Verificación de diámetro

Una vez que el factor de fricción no varía en comparación al obtenido en la última interpolación es posible seleccionar un diámetro comercial de acuerdo con catálogos de proveedores. En este caso, el diámetro resultante a través de los cálculos teóricos es de 0.4337 m, por lo tanto, se selecciona una tubería con diámetro de 0.45 m y mediante la ecuación (3) se determina la velocidad de flujo en la misma.

$$D = 0.45 \text{ m}$$

$$V_B = \frac{Q}{A}$$

$$V_B = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \cdot D^2}$$

$$V_B = \frac{(0.5 \text{ m}^3/\text{s}) \cdot 4}{\pi \cdot (0.45 \text{ m})^2}$$

$$V_B = 3.144 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Los resultados obtenidos detallan una elevada pérdida de energía, llegando a acercarse al valor de la carga bruta lo cual implica una carga neta muy reducida. A su vez, cabe mencionar que por recomendaciones realizadas por proveedores es necesario considerar los valores de velocidad en un rango no mayor a los 2 m/s cuando se trabaja con tuberías HDPE o PVC para evitar que el sistema de tuberías colapse a causa de falla en los accesorios.

Por lo tanto, en base a las condiciones establecidas para la velocidad de flujo en la tubería, se determina un nuevo diámetro teórico mediante la ecuación (3) y se realiza la selección de este mediante catálogos.

$$\dot{Q} = V \cdot A$$

$$A = \frac{\dot{Q}}{V}$$

$$\frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{0.5 \text{ m}^3/\text{s}}{2 \text{ m/s}}$$

$$D = 0.5641 \text{ m}$$

Debido a que comercialmente no se encuentra el diámetro calculado, se selecciona una tubería con diámetro interno mayor. Dicho esto, se propone trabajar con un diámetro DN630 y SDR26 la cual posee un diámetro exterior 0.630 m y un diámetro interno de 0.5818 m.

3.6 Propuestas para el dimensionamiento del sistema de tuberías

Inicialmente se trabaja con valores que operan con un caudal de 0.5 m³/s, sin embargo, se propone hacer uso de diferentes caudales con la finalidad de analizar distintas alternativas que al mismo tiempo cubran los requerimientos. Cada propuesta trabaja con un diferente sistema de tuberías buscando beneficios a largo plazo.

En la tabla 11, se detallan los parámetros con los que opera cada sistema propuesto en donde se visualiza el nuevo caudal de diseño, diámetro nominal basado en catálogos, velocidades de flujo interno, pérdidas de carga y altura neta con la que trabajará la turbina seleccionada.

Tabla 11. Parámetros de trabajo propuestos para diseño del sistema de tuberías.

Parámetro de diseño	Unidades	Propuestas		
		Primera	Segunda	Tercera
Caudal	m^3/s	0.5	0.3	0.13
Diámetro nominal	m	0.630	0.500	0.315
Diámetro interior	m	0.5818	0.4618	0.2908
Velocidad	m/s	1.88	1.79	1.96
Factor de rozamiento	-	0.0113	0.0118	0.0126
Pérdidas de energía menores	m	0.9084	0.811	0.299
Pérdidas de energía mayores	m	3.988	4.775	9.645
Pérdidas de carga total	m	4.896	5.586	9.944
Carga neta	m	15.10	14.41	10.06

3.7 Presión

Una vez obtenidos los valores de diámetro del conducto, velocidad del fluido en la salida de la tubería, las pérdidas totales que se encuentran en el sistema, el diferencial de altura y las propiedades respectivas del fluido es posible determinar la presión existente en el punto B (presión de salida de la tubería e ingreso a la turbina) mediante la ecuación (26).

$$\frac{P_A}{\gamma} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A + h_A - h_R - h_L = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B$$

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z_A + h_A - h_R - h_L = \frac{P_B}{\gamma} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B$$

$$P_B = \left(Z_A - h_{LT} - \frac{V_B^2}{2g} \right) \gamma$$

$$P_B = (9.806 \text{ kN/m}^3) \cdot \left(20 \text{ m} - 4.896 \text{ m} - \frac{(1.88 \text{ m/s})^2}{2 \cdot (9.81 \text{ m/s}^2)} \right)$$

$$P_B = 146.3 \text{ kPa}$$

3.8 Altura neta

Es necesario realizar el cálculo de la altura neta ya que este determinará la potencia que generará la central, permite identificar la eficiencia de esta y a su vez da paso para elegir el tipo de turbina a utilizar ya que aquí se ven consideradas las pérdidas de carga que se genera a lo largo de toda la tubería. Dicha altura se calcula a través de la ecuación (1) y en la tabla 11.

$$H_n = H_b - h_L$$

$$H_n = (20 - 4.896) m$$

$$H_n = 15.10 m$$

3.9 Potencia hidráulica

Para determinar la potencia hidráulica que representa la potencia del flujo que es posible generar si la eficiencia del sistema mecánico y eléctrico (turbina, generador, multiplicador de velocidad, entre otros) funciona al 100 %. La ecuación (7) permite realizar dicho cálculo mediante el uso del peso específico del agua, caudal y la altura neta determinada anteriormente.

$$W = \gamma \cdot \dot{Q} \cdot H_n$$

$$W = \left(9.806 \frac{kN}{m^3} \right) \cdot \left(0.5 \frac{m^3}{s} \right) \cdot (15.10 m)$$

$$W = 74.05 kW$$

3.10 Potencia bruta

La potencia bruta representa la cantidad de energía que es posible generar por parte del sistema tomando en consideración el diferencial de altura total, es decir, toma en cuenta la altura bruta y no se considera las pérdidas de carga que existen en el sistema. Podría señalarse esta potencia como un valor ideal del sistema ya que no considera las pérdidas, sin embargo, en aplicaciones reales no se debe idealizar los resultados.

Por medio de la ecuación (8) se determina su valor haciendo uso del peso específico que se puede a su vez obtener mediante el producto de la densidad del fluido y la gravedad, también se aplica el caudal con el que trabaja el sistema y la altura bruta ya mencionada.

$$W_b = \gamma \cdot \dot{Q} \cdot H_b$$

$$W_b = \left(9.806 \frac{kN}{m^3} \right) \cdot \left(0.5 \frac{m^3}{s} \right) \cdot (20 m)$$

$$W_b = 98.06 kW$$

3.11 Potencia resultante en la turbina

Para la obtención de la potencia resultante en la turbina se hace uso de la ecuación (9) que toma el valor de la potencia hidráulica calculada anteriormente y la eficiencia de la turbina, esto quiere decir que esta potencia depende del trabajo que realiza la turbina. Cabe recalcar que todas las potencias que se determinan dependen de la altura neta la cual, ya que, si considera las pérdidas de energía, a diferencia de la potencia bruta que es la única que trabaja con la altura bruta y no considera las pérdidas generadas en la tubería y accesorios.

$$W_T = \eta_t \cdot \gamma \cdot \dot{Q} \cdot H_n$$

$$W_T = 0.9 \cdot \left(9.806 \frac{kN}{m^3} \right) \cdot \left(0.5 \frac{m^3}{s} \right) \cdot (15.10 m)$$

$$W_T = 66.65 kW$$

3.12 Potencia eléctrica

Representa la cantidad de producción energética que generan en conjunto la turbina y el generador mediante la ecuación (11), tomando en cuenta que este resultado depende del trabajo tanto de la turbina como del generador, es decir, que tan capaces son estos implementos para aprovechar el potencial hidráulico que llega a estos.

$$W_e = \eta_g \cdot \eta_t \cdot \gamma \cdot \dot{Q} \cdot H_n$$

$$W_e = 0.9 \cdot 0.9 \cdot \left(9.806 \frac{kN}{m^3} \right) \cdot \left(0.5 \frac{m^3}{s} \right) \cdot (15.10 m)$$

$$W_e = 59.98 kW$$

3.13 Potencia instalada

La potencia instalada representa la cantidad de energía producida en conjunto con todos los implementos tanto mecánicos como eléctricos partiendo de la potencia hidráulica como muestra la ecuación (13). En caso de no conocer la eficiencia de todos los componentes es posible asumir un valor entre 0.80 y 0.85 para determinar esta potencia.

$$W_{inst} = \gamma \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_T$$

$$W_{inst} = \left(9.806 \frac{kN}{m^3} \right) \cdot \left(0.5 \frac{m^3}{s} \right) \cdot (15.10 m) \cdot 0.80$$

$$W_{inst} = 59.24 kW$$

3.14 Rendimiento

El rendimiento de la central determinar que tanto se aprovechar el recurso hídrico, para lo cual a través de la ecuación (16) se realiza el cociente entre la potencia eléctrica entregada a la red y la potencia bruta que es posible obtener del salto hidráulico.

$$\eta_{central} = \frac{W_e}{W_b}$$

$$\eta_{central} = \frac{59.98 kW}{98.06 kW}$$

$$\eta_{central} = 0.6116 \approx 61.16 \%$$

3.15 Producción en kWh/mes

Se requiere que el mantenimiento del sistema se realice una vez cada 15 días en un tiempo de 4 horas por mantenimiento y un buffer de tiempo igual a 6 horas en caso de emergencia, es

decir mensualmente la turbina no operara 14 horas. Haciendo uso de la relación entre el tiempo de trabajo de la turbina y el tiempo total que posee un mes calendario en horas con un valor de 720 h mensuales, dando como resultado mensualmente un factor de utilización equivalente a 0.9805 a través de la ecuación (41), por lo que se trabajará con un valor de 0.98 para determinar la producción mensual de la turbina.

$$f_u = \frac{t_{Total} - t_{mantenimiento}}{t_{Total}} \quad (41)$$

$$f_u = \frac{720 \text{ h} - 14 \text{ h}}{720 \text{ h}}$$

$$f_u = 0.9805$$

El factor obtenido junto al tiempo de trabajo y potencia eléctrica son aplicados para determinar la producción de la central en un mes de trabajo a través de la ecuación (17).

$$W = f_u \cdot W_e \cdot t_{mes}$$

$$W = 0.98 \cdot (59.98 \text{ kW}) \cdot (24 \cdot 30) \text{ h/mes}$$

$$W = 42323.58 \text{ kWh/mes}$$

3.16 Alternativas de diseño

Con el fin de extraer la mayor cantidad de energía posible del recurso hídrico y tomando en cuenta que el caudal máximo que se permite utilizar es de 0.5 m³/s, a su vez estableciendo parámetros en base a la topología del terreno y las condiciones mínimas con las que puede trabajar una turbina, se ha llegado a presentar dos alternativas de diseño que operan con un caudal diferente y un sistema de tuberías dimensionado acorde a distintas variables mencionadas con anterioridad como lo son la velocidad de flujo, caudal, altura bruta.

3.16.1 Primera alternativa de diseño

La primera propuesta de diseño se caracteriza por trabajar con el máximo caudal posible que se permite extraer del cauce, como resultado posee una tubería de presión con un diámetro nominal de 630 mm, al ser de calidad SDR26 tiene un espesor de 24.1 mm constituida en polietileno de alta densidad (HDPE) PE 100 trabajará con las características mostradas en la tabla 11 y los resultados obtenidos para esta alternativa se muestran en la tabla 12.

3.16.2 Segunda alternativa de diseño

Para la segunda alternativa de diseño se propone disminuir el caudal en busca de reducción de costos mediante la implementación de una tubería DN500 y SDR26 en polietileno de alta densidad (HDPE), logrando de igual manera cubrir los requerimientos energéticos. Como se detalla en la tabla 11, el caudal de trabajo de esta alternativa es de $0.30 \text{ m}^3/\text{s}$, logra una velocidad de flujo equivalente a 1.79 m/s y los resultados de producción se muestran en la tabla 12.

3.16.3 Tercera alternativa de diseño

A causa de los costos que implica el uso de una tubería en polietileno se ha analizado trabajar con una opción diferente, por lo cual se propone un sistema que trabaje con los datos que muestra la tabla 11 a un caudal de $0.13 \text{ m}^3/\text{s}$. La tubería con la que trabaja esta alternativa es de DN315 y un espesor de pared de 12.1 mm constituida en PVC, dando como resultado un sistema más económico por el material de esta y la reducción del diámetro, sin embargo, la producción se ve afectada permitiendo valores de potencia como se detallan en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados de trabajo para cada alternativa de diseño.

Parámetro de diseño	Alternativas		
	DN630 (HDPE)	DN500 (HDPE)	DN315 (PVC)
Pérdidas de carga total [<i>m</i>]	4.896	5.586	9.944
Presión [<i>kPa</i>]	146.34	139.74	96.69
Altura neta [<i>m</i>]	15.10	14.41	10.06
Potencia hidráulica [<i>kW</i>]	74.05	42.39	12.82
Potencia bruta [<i>kW</i>]	98.06	58.84	25.50
Potencia en la turbina [<i>kW</i>]	66.65	38.15	11.54
Potencia eléctrica [<i>kW</i>]	59.98	34.34	10.38
Potencia instalada [<i>kW</i>]	59.24	33.91	10.26
Rendimiento [%]	61.17	58.36	40.72
Producción [<i>MWh/mes</i>]	42.32	24.23	7.326

3.17 Selección de Turbina

De acuerdo con los parámetros obtenidos mediante estudios del sector y cálculos teóricos realizados, se realiza una preselección del tipo de turbina a utilizar mediante la gráfica de caudal vs carga neta mostrada en la figura 9, en donde se aprecia marcada con una “X” cada alternativa. A partir de la preselección realizada se obtiene como resultado tres diferentes alternativas para los tipos de turbina que son de posible uso para el sistema diseñado, cumpliendo con rangos de caudal y carga neta definidos teóricamente mostrados en la tabla 11. Las turbinas que cumplen con los parámetros como se muestra en la figura 16 son de tipo Michell-Banki, Kaplan y de flujo axial.

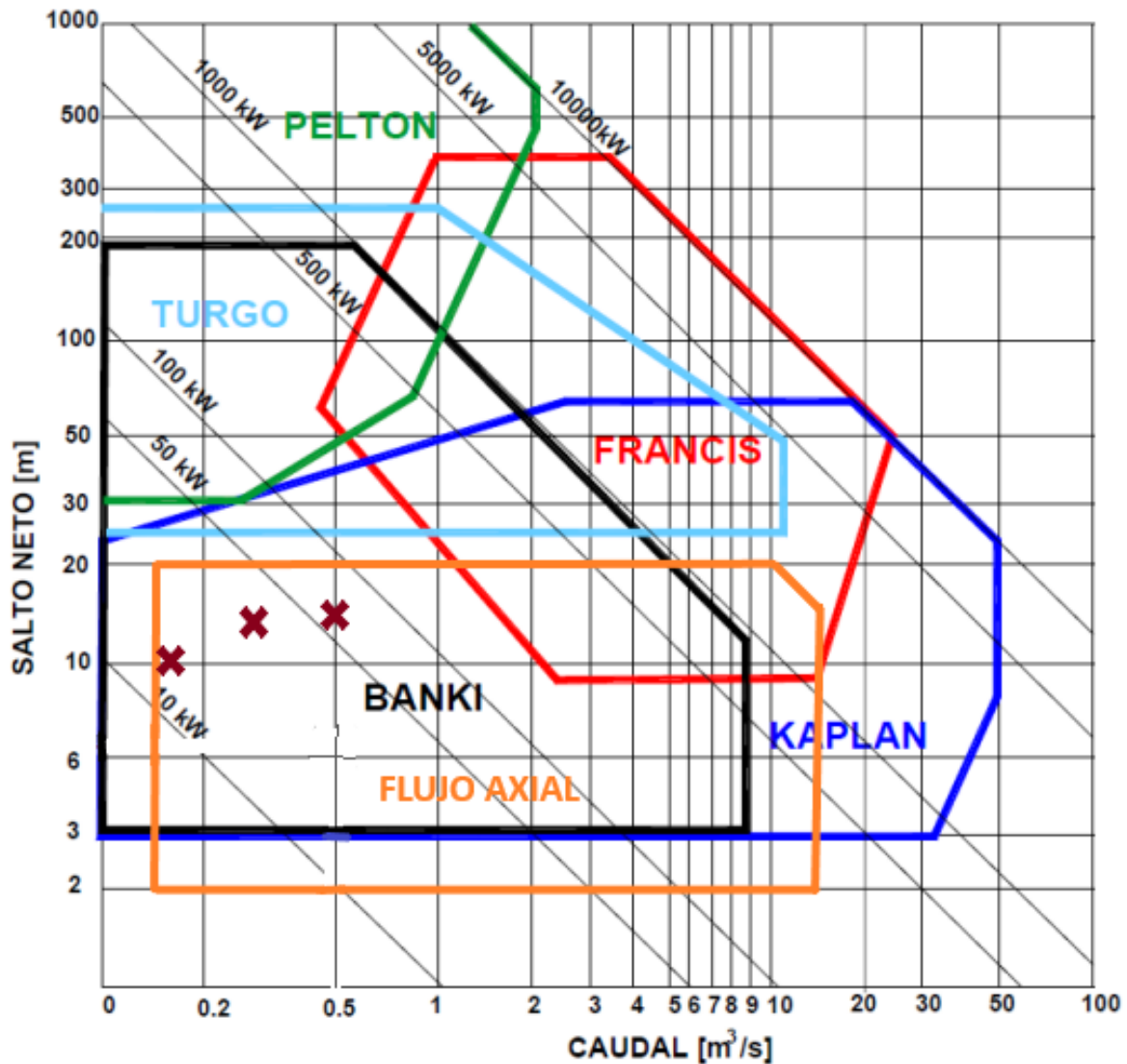


Figura 16. Preselección de tipo de turbina para alternativas de diseño [37].

3.17.1 Evaluación de parámetros para selección

Para evaluar entre los tipos de turbina que han sido preseleccionados la opción que mejor se adecúe al sistema, se toman en cuenta diferentes parámetros que permiten realizar una comparación en base a los resultados obtenidos mediante puntuación. Los factores a analizar y el método de puntuación se detallan en la tabla 13, cabe recalcar que en base a la suma de todos los puntajes se determinará el tipo de turbina a utilizar.

Tabla 13. Parámetros de evaluación para selección de turbina.

Parámetro	Descripción	Puntaje
Costo	Gasto monetario que implica su implementación.	1. Alto 2. Accesible 3. Económico
Disponibilidad en el mercado	Facilidad de adquisición.	1. No disponible 2. Bajo pedido 3. Accesible
Facilidad de construcción	Determina qué tan sencilla es la elaboración de esta y su construcción en base a requerimientos del cliente.	1. Alta complejidad 2. Media complejidad 3. Baja complejidad
Facilidad de operación	Sencillez en el manejo y operación de la máquina.	1. Alta complejidad 2. Media complejidad 3. Baja complejidad
Posicionamiento	Capacidad de la turbina para trabajar diferentes posiciones, ya sea vertical, horizontal o más.	1. Unidireccional 2. Bidireccional 3. Multidireccional
Capacidad de producción	Representa el aprovechamiento que la máquina realiza del recurso.	1. Bajo 2. Medio 3. Alto
Seguridad de uso	Identifica el riesgo que representa para el ser humano el funcionamiento de la turbina.	1. Nivel de riesgo alto 2. Nivel de riesgo medio 3. Nivel de riesgo bajo
Mantenimiento	Capacidad de preservar la máquina funcionando de forma continua y adecuada.	1. Alto costo 2. Costo moderado 3. Económico
Vida útil	Tiempo de vida que posee la turbina desde que empieza a funcionar.	1. Poca vida útil 2. Vida útil promedio 3. Larga vida útil

En la tabla 14 se realiza un análisis comparativo de parámetros mencionados anteriormente de acuerdo con las características que cada tipo de turbina posee. Para la comparativa se trabaja con las turbinas tipo Michell-Banki, Kaplan y de flujo axial como se menciona anteriormente, sin embargo, en el caso de la turbina de flujo axial se hace uso de una turbina anfibia la cual se adapta al sistema según recomendación de proveedores.

Tabla 14. Selección de turbina mediante calificación de parámetros.

Parámetro	Alternativa 1 Michell-Banki	Alternativa 2 Kaplan	Alternativa 3 Flujo Axial (Anfibia)
Costo	3	1	3
Disponibilidad en el mercado	1	2	3
Facilidad de construcción	3	1	2
Facilidad de operación	3	1	3
Posicionamiento	1	1	3
Capacidad de producción	2	3	2
Seguridad de uso	3	1	3
Mantenimiento	2	1	2
Vida útil	2	2	2
TOTAL	20	13	23

En base a la calificación mostrada, se realiza la selección del tipo de turbina a utilizar en el sistema. Como se puede visualizar en la tabla 14, el tipo de turbina conveniente para el diseño es una turbina de flujo axial tipo anfibia la cuál puede trabajar tanto al aire libre como bajo el agua según las especificaciones que posee y como gran ventaja puede posicionarse de cualquier forma ya sea vertical, horizontal o diagonal mediante cambio en la calibración. En la tabla 15, se muestra los rangos de operación bajo los que trabaja la turbina tipo anfibia de flujo axial.

Tabla 15. Rangos de operación de turbina de flujo axial tipo anfibia.

Rangos de operación	
Altura neta [m]	2 a 20
Caudal [m ³ /s]	0.1 a 15
Eficiencia η	0.90
Potencia [kW]	1 a 5000

3.18 Costos

En la tabla 16 se puede observar principalmente el valor de la turbina axial que fue seleccionada para la generación de energía la cual tiene un valor de 20000 \$, cabe recalcar que la turbomáquina consta con el generador y un tablero de control. Además, se encuentra el costo de varios ítems necesarios para la construcción del sistema como lo más importante que es la captación la cual se realiza con cemento y hormigón.

Tabla 16. Costos generales del sistema.

Nombre	P. Unitario \$	Cantidad	Costo \$
Válvula mural 300 x 300 mm	2063.51	1	2063.51
Válvula de compuerta 150 mm	316.00	1	316.00
Hormigón f'c = 210 kg/cm ² (m ³)	81.38	9.56	777.99
Turbina Axial Anfibia	20000.00	1	20000.00
		Total	23157.50

En vista de que existen tres diferentes propuestas de diseño, inicialmente se realiza una cotización para identificar los precios de la tubería en polietileno para un diámetro de 630 mm el dónde el valor por cada metro tiene un costo de 316.10 \$ como se puede observar en la tabla 17, donde de acuerdo con la longitud de 1140 m de tubería nos da un total 360354.14 \$ basado en la cotización mostrada en el anexo 2, adicional se determina el uso de 22 codos los cual nos da un valor aproximado para el total de codos de 33578.16 \$ en este material de diseño.

Tabla 17. Costos de tubería para 630 mm de diámetro

Nombre	P. Unitario (\$)	Cantidad	P. Total (\$)
Polietileno SDR26 DN630 (1 m longitud)	316.10	1140	360354.14
Codo 45° de polietileno D 630 mm	1526.28	22	33578.16
Válvula de mariposa 600 mm	6301.03	2	12602.06
Costos generales	23157.50	1	23157.50
		TOTAL	429691.86

Se realiza una segunda evaluación de costos en la cual se trabaja con una tubería de polietileno HDPE PE100 con un DN500 y SDR26 el cual presenta un precio por metro lineal de 199.23 \$, los precios de todo el sistema diseñado para esta alternativa se detallan en la tabla 18.

Tabla 18. Costos de tubería para 500 mm de diámetro en HDPE.

Nombre	P. Unitario (\$)	Cantidad	P. Total (\$)
Polietileno SDR26 DN500 (1 m longitud)	199.23	1140	227123.99
Codo 45° de polietileno DN500 mm	842.04	22	18524.88
Válvula de mariposa 500 mm	6462.32	2	12924.64
Costos generales	23157.50	1	23157.50
		TOTAL	281731.01

Por último, se evalúa costos de la tercera alternativa de diseño en donde se utiliza un diámetro de 315 mm, como se puede observar en la tabla 19. Cabe recalcar que esta alternativa trabaja con los valores mínimos admisibles de una turbina, sin embargo, cumple con los requerimientos a un costo menor que las primeras propuestas.

Tabla 19. Costos de tubería para 315 mm de diámetro en PVC.

Nombre	P. Unitario (\$)	Cantidad	P. Total (\$)
PVC para presión DN315 1 MPa (6 m)	487	190	92530.00
Codo PVC 45° a presión	67.60	22	1487.00
Válvula de mariposa 300 mm	2058.67	2	4117.34
Costos generales	23157.50	1	23157.50
		TOTAL	121291.84

3.19 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se determina las dimensiones que poseerá el sistema en base a un estudio topográfico, los parámetros analizados definen la eficiencia del sistema hidroeléctrico para cada una de las alternativas propuestas. El sistema está diseñado con una longitud de 1140 m de tubería de presión, esta medida se toma desde el tanque de carga hasta el punto de conexión con la turbina, se encuentra compuesto por un canal abierto rectangular que desvía el agua del río hacia el sistema, un desarenador el cual retiene las partículas que pueden causar daños, un tanque de carga seguido de la tubería de presión, una turbina conectada a un generador y un transformador.

De acuerdo con el análisis realizado es importante tomar en cuenta ciertas condiciones como la velocidad del fluido que debe existir en el conducto ya que en base a este se realizó el dimensionamiento de esta y los cálculos de pérdidas existentes en las diferentes alternativas de diseño. Al examinar distintas opciones de trabajo, se determina la posibilidad de variar el caudal teniendo así la reducción del diámetro y costos.

Mediante los parámetros de caudal utilizado para las tres propuestas con magnitudes de 0.5, 0.3 y 0.13 m^3/s se obtiene alturas netas de 15.10, 14.41 y 10.06 m respectivamente. Con los datos mencionados se determina a través de la figura 16 y las puntuaciones mostradas en tabla 14 el tipo de turbina adecuado para el sistema, siendo esta una turbina de flujo axial, sin embargo, es posible optar por alternativas como son las turbinas tipo Kaplan o Michell-Banki.

Los datos resultantes muestran que para cada alternativa propuesta los valores de producción que poseerá la central como se visualiza en la tabla 12 se ven afectados a causa de la disminución de caudal y diámetros de tubería lo que implica decidir entre una opción de menor costo de implementación o de mayor capacidad.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE TUBERÍAS Y TURBINA DEL SISTEMA HIDROELÉCTRICO

El capítulo 4 está enfocado en los resultados computacionales obtenidos mediante la simulación numérica del sistema hidroeléctrico diseñado en base a la topología de la zona en la que se implementa. El sistema de tuberías simulado presenta las dimensiones definidas en el capítulo 3, por lo tanto, el análisis computacional permitirá verificar los valores de velocidad con los que trabajará el sistema en relación con el diámetro, longitud y pérdidas de energía de la tubería.

4.1 Geometría del sistema hidroeléctrico

La geometría del sistema hidroeléctrico es determinada a través de distintos análisis, principalmente de un estudio topográfico e hidrológico a través de los cuales se determina el perfil hidráulico generando así la ruta de la tubería a partir del punto de captación hacia la turbina, al igual que la altura desde los mismos puntos. Por lo tanto, se obtiene datos como la altura bruta del sistema con un valor de 20 m y una longitud de tubería de 1140 m.

4.2 Diseño del sistema hidroeléctrico

Su diseño se realiza a partir de cálculos que determinan el dimensionamiento de la toma de agua para la cual se realiza un diseño de canal abierto rectangular de 20 m de longitud, 0.52 m de alto y 0.72 m de ancho, seguido por un desarenador convencional de 5 m de largo y por último 2 m de canal abierto de las mismas dimensiones mencionadas anteriormente. El tanque de carga consta de una profundidad de 1.23 m, 5 m de largo, una amplitud de 1.25 m y cada pared con un grosor de 0.15 m.

Para el modelado del sistema de captación, desarenador y tanque de carga se hace uso del software CAD SolidWorks para realizar una representación en 3D de lo que es la toma de agua como se muestra en la figura 17. Para la simulación del sistema de tuberías y la turbina axial seleccionada anteriormente se utiliza el software de simulación ANSYS Fluent debido a que los instrumentos que ofrece el apartado Fluid Flow Fluent son las necesarias para visualizar el contacto entre la turbina y el fluido.

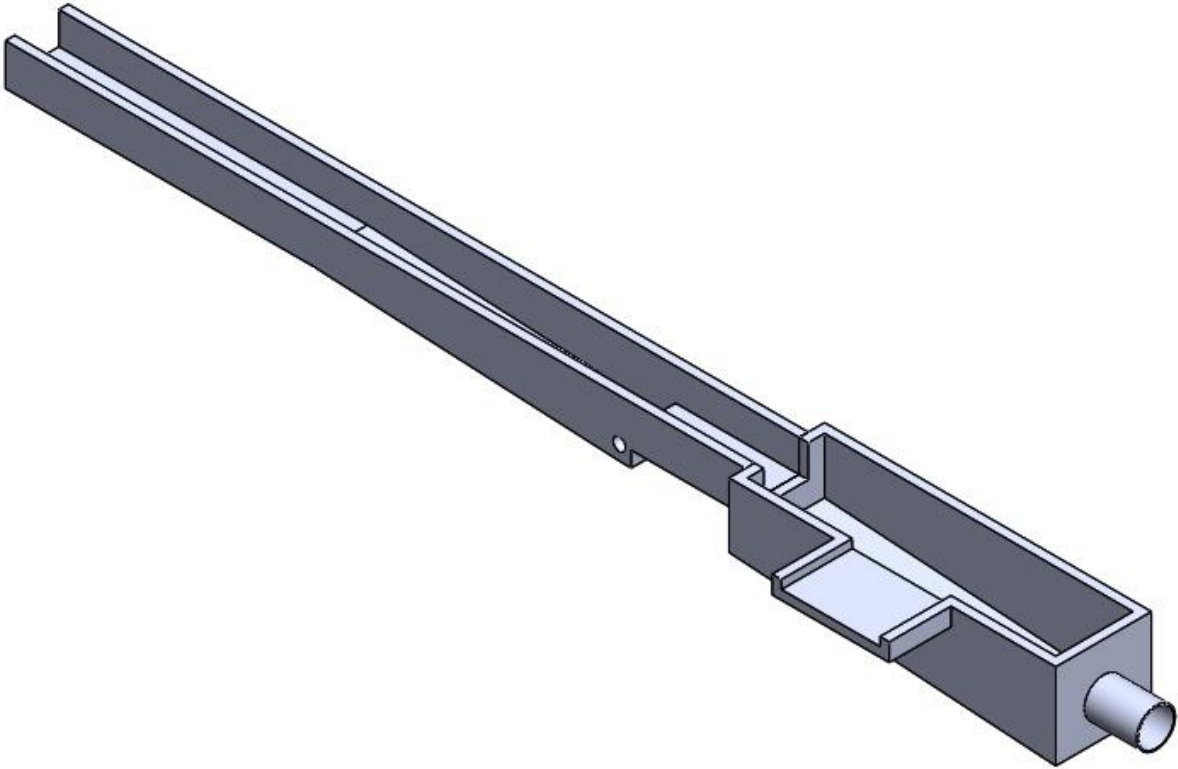


Figura 17. Representación 3D de la captación previo a la tubería.

4.3 Modelos de análisis numéricos utilizados

Al hacer uso de softwares dedicados al análisis numérico es necesario tener presente que dichos programas hacen uso de modelos matemáticos diseñados para cada caso en particular, por lo tanto, es importante considerar el tipo de modelo que aplica el software. A continuación, se especifican las ecuaciones que utilizan los diferentes modelos con los que trabaja el software ANSYS en la simulación.

4.3.1 Ecuación RNG k-ε

La ecuación que presenta este modelo se basa en la energía cinética presente debido a la turbulencia causada por los picos de velocidad que existen. La generación producida por dicha energía cinética está presente debido a efectos de flotabilidad sobre la turbulencia.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (42)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (43)$$

4.3.2 Ecuaciones de conservación de energía

Las ecuaciones de conservación de energía son conocidas también como ecuación de continuidad, esta es utilizada tanto para fluidos de tipo compresible al igual que para fluidos incompresibles describen a continuación.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (44)$$

Sin embargo, para ciertas geometrías la ecuación requiere de coordenadas y velocidades tanto radiales como axiales y está descrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial X}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (45)$$

4.3.3 Ecuación de conservación del momento

Para la conservación del momento se utiliza la siguiente ecuación la cual hace uso de la presión estática y las fuerzas tanto gravitacionales de los cuerpos como también fuerzas externas que están presentes en la interacción.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (46)$$

En caso de simulaciones en dos dimensiones el software aplica ecuaciones para conservación de momento tanto axial como radial definidas como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial X}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial X}(r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial X} + F_x \quad (47)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial X}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + F_r \quad (48)$$

- Pérdida menor total

La ecuación que describe la conservación de la energía en el flujo se define como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (49)$$

4.4 Mallado del diseño

Mediante el software ANSYS fluent se realiza un análisis numérico basado en la definir la velocidad de flujo en la tubería y el ingreso a la turbina el cual se compara con el cálculo teórico con la finalidad de verificar los resultados. A continuación, se muestra el mallado de una sección de la tubería y la turbina.

4.4.1 Mallado de tubería

El mallado de la tubería que se visualiza en la figura 18 pertenece a una sección de la tubería previo al ingreso de la turbina. El mallado se realiza con un método de dimensionamiento de la malla (sizing) con un valor de 150 mm tomando en cuenta que el tamaño de la geometría es extenso.

Anslys
2021 R2
STUDENT

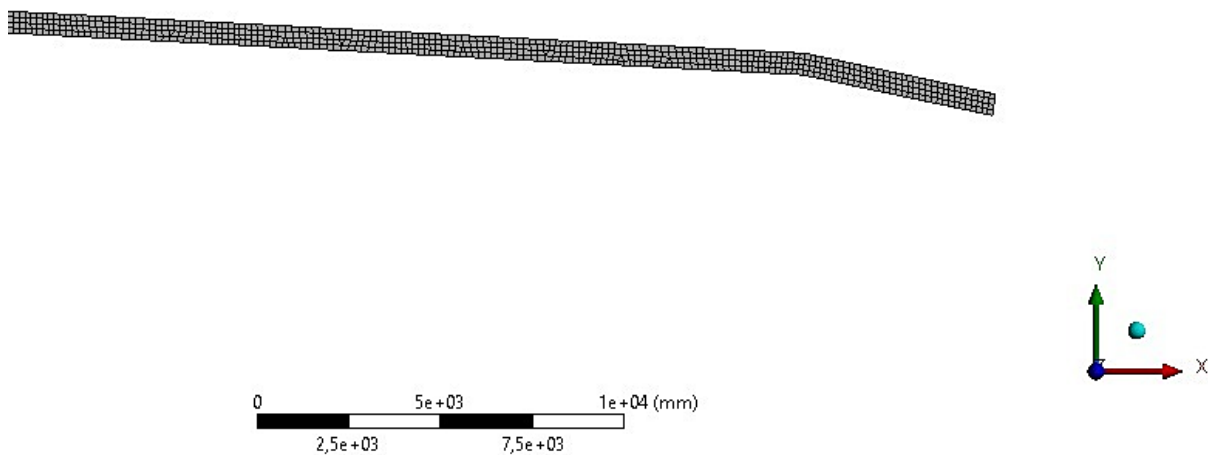


Figura 18. Mallado de la sección final de la tubería.

En la figura 19 se puede observar las variaciones obtenidas en la convergencia de malla Skewness la cual muestra la mayoría de sus valores entre 0 y 0.25 para un adecuado refinamiento del mallado obteniendo el valor promedio de 0.0927.

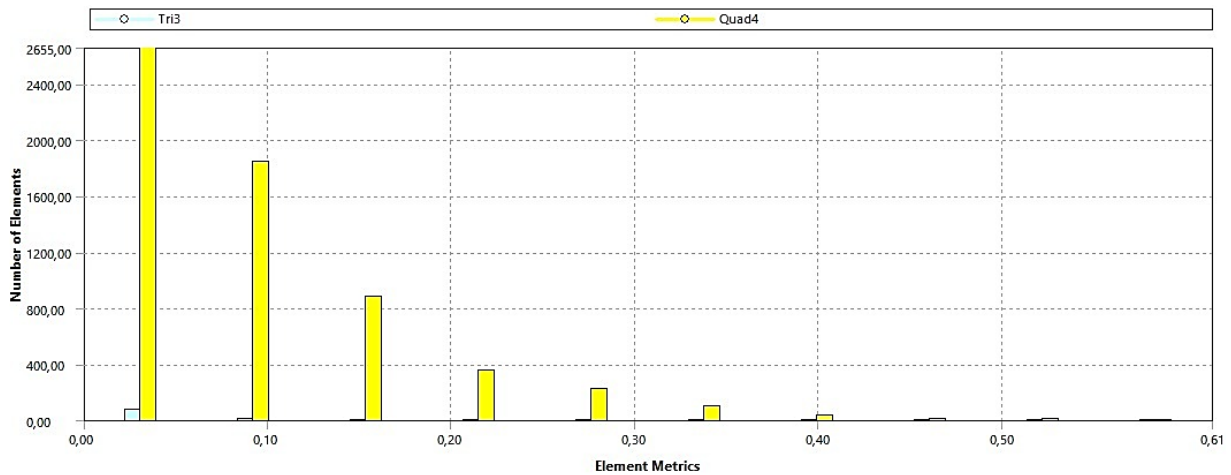


Figura 19. Convergencia de malla para la tubería con la herramienta Skewness.

De igual manera, el refinamiento del mallado realizado mediante la herramienta Element Quality presenta variaciones cercanas a 1.00 lo que indica una convergencia de malla deseable tal como se indica en la figura 20 en la cual se obtiene un promedio de 0.9845.

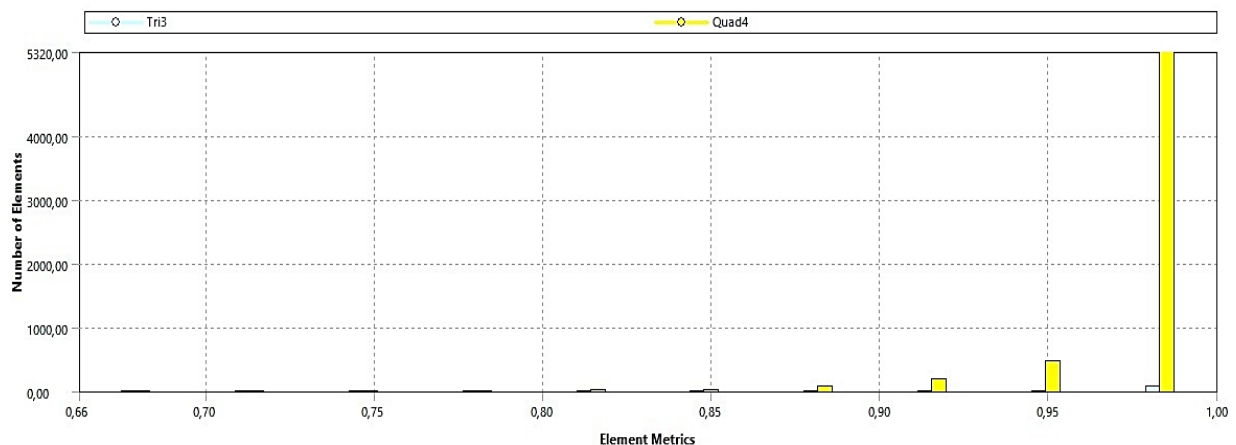


Figura 20. Convergencia de malla de la tubería con herramienta Element Quality

En la figura 21 se puede identificar el resultado de la velocidad de flujo que se obtiene a partir de la simulación de la sección de la tubería en la cual se tiene un resultado de 1.841 m/s, dicho valor es el que se utiliza para realizar la simulación de la turbina. Este valor permite verificar la velocidad de flujo calculada en el capítulo 3, a pesar de que existe una leve diferencia entre estos valores el error porcentual es de 2.13 %.

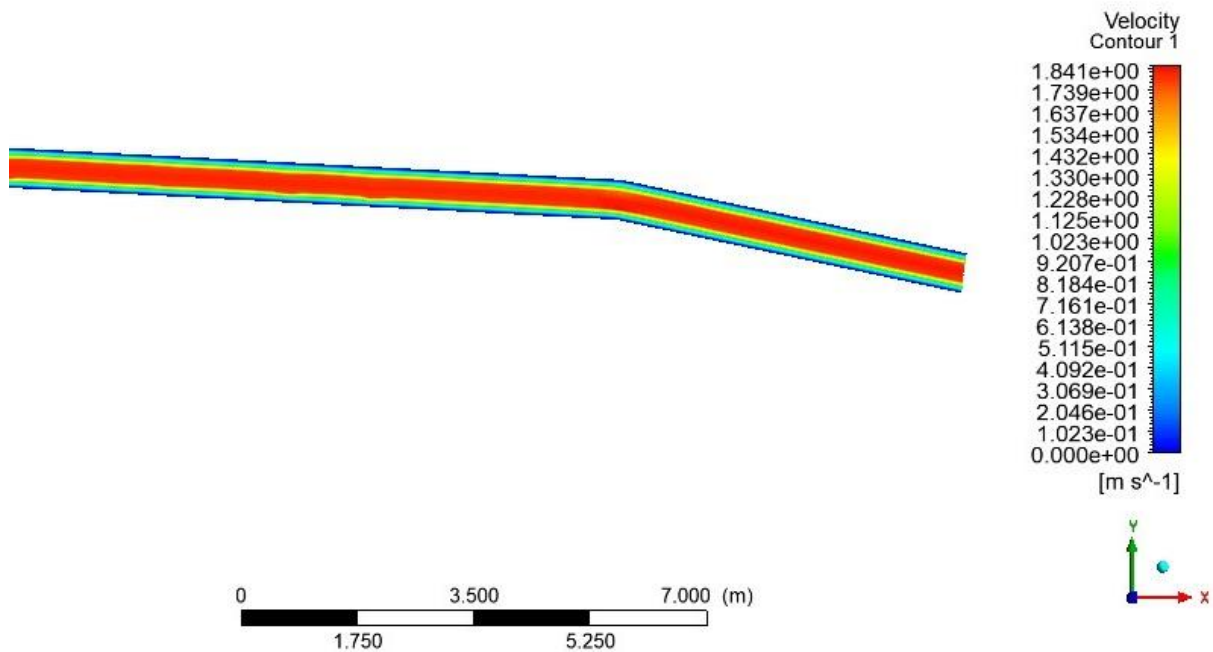


Figura 21. Velocidad del flujo al final de la tubería mediante ANSYS.

4.4.2 Mallado de tubería

El mallado de la turbina que se visualiza en la figura 22 pertenece a la unión entre la última sección de la tubería y el ingreso a la turbina.

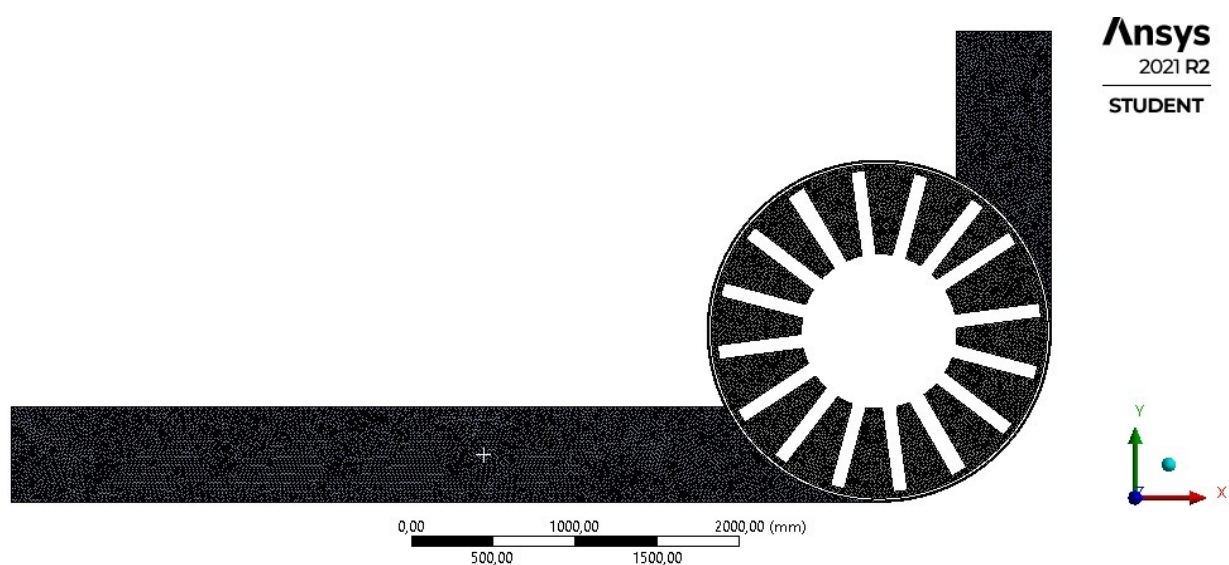


Figura 22. Mallado de la unión entre la tubería y turbina.

Para el diseño de la malla se utiliza el método Automatic Method el cual utiliza un mallado triangular con un dimensionamiento de 20 mm para los elementos de la malla. En la figura 23 se puede visualizar las variaciones obtenidas en la convergencia de malla por medio de la herramienta Skewness la cual muestra la mayoría de sus valores entre 0 y 0.25 para un adecuado refinamiento del mallado obteniendo el valor promedio de 0.1176.

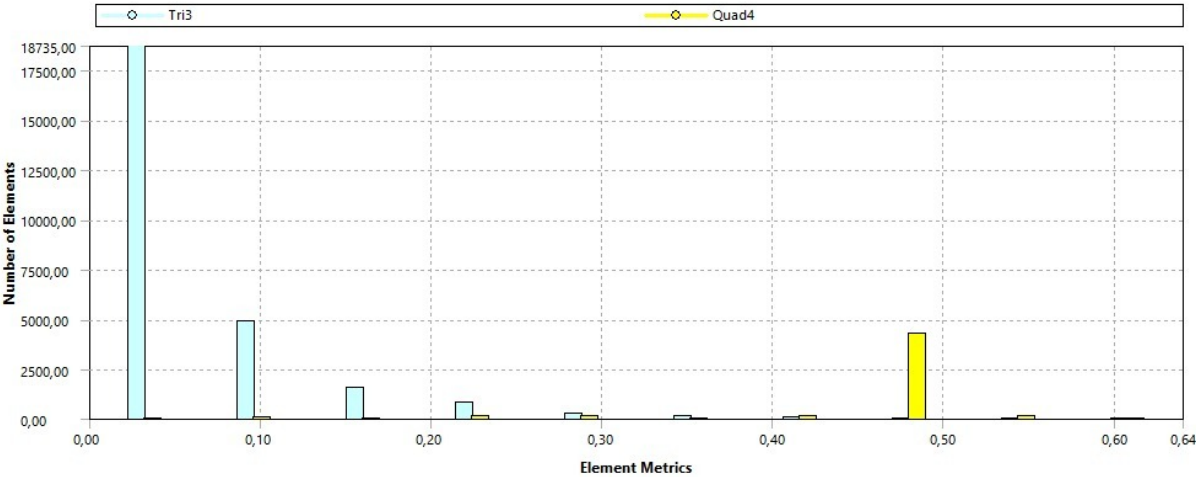


Figura 23. Convergencia de malla para turbina mediante herramienta Skewness.

De igual manera, el refinamiento del mallado realizado mediante la herramienta Element Quality presenta variaciones cercanas a 1.00 lo que indica una convergencia de malla deseable tal como se observa en la figura 24 en la cual se obtiene un promedio de 0.989.

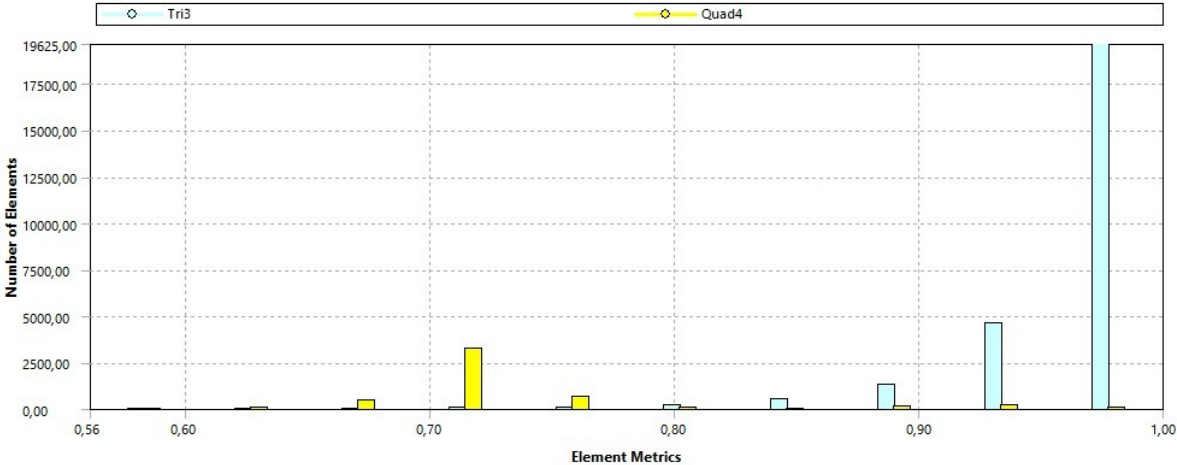


Figura 24. Convergencia de malla para turbina con herramienta Element Quality.

En la Figura 25 se visualiza el resultado de la velocidad de flujo que se obtiene a partir de la simulación de la turbina en la cual se tiene un valor de velocidad mayor a la de ingreso.

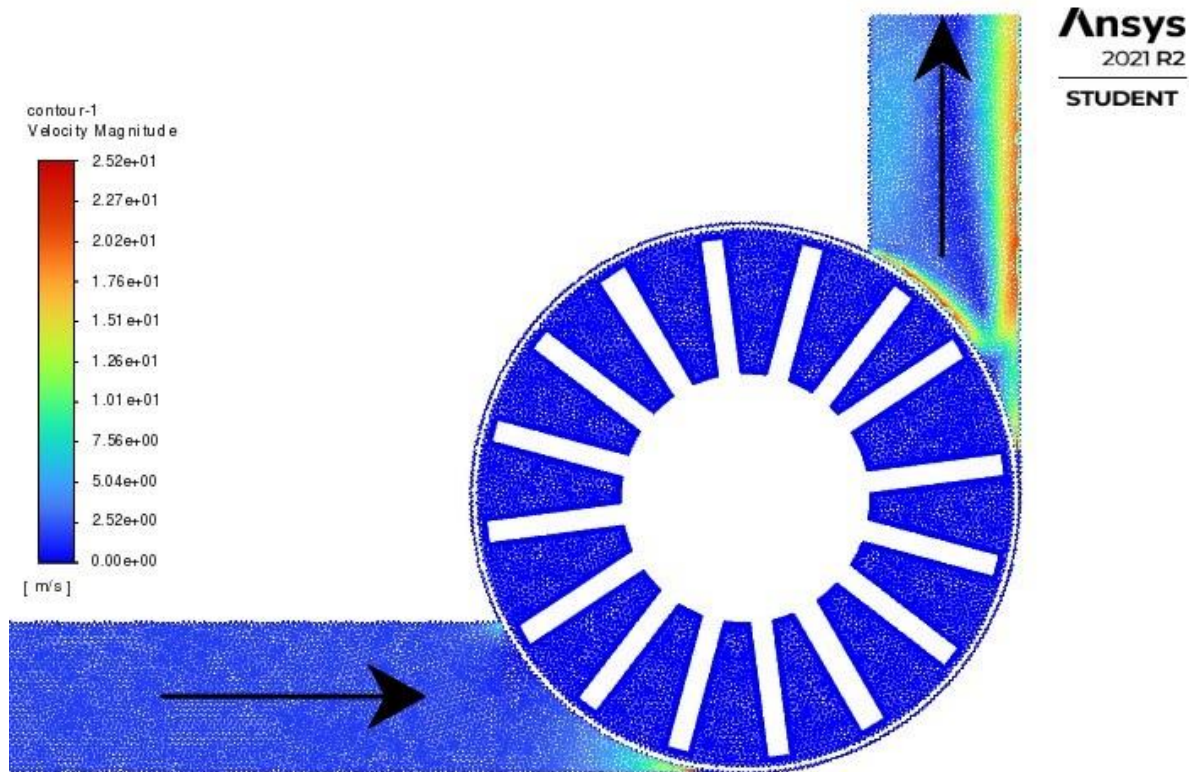


Figura 25. Simulación de la turbina mediante ANSYS.

4.5 Conclusiones del capítulo

La simulación mostrada en el capítulo 4 permite verificar los resultados obtenidos en el capítulo 3 debido a que los parámetros ingresados en la simulación parten del diseño del sistema presentado y los resultados obtenidos de la simulación coinciden con los datos calculados teóricamente. Cabe recalcar que el mallado presenta un correcto refinamiento y calidad gracias a los valores obtenidos de convergencia de malla presentados mediante las herramientas skewness y orthogonal quality.

El parámetro de mayor importancia para la verificación de las simulaciones es la velocidad la cual tiene valores muy cercanos al calculado, resultando en un valor de 1.88 m/s teóricamente y un valor de 1.84 m/s en la simulación que presenta la conexión entre tubería y turbina.

CONCLUSIONES GENERALES

- Mediante el anexo 1 se muestra el requerimiento preliminar que posee la empresa, dicho valor fluctúa en un intervalo de 300 a 350 kWh/mes, sin embargo, la empresa plantea un nuevo requerimiento que se basa en la futura ampliación de su planta de producción la cual se espera que sea cinco veces más grande, y a su vez su producción se quintuple al igual que su consumo energético llegando a un valor pico aproximado de 1750 kW. Se estima estos valores en base al consumo que ha presentado en el año 2020 y 2021.
- Teniendo en cuenta los requerimientos presentados y las condiciones que presenta el recurso hidrológico, se ha propuesto en base al máximo caudal extraíble tres diferentes alternativas de diseño de la tubería de presión con una longitud de 1140 m desde la toma de agua hasta el punto de conexión con la turbina. La propuesta principal se ha diseñado para un valor de caudal de 0.5 m³/s, la tubería de presión resultante mantiene un diámetro nominal de 630 mm SDR26 constituida en polietileno de alta densidad PE100 a causa de que no se fabrican tuberías en PVC para este diámetro nominal, resultando una altura neta de 15.10 m y una producción mensual de 42.32 MWh/mes. La segunda alternativa utiliza un caudal de 0.30 m³/s, como resultado se obtiene un diámetro nominal de 500 mm SDR 26 diseñada en polietileno de alta densidad con un espesor de 19.1 mm, el diseño opera con una altura neta de 14.41 m generando una producción mensual de 24.23 MWh/mes. La tercera propuesta está diseñada para un caudal de 0.13 m³/s, dando como resultado una tubería de 315 mm de diámetro nominal y un espesor de 12.1 mm propuesto en PVC de presión, este diseño trabaja con una altura neta de 10.06 m logrando una producción mensual de 7.326 MWh/mes.
- La simulación realizada se presenta mediante el software especializado ANSYS y su herramienta computacional Fluent, los resultados determinaron que la velocidad de salida de la tubería e ingreso a la turbina comparados con el valor teórico calculado posee un error porcentual de 2.13 % demostrando que los valores de velocidad con los que trabaja el sistema son correctos y a su vez adecuados en base a las recomendaciones de los proveedores los cuales detallan un valor de velocidad de flujo máximo de 2 m/s para tuberías de plástico, evitando así daños en el sistema de presión.

- El presupuesto requerido para la implementación del sistema hidroeléctrico depende específicamente del tipo de tubería de presión y los accesorios que este lleva, se ve demostrado en las tablas de costos que se presentan en el capítulo 3, dichos valores fluctúan directamente a causa del precio que tiene el material y las dimensiones del tubo, sin embargo, en caso de que la energía producida por la central pueda ser almacenada y vendida a los sectores aledaños, se presentarán ganancias a largo plazo y una inversión factible para la empresa tomando en cuenta que dicha producción depende directamente de los parámetros con los que se diseñó el sistema.

RECOMENDACIONES GENERALES

- Previo a la selección de la turbina y diseño del sistema de tuberías es necesario realizar los estudios establecidos para la puesta en marcha de proyectos de esta índole. Entre los estudios de mayor importancia se detallan están el estudio topográfico el cual define los parámetros mediante los cuales operará el sistema de tuberías y se definirá los puntos de referencia geográficos, estudio hidrológico el cual detallará las condiciones del recurso hídrico, este permite el diseño de ciertos elementos como el desarenador el cual requiere para su diseño el tamaño de las partículas que circulan a través del cauce. Por último, es importante realizar un estudio de factibilidad y un estudio medioambiental los cuales definen si es rentable la implementación del sistema o si es viable medioambientalmente.
- Se recomienda tomar en cuenta la altura de trabajo del sistema de tubería de presión presentado basado en el perfil hidráulico mostrado en el plano que contiene el perfil hidráulico y topografía del sector. La tubería se encuentra bajo tierra debido a que el sistema hidroeléctrico se implementará en un sector agrícola y ganadero, por lo tanto, existe riesgo de daño en la tubería por el hecho de ser en PVC o polietileno, de este modo es posible brindar seguridad al sistema.

LISTA DE REFERENCIAS

- [1] C. Quinaluisa, K. Peralta, A. Solano, A. Gallo, Á. Villalba, and F. Zambrano, “Energía hídrica en el Ecuador,” no. 2017, 2019.
- [2] J. León, “Recursos potenciales de energía renovable en el estado de Sinaloa, México,” Atlantic International University, 2014.
- [3] C. Espejo and R. García, “Agua y energía: Producción hidroeléctrica en España,” vol. 51, pp. 107–129, 2010.
- [4] G. Kahraman and Y. Taşgın, “Research of thermal performance by metallographic investigation of stator winding solder region in hydroelectric power plants,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 97, no. August 2018, pp. 311–321, 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.01.039.
- [5] Ingfocol Ltda, “Hidroenergía,” in *Potencial Hidroenergético de Colombia*, 2015, pp. 25–36.
- [6] H. Rojas, E. Duque, and Y. García, “Contexto actual del sector hidroeléctrico ecuatoriano: Análisis de proyectos emblemáticos,” *Rev. UTPL*, pp. 1–7, 2017.
- [7] W. Guastay, “El uso de la energía hidráulica para la generación de energía eléctrica como estrategia para el desarrollo industrial en el Ecuador,” Universidad Internacional SEK, 2020.
- [8] A. C. Avilés, “Generación Hidroeléctrica en el Ecuador: Posibles Beneficios en los Mercados de Carbono,” pp. 141–167, 2010.
- [9] G. Marturet, “Simulación fluidodinámica de un modelo de turbina hidrocínética tipo Gorlov,” Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre, 2012.
- [10] Y. Chen, W. Ding, and R. Bian, “Performance studies on cavitation-resistance turbine flow sensor based on experiment and CFD simulation,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 79, 2021, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101918.
- [11] F. Sierra, A. Sierra, and C. Guerrero, “Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas:

- alternativa real de generación eléctrica,” *Rev. SENA*, vol. 75, pp. 8–11, 2011, doi: 10.23850/22565035.22.
- [12] E. Soria, “Energía hidráulica,” *Revista*, vol. I, p. 20, 2010.
- [13] F. Pérez, “Abastecimiento de aguas - Tema 2: Captacion de aguas superficiales,” in *Abastecimiento De Aguas*, 2011, p. 66.
- [14] J. Jiménez, *Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario*. 2013.
- [15] A. Nava Mastache and H. García Gutiérrez, *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*, Primera Ed. Mexico D.F., 2014.
- [16] S. Morales, L. Corredor, J. Paba, and L. Pacheco, “Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementacion,” *Dyna*, vol. 81, no. 184, pp. 178–185, 2014.
- [17] J. A. Carta, R. Calero, A. Colmenar, and M.-A. Castro, *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. 2009.
- [18] J. Maldonado, “Análisis matemático y simulación numérica del comportamiento de fluidos en un caldero pirotubular vertical,” 2018.
- [19] P. Valdez, R. Tula, M. Pelissero, and A. Haim, “Simulaciones de fluidos con CFD aplicadas a interpretar el aprovechamiento de la energía renovable oceánica,” *TRIM Rev. Investig. Multidiscip.*, vol. 2, no. 9, pp. 5–21, 2015.
- [20] L. F. Jara, “Influencia de la sobrevelocidad en las sobrepresiones de los sistemas hidráulicos de las centrales hidroeléctricas equipadas con turbinas Francis,” Escuela Politécnica Nacional, 2016.
- [21] C. Mataix, *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*, Segunda Ed. Madrid: EDICIONES DEL CASTILLO, S. A., 1986.
- [22] A. Castro, *Minicentrales hidroeléctricas*. Madrid, 2006.

- [23] C. E. Díaz Gutiérrez, J. A. Segovia de los Ríos, M. P. Garduño Gaffare, and S. Tejeda Vega, “Medición de caudales mediante la implementación de un vehículo acuático teleoperado,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 28, no. 1, pp. 73–91, 2012.
- [24] J. Herrera and E. Peña, *Instructivo para aforo con molinete*, 2da ed. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1999.
- [25] A. Kennedy, F. Fragoza, E. Peña, and J. Moreno, *Manual de aforos*, Primera. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1992.
- [26] W. King, E. Brater, J. Lindell, and C. Wei, *Handbook of Hydraulics*, Séptima. McGraw-Hill, 1976.
- [27] A. Valencia, *Manual Piragüero Medición de Caudal, Programa Integral-Red Agua*, vol. 3. Medellín - Colombia, 2014.
- [28] Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego (DGIAR), *Manual N° 5 Medición de agua*, vol. 2da Ed. Lima - Perú: Ministerio de Agricultura y Riego, 2015.
- [29] E. Alvarado, *Manual de Medición de Caudales*. 2017.
- [30] D. Ortega-Gaucin, *Hidrometría Básica Aplicada a la Operación de Distritos y Unidades de Riego*, Primera. Nuevo León - México: Instituto del agua del estado de Nuevo León, 2012.
- [31] R. Vélez, “Factibilidad de sistemas de micro y mini hidroeléctricas comunitarias rurales en el azuay,” Universidad de Cuenca, 2013.
- [32] B. Herencia and C. Carrera, “Estimación caudales medios y máximos de la cuenca del río Checras mediante ecuaciones sintéticas y racionales,” *Rev. del Inst. Investig. la Fac. minas, Metal. y ciencias geográficas*, vol. 22, no. 44, pp. 15–24, 2019, doi: 10.15381/iigeo.v22i44.17282.
- [33] W. Sandoval and E. Aguilera, “Determinación de Caudales en cuencas con poco información Hidrológica,” *Cienc. Unemi*, vol. 7, no. 12, pp. 100–110, 2015, doi: 10.29076/issn.2528-7737vol7iss12.2014pp100-110p.

- [34] Comisión Nacional de Riego, *Manual de diseño de proyectos microhidroeléctricos en obras de riego*. Santiago, 2020.
- [35] G. Iturain, “Estudio de viabilidad de minicentral hidroeléctrica en el embalse de Urrunaga en Legutio (Álava),” Universidad Politécnica de Valencia, 2017.
- [36] European Small Hydropower Association - ESHA, *Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica*. SHERPA, 2006.
- [37] Observatorio de energías renovables, “Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) en Uruguay,” p. 38, 2010.
- [38] M. Polo Encinas, *Turbomáquinas hidráulicas: Principios fundamentales*, Primera. México D.F.: EDITORIAL LIMUSA, S.A., 1976.
- [39] F. Coz *et al.*, *Manual De Mini Y Microcentrales Hidráulicas*. Lima: Intermediate Technology Development Group, ITDG - PERÚ, 1995.
- [40] O. Mallitásig and L. Tapia, “Modelación y diseño digital para micro centrales de generación hidroeléctrica,” *Jornadas Ing. Eléctrica y Electrónica*, 2009.
- [41] B. Zamora and A. Viedma, *Máquinas Hidráulicas Teoría y Problemas*, Primera. Cartagena: CRAI, 2016.
- [42] I. Fernández and A. Robles, “Centrales Hidráulicas,” in *Centrales de Generación de Energía Eléctrica*, Cantabria - España, 2012, p. 116.
- [43] Y. Cengel and J. Cimbala, “Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones,” *Mc Graw Hill*, vol. 1, no. 9, p. 997, 2006.
- [44] R. Mott, *Mecánica de fluidos*, Sexta. Mexico D.F.: Pearson, 2006.
- [45] G. Sotelo, *Hidraulica general Volumen 1- Fundamentos*, vol. 53, no. 9. 1994.
- [46] F. White, *Mecanica de fluidos 5ta E.*, Quinta. McGraw-Hill, 2006.
- [47] CRANE, *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw-Hill, 1993.

- [48] V. Streeter, B. Wylie, and K. Bedford, *Mecánica de los Fluidos*, Novena Ed. Bogotá D.C., 2000.
- [49] M. Potter, D. Wiggert, and B. Ramadan, *Mecanica de fluidos*, Cuarta. 2015.
- [50] P. Gallardo, *Diseño de canales abiertos*, Primera Ed. Alicante, 2018.
- [51] M. Cárdenas Quintero and R. V. Marbello, “Ecuaciones de diseño de cunetas recomendadas en el Manual de Drenaje para Carreteras , empleando la ecuación de Manning y la ecuación de Darcy & Weisbach - Colebrook & White,” 2011.
- [52] H. Castellanos, C. Collazos, J. Farfan, and F. Meléndez-Pertuz, “Diseño y construcción de un canal hidráulico de pendiente variable,” *Inf. Technol.*, vol. 28, no. 6, pp. 103–114, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000600012.
- [53] CAMICON, “Revista de la cámara de la industria de la construcción.” Quito - Ecuador, 2016, [Online]. Available: www.camicon.ec.
- [54] Dalpex Group, “Catálogo y lista de precios,” pp. 1–140, 2018.

ANEXOS

Anexo 1. Planilla de consumo de luz eléctrica de la empresa.

INFORMACION DEL CONSUMIDOR																																																											
Razón Social/Apellidos y Nombres: ORG. COMUNITARIA PERLA ANDINA QUINTICUSI		Código Unico Eléctrico Nacional: 0600183394																																																									
RUC o Cédula de Ciudadanía : 0591736892001																																																											
Dirección de Servicio: QUITICUSIG																																																											
Dirección de Notificación: QUITICUSIG																																																											
Correo Electrónico: Cliente NO registra correo electrónico																																																											
Provincia: COTOPAXI	Cantón: SIGCHOS	Parroquia: SIGCHOS	Geocódigo: 005-ISI-111-00305																																																								
Cliente: 149968	Cuenta: 183394	Medidor: 5831479	Tarifa: R -> Residencial																																																								
Lectura Anterior: 3,071 ~ 2021-10-01	Lectura Actual: 3,327 ~ 2021-10-31	Consumo en KWH.: 256	Días: 31																																																								
FACTURACION SERVICIO ELÉCTRICO Y ALUMBRADO PUBLICO																																																											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>CONCEPTO</th> <th>VALOR UNITARIO</th> <th>IMPUESTO</th> <th>VALOR TOTAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Consumo</td> <td style="text-align: right;">\$ 24.36</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.00</td> <td style="text-align: right;">\$ 24.36</td> </tr> <tr> <td>Comercializaci</td> <td style="text-align: right;">\$ 1.41</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.00</td> <td style="text-align: right;">\$ 1.41</td> </tr> <tr> <td>Tasa de Alumbrado Pblco</td> <td style="text-align: right;">\$ 4.74</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.00</td> <td style="text-align: right;">\$ 4.74</td> </tr> <tr> <td>Recargo por Recuperaci de Cartera</td> <td style="text-align: right;">\$ 5.37</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.64</td> <td style="text-align: right;">\$ 6.01</td> </tr> <tr> <td>Subsidio Solidario +</td> <td style="text-align: right;">\$ 2.58</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.00</td> <td style="text-align: right;">\$ 2.58</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">SUBTOTAL SERVICIO ELECTRICO (A):</td> <td style="text-align: right;">\$ 39.10</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">SUBTOTAL 12%</td> <td style="text-align: right;">\$ 5.37</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">SUBTOTAL 0%</td> <td style="text-align: right;">\$ 33.09</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">SUBTOTAL SIN IMPUESTOS</td> <td style="text-align: right;">\$ 38.46</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">IVA 12%</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.64</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">(A) SERVICIO ELECTRICO (FACTURA)</td> <td style="text-align: right;">\$ 39.10</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">(+C) VALORES PENDIENTES</td> <td style="text-align: right;">\$ 42.52</td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: right;">(D) TOTAL SERVICIO ELECTRICO</td> <td style="text-align: right;">\$ 81.62</td> </tr> </tbody> </table>				CONCEPTO	VALOR UNITARIO	IMPUESTO	VALOR TOTAL	Consumo	\$ 24.36	\$ 0.00	\$ 24.36	Comercializaci	\$ 1.41	\$ 0.00	\$ 1.41	Tasa de Alumbrado Pblco	\$ 4.74	\$ 0.00	\$ 4.74	Recargo por Recuperaci de Cartera	\$ 5.37	\$ 0.64	\$ 6.01	Subsidio Solidario +	\$ 2.58	\$ 0.00	\$ 2.58	SUBTOTAL SERVICIO ELECTRICO (A):			\$ 39.10	SUBTOTAL 12%			\$ 5.37	SUBTOTAL 0%			\$ 33.09	SUBTOTAL SIN IMPUESTOS			\$ 38.46	IVA 12%			\$ 0.64	(A) SERVICIO ELECTRICO (FACTURA)			\$ 39.10	(+C) VALORES PENDIENTES			\$ 42.52	(D) TOTAL SERVICIO ELECTRICO			\$ 81.62
CONCEPTO	VALOR UNITARIO	IMPUESTO	VALOR TOTAL																																																								
Consumo	\$ 24.36	\$ 0.00	\$ 24.36																																																								
Comercializaci	\$ 1.41	\$ 0.00	\$ 1.41																																																								
Tasa de Alumbrado Pblco	\$ 4.74	\$ 0.00	\$ 4.74																																																								
Recargo por Recuperaci de Cartera	\$ 5.37	\$ 0.64	\$ 6.01																																																								
Subsidio Solidario +	\$ 2.58	\$ 0.00	\$ 2.58																																																								
SUBTOTAL SERVICIO ELECTRICO (A):			\$ 39.10																																																								
SUBTOTAL 12%			\$ 5.37																																																								
SUBTOTAL 0%			\$ 33.09																																																								
SUBTOTAL SIN IMPUESTOS			\$ 38.46																																																								
IVA 12%			\$ 0.64																																																								
(A) SERVICIO ELECTRICO (FACTURA)			\$ 39.10																																																								
(+C) VALORES PENDIENTES			\$ 42.52																																																								
(D) TOTAL SERVICIO ELECTRICO			\$ 81.62																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">VALORES PENDIENTES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>MESES IMPAGOS</td> <td style="text-align: center;">1</td> </tr> <tr> <td>(C) VALOR ADEUDADO</td> <td style="text-align: right;">\$ 42.52</td> </tr> </tbody> </table> <p><small>* Valores a la Fecha de Emisión</small></p>		VALORES PENDIENTES		MESES IMPAGOS	1	(C) VALOR ADEUDADO	\$ 42.52																																																				
VALORES PENDIENTES																																																											
MESES IMPAGOS	1																																																										
(C) VALOR ADEUDADO	\$ 42.52																																																										
<p style="text-align: center;">HISTORICO DE CONSUMO MENSUAL</p>																																																											
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">*** SUBSIDIOS DEL GOBIERNO ***</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TARIFA DE LA DIGNIDAD</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.00</td> </tr> <tr> <td>COCCION ELECTRICA:</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.00</td> </tr> <tr> <td>CALENTAMIENTO DE AGUA:</td> <td style="text-align: right;">\$ 0.00</td> </tr> <tr> <td>SUBSIDIO TARIFA ELECTRICA:</td> <td style="text-align: right;">\$ 20.15</td> </tr> <tr> <td>TOTAL AHORRO:</td> <td style="text-align: right;">\$ 20.15</td> </tr> </tbody> </table>		*** SUBSIDIOS DEL GOBIERNO ***		TARIFA DE LA DIGNIDAD	\$ 0.00	COCCION ELECTRICA:	\$ 0.00	CALENTAMIENTO DE AGUA:	\$ 0.00	SUBSIDIO TARIFA ELECTRICA:	\$ 20.15	TOTAL AHORRO:	\$ 20.15																																												
*** SUBSIDIOS DEL GOBIERNO ***																																																											
TARIFA DE LA DIGNIDAD	\$ 0.00																																																										
COCCION ELECTRICA:	\$ 0.00																																																										
CALENTAMIENTO DE AGUA:	\$ 0.00																																																										
SUBSIDIO TARIFA ELECTRICA:	\$ 20.15																																																										
TOTAL AHORRO:	\$ 20.15																																																										

Anexo 2. Cotización para tubería DN630.

IWIAPRODUCTOS C.A.

ALBORADA 4TA ETAPA BLOQUES APARNOR 410 OFC 001 PB
 046047546 / 0988912293 RUC: 0992937440001
 opena@iwia.ec / oficina@iwia.ec
 SUAYAQUIL - ECUADOR



PROFORMA

No. 10002093

Cliente: **PERLA ANDINA**

Ced/RUC: 0591736892001

Fecha: **19/Ene/2022**

Dirección: S/N

Vendedor: VENDEDOR

Ciudad:

Código: 19K9

CODIGO	DESCRIPCION	CANTIDAD	P.V.P	PARCIAL
D630S26	TUBERIA PEAD DE 630MM SDR 26 PN 0.63 MPA	1,144.600	281.09800	321,744.77

Son: **TRECIENTOS SESENTA MIL TRECIENTOS CINCUENTA Y CUATRO 14/100 Dólares**

Nota: TIEMPO DE ENTREGA: 60/90 días luego confirmado el anticipo
 LUGAR DE ENTREGA: Bodegas del cliente (Sigchos- Ecuador)
 FORMA DE PAGO: 70% anticipo y saldo debe cancelarse cuando la tubería llegue al puerto, antes de sacar la mercadería de la aduana.
 VALIDEZ: 15 Días calendario.

Suman:	321,744.77
Subtotal:	321,744.77
+ IVA	38,609.37
+ Flete:	0.00
TOTAL	\$360,354.14

Anexo 3. Cotización por metro de tubería de polietileno DN500

Unidad	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
Materiales				
m	Tubo de polietileno PE 100, de color negro con bandas de color azul, de 500 mm de diámetro exterior y 29,6 mm de espesor, SDR17, PN=10 atm.	1,000	358,10	358,10
		Subtotal materiales:		358,10
Equipo y maquinaria				
h	Camión con grúa de hasta 6 t.	0,033	51,77	1,71
		Subtotal equipo y maquinaria:		1,71
Mano de obra				
h	Plomero.	0,135	8,40	1,13
h	Ayudante plomero.	0,135	5,23	0,71
		Subtotal mano de obra:		1,84
Herramienta menor				
%	Herramienta menor	2,000	361,65	7,23
Cargos de mantenimiento decenal: \$ 18.44 en los primeros 10 años.		Costos directos (1+2+3+4):		368,88

Anexo 4. Catálogo de costos para tubería PVC de diferentes denominaciones [53].

TUB u-PVC EC 225mm X 6m 0,63MPa(91psi)	6 m	161.00	P41
TUB u-PVC EC 225mm X 6m 0,80MPa(116psi)	6 m	195.00	P41
TUB u-PVC UZ 50mm X 6m 1,25MPa(181psi)	6 m	18.06	P41
TUB u-PVC UZ 63mm X 6m 1,25MPa(181psi)	6 m	24.15	P41
TUB u-PVC UZ 75mm X 6m 1,25MPa(181psi)	6 m	35.70	P41
TUB u-PVC UZ 90mm X 6m 1,25MPa(181psi)	6 m	46.75	P41
TUB u-PVC UZ 110mm X 6m 1,25MPa(181psi)	6 m	68.61	P41
TUB u-PVC UZ 315mm X 6m 1,00MPa(145psi)	6 m	487.00	P41

Anexo 5. Precio de accesorios de polietileno [54].



PE 100 SDR 11 CODOS 45°

Referencia	Ø Ext.	€/Ud
089280045160	280	178,97
089315045160	315	244,55
089355045160	355	320,94
089400045160	400	421,83
089450045160	450	564,05
089500045160	500	744,94
089560045160	560	995,59
089630045160	630	1.334,56

Anexo 6. Precio de válvulas de compuerta [54].

Referencia	DN	€/Ud
666150016029	150	1.667,15
666200016029	200	1.785,87
666250016029	250	2.048,59
666300016029	300	2.359,57
666350016029	350	3.144,76
666400016029	400	3.620,25
666450016029	450	5.191,66
666500016029	500	5.717,10
666600016029	600	8.666,60
666700016029	700	11.058,74
666800016029	800	15.352,34
666900016029	900	22.114,89
666100016029	1000	26.499,31



Anexo 7. Precios de válvulas para canal abierto [54].

Válvula mural

Para encastrar en muro, con obturador
 Apertura circular o cuadrada
 Cuerpo y obturador de fundición dúctil EN-GJS-500-7
 DIN EN 1563 (Equiv.GGG 50)
 Recubrimiento epoxi ≥ 250 micras
 Eje y asiento de obturador en AISI 304
 Con eje en acero inoxidable 316 L +20%



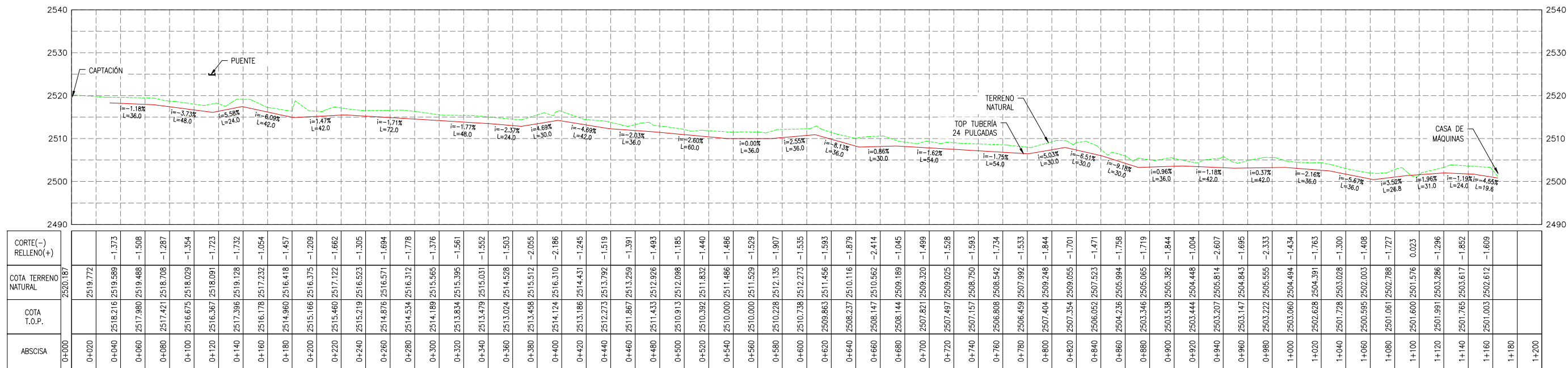
Referencia	DN	€/Ud
666100000014	100	528,69
666150000014	150	1.083,46
666200000014	200	1.407,42
666250000014	250	1.569,72
666300000014	300	1.814,28
666350000014	350	1.990,08
666400000014	400	2.478,93
666450000014	450	3.104,02
666500000014	500	4.051,12
666600000014	600	5.258,99
666700000014	700	7.115,44
666800000014	800	8.576,69
666900000014	900	10.108,14
666100000114	1000	15.142,43
666120000014	1200	22.700,53

ANEXO 8
PLANO TOPOGRÁFICO Y PERFIL HIDRÁULICO



PERFIL LONGITUDINAL DE TUBERÍA 24 PULGADAS

0+000.0-1+200.0



CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	UPS	Diseño:	Pallasco A & Romero B	2022-12-01
		Dibujo:	Pallasco A & Romero B	2022-12-01
		Revisa:	Ing. Toapanta Fernando	2022-12-01
Perfil Hidráulico Sigchos Quinticusig	Escala: INDICADA	Proyecto Técnico		Tol. General 0.1