

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

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

**PROYECTO TÉCNICO**

**“DISEÑO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PARA  
ABASTECER LA DEMANDA DEL CONSUMO ELÉCTRICO DE  
PLANTACIONES MALIMA CÍA. LTDA.”**

**AUTORES:**

VINICIO MARTIN PALOMEQUE JIMBO.  
ISMAEL ANTONIO VALDEZ CAJAMARCA.

**TUTOR:**

ING. NELSON JARA COBOS, PHD.

CUENCA - ECUADOR

2019

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Vinicio Martin Palomeque Jimbo con documento de identificación N° 0302590799 e Ismael Antonio Valdez Cajamarca con documento de identificación N° 0301788006, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PARA ABASTECER LA DEMANDA DEL CONSUMO ELÉCTRICO DE PLANTACIONES MALIMA CÍA. LTDA.”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2019



Vinicio Martin Palomeque Jimbo  
C.I. 0302590799



Ismael Antonio Valdez Cajamarca  
C.I. 0301788006

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PARA ABASTECER LA DEMANDA DEL CONSUMO ELÉCTRICO DE PLANTACIONES MALIMA CÍA. LTDA.”**, realizado por Vinicio Martin Palomeque Jimbo y Ismael Antonio Valdez Cajamarca, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2019



Ing. Nelson Jara Cobos, PhD.  
C.I. 0102679644

## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Vinicio Martin Palomeque Jimbo con documento de identificación N° 0302590799 e Ismael Antonio Valdez Cajamarca con documento de identificación N° 0301788006, autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PARA ABASTECER LA DEMANDA DEL CONSUMO ELÉCTRICO DE PLANTACIONES MALIMA CÍA. LTDA.”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y auditoría.

Cuenca, mayo 2019



Vinicio Martin Palomeque Jimbo  
C.I. 0302590799



Ismael Antonio Valdez Cajamarca  
C.I. 0301788006

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo investigativo le dedico principalmente a Dios, por haberme dado la inspiración y la fuerza para continuar en mis estudios y alcanzar mi sueño que es de ser un ingeniero mecánico.

A mis padres Rafael y Rocine por su amor y sacrificio que realizaron para darme los estudios y que por ustedes he logrado llegar hasta aquí, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades que se me presenten.

A mi esposa Verónica por ser mi compañera y mi apoyo durante este proceso de desarrollo del presente trabajo, por darme sus consejos, amor y no perder la esperanza que deposito en mí.

A mis hermanos Angélica, Martín por ser mis pilares y ejemplo a seguir enseñándome que nunca debo darme por vencido y que debo perseguir mis sueños y anhelos.

A mi cuñado Rolando, por apoyarme con sus consejos y enseñanzas en su vida profesional.

A mis sobrinos Víctor Rafael y María José por ser quienes me llenaban de alegría en los momentos más difíciles y me daban ánimos para no decaer seguir adelante.

A mi nana Inesita quien ha sido mi compañera de malas noches y amanecidas en mi trayecto de estudiante gracias por no perder la esperanza en mí.

Vinicio Martín Palomeque Jimbo

## **DEDICATORIA**

“Nadie llega a la meta de un salto, las grandes victorias se alcanzan paso a paso”

Concluyo con éxito este trabajo de titulación cerrando así un capítulo más en mis metas profesionales; el camino no ha sido fácil pero definitivamente el haber forjado mi carrera en esta institución bajo la dirección de tan buenos maestros y profesionales ha vuelto el transitar llevadero.

Mi dedicatoria es principalmente para Dios; sin él nada, a mis padres Antonio y Bertha quienes han sido un pilar fundamental durante estos años y más aún durante toda mi vida a ellos gracias por los consejos, los valores inculcados y el apoyo incondicional en cada momento.

A mi familia por ser la voz de aliento en los momentos en los que pensé decaer, gracias totales por haber confiado en mí en todo momento para hoy finalmente alcanzar esta meta tan anhelada.

Ismael Antonio Valdez Cajamarca

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A nuestras familias, por habernos dado la oportunidad de formarnos en esta prestigiosa universidad y haber sido nuestro apoyo durante todo este tiempo de estudio.

A la Universidad Politécnica Salesiana por ser la sede de todo el conocimiento adquirido en estos años, a la Carrera de Ingeniería Mecánica donde conocimos a excelentes profesionales quienes nos compartieron sus conocimientos de la mejor manera para que podamos concluir esta meta, es por esta razón que queremos agradecer a todos y cada uno de nuestros profesores y de manera especial a nuestro tutor de tesis, Ing. Nelson Jara por habernos guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de nuestra carrera universitaria y habernos brindado el apoyo para desarrollarnos profesionalmente y seguir cultivando nuestros valores y conocimientos adquiridos.

A los compañeros quienes fueron parte del día a día en todo el trayecto de estudio y que nos ayudaron de una manera desinteresada.

## ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE.....	vii
Índice de tablas .....	xii
Índice de Figuras .....	xiii
RESUMEN .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1. Tema .....	17
2. Introducción.....	17
3. Planteamiento del Problema .....	18
3.1 Antecedentes del problema.....	18
3.2 Problema General .....	19
3.3 Problemas Específicos .....	19
4. Objetivos.....	19
4.1 Objetivo general .....	19
4.2 Objetivos específicos .....	19
5. Marco Teórico Referencial .....	20
5.1. Tipos de fuentes de energía y centrales hidroeléctricas .....	20
5.2. Fuentes renovables .....	21

5.2.1.	Ventajas del uso de las energías renovables .....	21
5.2.2.	Energía mareomotriz (mareas).....	22
5.2.3.	Energía geotérmica .....	22
5.2.4.	Energía hidráulica .....	23
5.2.4.1	Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair.....	24
5.2.4.2	Hidroeléctrica del Sitanisagua.....	24
5.2.4.3	Proyecto Hidroeléctrico Manduriacu .....	24
5.2.4.4	Proyecto Hidroeléctrico Mazar Dudas .....	25
5.2.4.5	Proyecto Hidroeléctrico Minas San Francisco .....	25
5.2.4.6	Proyecto Hidroeléctrico Quijos .....	25
5.2.4.7	Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón .....	25
5.2.5.	Energía eólica .....	25
5.2.6.	Energía solar .....	26
5.2.7.	Biomasa .....	27
5.3.	Fuentes no renovables .....	28
5.3.1.	Carbón.....	28
5.3.2.	Petróleo .....	29
5.3.3.	Gas natural .....	29
5.3.4.	Energía nuclear .....	30
5.4.	Centrales hidroeléctricas.....	30
5.4.1.	Centrales de pasada o de filo de agua .....	31
5.4.2.	Centrales de embalse o regulación.....	31
5.4.3.	Centrales de regulación.....	32
5.4.4.	Centrales de almacenamiento por bombeo .....	32
5.4.5.	Centrales de alta presión .....	33
5.4.6.	Centrales de media presión .....	33
5.4.7.	Centrales de baja presión .....	33

5.5.	Componentes principales de la hidroeléctrica .....	33
5.6.	Turbinas hidráulicas .....	35
5.6.1	Distribuidor .....	35
5.6.2	Rodete .....	35
5.6.3	Tipos de turbinas.....	36
5.6.3.1	Turbinas de reacción .....	36
5.6.3.2	Turbinas de acción .....	37
5.7.	Obra civil y excavaciones.....	39
5.7.1.	Movimientos de tierras .....	39
5.7.2.	Centro de máquinas .....	39
5.7.3.	Tuberías .....	40
5.7.4.	Vertedero .....	40
5.7.5.	Caudal .....	41
6.	Métodos y Materiales .....	41
6.1.	Estudio de la Demanda Energética.....	41
6.1.1.	Potencia Requerida .....	41
6.1.2.	Consumo Eléctrico.....	42
6.2.	Estudio Hidrológico del Sitio .....	46
6.2.1.	Salto Neto Hidráulico .....	46
6.2.2.	Caudal Hidrológico.....	47
6.2.3.	Caudal medio .....	48
6.2.4.	Caudal de Equipamiento.....	49
6.2.5.	Caudal Ecológico.....	49
6.2.6.	Caudal Disponible.....	50
6.3.	Preselección de la Turbina.....	50
6.3.1.	Análisis de ventajas y desventajas .....	51
6.4.	Esquema de la Central Hidroeléctrica .....	53

6.4.1.	Tipo de emplazamiento.....	53
6.4.2.	Ubicación geográfica de la central.....	54
6.5.	Pérdidas Mayores y Menores .....	54
6.5.1.	Esquema de tubería y parámetros iniciales .....	55
6.5.2.	Caudal de diseño preliminar .....	56
6.5.3.	Selección del diámetro de tubería .....	56
6.5.4.	Ingreso de datos iniciales de cálculo.....	57
6.5.5.	Base de datos de tubería.....	58
6.5.6.	Base de datos de accesorios .....	58
6.5.7.	Fluido de trabajo .....	59
6.5.8.	Materiales de tuberías .....	59
6.5.9.	Accesorios en el sistema .....	59
6.5.10.	Resultados en tuberías .....	60
6.5.11.	Resultados en nodos .....	60
6.6.	Confirmación de la selección .....	61
6.6.1.	Altura aprovechable después de pérdidas .....	61
6.6.2.	Caudal de diseño de acuerdo con la demanda .....	61
6.6.3.	Número de Revoluciones.....	61
6.6.4.	Números Específicos de Revoluciones.....	62
6.7.	Parámetros Geométricos.....	63
6.7.1.	Selección del Inyector.....	63
6.7.2.	Ancho del inyector.....	65
6.7.3.	Diámetro interno del rodete .....	65
6.7.4.	Radio de curvatura y ángulo de curvatura de los álabes.....	66
6.7.5.	Diámetro máximo del eje.....	66
6.8.	Geometría del desarenador y de la cámara de carga .....	67
6.8.1.	Longitud y ancho del desarenador .....	67

6.8.2.	Profundidad de recolección .....	68
6.8.3.	Cámara de carga.....	70
7.	Resultados y Validación .....	71
7.1.	Factibilidad técnica.....	71
7.1.1.	Esquema general de la central hidroeléctrica.....	73
7.2.	Factibilidad económica.....	74
7.2.1.	Costos unitarios reales .....	74
7.2.2.	Costos unitarios supuestos .....	77
7.2.3.	Costos de inversión y ahorros por concepto de energía.....	80
7.2.4.	Análisis Financiero con RETScreen .....	81
8.	Conclusiones y Recomendaciones .....	84
8.1.	Recomendaciones .....	85
9.	Referencias Bibliográficas.....	86

## Índice de tablas

Tabla 1 Fuentes renovables y no renovables [5] Fuente: Portal Educativo, 2017 .....	20
Tabla 2 Principales elementos de una mini central hidroeléctrica [18] Fuente: Fernández, 2010 .....	33
Tabla 3 Potencia de los equipos usados en plantaciones Malima Fuente: Hernández, 1985. ....	41
Tabla 4 Consumo energético de plantaciones Fuente: Malima (2014-2018).....	43
Tabla 5 Análisis estadístico del consumo eléctrico Fuente: Autores. ....	45
Tabla 6 Caudales en los ríos Paute y Cuenca en el 2018 Fuente: Autores.....	48
Tabla 7 Criterios de selección de las turbinas Fuente: Autores.....	50
Tabla 8 Ponderación de las alternativas de turbinas Fuente: Autores. ....	51
Tabla 9 Resultado de la ponderación Fuente: Autores. ....	52
Tabla 10 Clasificación de las centrales hidroeléctricas [17] Fuente: Hernández, 1985. ....	52
Tabla 11 Datos del fluido de trabajo .....	58
Tabla 12 Material de las tuberías. Fuente: Autores. ....	58
Tabla 13 Accesorios del sistema. Fuente: Autores.....	58
Tabla 14 Resultados para los tramos de tubería forzada. Fuente: Autores. ....	59
Tabla 15 Resultados para los nodos del sistema. Fuente: Autores.....	59
Tabla 16 Dimensiones estandarizadas de turbinas Banki [17]. Fuente: Hernández, 1985. ....	61
Tabla 17 Tipos de Turbinas [17] Fuente: Hernández, 1985.....	62
Tabla 18 Cotas de la geometría del inyector de dos compartimientos. Fuente: Autores. ....	63
Tabla 19 Resultados del análisis técnico. Fuente: Autores. ....	70
Tabla 20 Costos unitarios por metro para tubería de presión [26] Fuente: CYPE, 2019. ....	73
Tabla 21 Costos unitarios por metro cuadrado de la cubierta para casa de máquinas [26] Fuente: CYPE, 2019.....	74
Tabla 22 Costos unitarios por metro cuadrado de nivelación de terreno [26] Fuente: CYPE, 2019.....	74
Tabla 23 Costos del grupo hidroeléctrico provistos por la empresa 3HC [2] Fuente: Castro, 2006.....	75
Tabla 24 Costos de inversión de la mini central hidroeléctrica.....	79

Tabla 25 Costos Anuales de Operación y Mantenimiento. Fuente: Autores.....	79
Tabla 26 Rubro Anual por concepto de ahorro de energía. Fuente: Autores. ....	79

## Índice de Figuras

Figura 1 Energía mareomotriz [9] Fuente: Bassam y Schlichting, 2013.....	22
Figura 2 Energía geotérmica [11] Fuente: Gorjian, 2017.....	23
Figura 3 Energía hidráulica [2] Fuente: Lejeune, 2012.....	24
Figura 4 Energía eólica [13] Fuente: Kaldellis, 2012.....	26
Figura 5 Energía solar [11] Fuente: Gorjian, 2017.....	27
Figura 6 Biomasa [11] Fuente: Gorjian, 2017.....	27
Figura 7 Carbón [15] Fuente: MIEM,2014 .....	28
Figura 8 Petróleo [15] Fuente: MIEM,2014.....	29
Figura 9 Gas natural [15] Fuente: MIEM,2014.....	30
Figura 10 Energía nuclear [15] Fuente: MIEM,2014. ....	30
Figura 11 Centrales de pasada [3] Fuente: Castro, 2012.....	31
Figura 12 Centrales de embalse [3] Fuente: Castro, 2012.....	32
Figura 13 Centrales de almacenamiento por bombeo [3] Fuente: Castro, 2012. ....	32
Figura 14 Movimiento de los álabes por entrada de agua [19] Fuente: Fernández, 2010 .....	36
Figura 15 Turbinas de reacción [19] Fuente: Fernández, 2010.....	37
Figura 16 Turbina Kaplan [19] Fuente: Fernández, 2010 .....	37
Figura 17 Turbina Pelton [19] Fuente: Fernández, 2010.....	37
Figura 18 Turbina Schwamkrug [19] .....	38
Figura 19 Turbina Girard [19] Fuente: Fernández, 2010 .....	38
Figura 20 Turbina Banki [19] Fuente: Fernández, 2010 .....	38
Figura 21 Cuarto de máquinas [3] Fuente: Castro, 2006.....	39
Figura 22 Tuberías [3] Fuente: Castro, 2006.....	40
Figura 23 Vertedero lateral [3] Fuente: Castro, 2006.....	40
Figura 24 Consumo eléctrico de plantaciones Malima. Fuente: Autores.....	42
Figura 25. Ubicaciones del lugar de captación y la hidroeléctrica. Fuente: Google Earth, 2019 .....	46
Figura 26 Perfil de elevación en el sitio. Fuente: Autores .....	46
Figura 27 Ubicaciones del proyecto de generación y de la central hidrológica. Fuente: Autores .....	47

Figura 28 Afluentes del río Paute. Fuente: Autores .....	47
Figura 29 Caudal diario de la estación H0894 [22] Fuente: INAMHI, 2018.....	48
Figura 30 Diagrama de selección de turbinas [3] Fuente: Castro, 2006.....	50
Figura 31 Comparación de rendimientos de turbinas; a) Michelle-Banki, b) Francis, c) Kaplan, Semikaplan y Hélice. Fuente: Autores.....	51
Figura 32 Central Hidroeléctrica de tipo Fluyente [3] Fuente: Castro, 2006.....	53
Figura 33 Tramos de la tubería de presión Fuente: Autores. ....	54
Figura 34 Diagrama de diámetro de tubería en función del caudal [3] Fuente: Castro, 2006.....	56
Figura 35 Ingreso de datos de la captación y tubería. Fuente: software Pipe Flow .....	56
Figura 36 Selección de diámetro y material en Pipe Flow Expert. Fuente: software Pipe Flow .....	57
Figura 37 Selección de accesorio en Pipe Flow Expert. Fuente: Pipe Flow. ....	57
Figura 38 Rendimiento turbina Michelle - Banki para un inyector con 2 compartimientos [17]. Fuente: Hernández, 1985. ....	62
Figura 39 Geometría del inyector de dos compartimientos [17] Fuente: Hernández, 1985. ....	63
Figura 40 Geometría del rodete de la turbina Michelle-Banki [17]. Fuente: Hernández, 1985.....	64
Figura 41 Vista lateral y superior del desarenador [25]. Fuente: Coz, 1995.....	66
Figura 42 Vista lateral y superior de la cámara de carga. [25]. Fuente: Coz, 1995. ....	70
Figura 43 Esquema general de la central hidroeléctrica Fuente: Autores .....	71
Figura 44 Esquema de captación de la central hidroeléctrica. Fuente: Autores.....	72
Figura 45 Esquema del desarenador. Fuente: Autores .....	72
Figura 46 Esquema de la cámara de carga. Fuente: Autores.....	72
Figura 47 Tubería de presión.....	73
Figura 48 Esquema de la obra de captación [18]. Fuente: Indacochea, 1981. ....	77
Figura 49 Esquema de la cámara de carga [18]. Fuente: Indacochea, 1981.....	78
Figura 50 Flujo de caja anual para el proyecto. Fuente: Autores.....	80
Figura 51 Flujo de efectivo acumulado durante el tiempo de vida del proyecto. Fuente: Autores. ....	80
Figura 52 Resultados del análisis financiero. Fuente. Autores.....	81

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se realiza una propuesta de diseño de una central hidroeléctrica que permita abastecer la demanda del consumo eléctrico de la empresa Floricultora “Plantaciones Malima Cía. Ltda.”, para lo cual, primero se procede a determinar el rango del caudal disponible del río Paute, mismo que en un porcentaje se estima solventaría la demanda eléctrica que tiene la empresa, esta demanda se calcula en base a un análisis de los consumos específicos de cada uno de los departamentos con los que cuenta la compañía, posibilitando el establecimiento de la capacidad que debería tener la central hidroeléctrica.

Una vez con esta información y considerando la complejidad que tienen estos equipos se procede con el planteamiento de las características generales de varios de los sistemas que constituyen la central hidroeléctrica y el cálculo de dimensionamiento de algunas partes de otros sistemas que lo requieren, por mencionar algunos de los que se tratan en este documento se hace referencia al desarenador, la cámara de carga, la tubería de presión, la turbina y otros subsistemas necesarios para conformar la central hidroeléctrica que abastezca la demanda eléctrica.

Por último, se analiza el costo estimado de la instalación y se calcula la tasa interna de retorno para el periodo de vida útil de la central hidroeléctrica. Con los resultados obtenidos se determina la viabilidad del proyecto y los beneficios que la empresa puede tener al implementar una planta de generación de energía hidroeléctrica.

## **ABSTRACT**

In the present work a proposal of design of a hydroelectric power station is made that allows to supply the demand of the electrical consumption of the Floricultora Company "Plantaciones Malima Cía. Ltda. ", For which, first we proceed to determine the range of the available flow of the Paute River, same that in a percentage is estimated would solve the electrical demand that the company has, this demand is calculated based on an analysis of the consumptions specific to each of the departments with which the company has, enabling the establishment of the capacity that the hydroelectric plant should have.

Once with this information and considering the complexity of these equipment, we proceed with the general characteristics of several of the systems that constitute the hydroelectric power station and the calculation of the sizing of some parts of other systems that require it, to mention a few, of those dealt with in this document reference is made to the sand trap, the loading chamber, the pressure pipe, the turbine and other subsystems necessary to form the hydroelectric power station that supplies the electricity demand.

Finally, the estimated cost of the installation is analyzed and the internal rate of return for the period of useful life of the hydroelectric plant is calculated. The results obtained determine the feasibility of the project and the benefits that the company can have when implementing a hydroelectric power generation plant.

## **1. Tema**

Diseño de una central hidroeléctrica para abastecer la demanda del consumo eléctrico de Plantaciones Malima CÍA. LTDA.

## **2. Introducción**

El aprovechamiento eficiente de energía eléctrica ha sido desde hace muchos años el eje principal en el desarrollo económico y social de la humanidad. Conforme la población crece, la energía demandada para cubrir necesidades básicas de consumo y bienestar también aumenta [1]. Las estadísticas del consumo total de energía mundial indican que desde 1965 a 2006, el consumo se ha incrementado de 46,52 a 127,93 millones de gigavatios-hora (GWh), es decir que el consumo en el 2006 era aproximadamente el triple del consumo en 1965 [2]. Esta gran demanda energética ha ocasionado que se desarrollen diferentes maneras de obtener energía, particularmente, electricidad. Además existe una concienciación cada vez mayor sobre los efectos medioambientales que conlleva el uso de energías no renovables [3].

En la generación de electricidad tenemos varias alternativas desarrolladas que pueden obtener energía de diversas fuentes. Sin embargo, en el contexto actual, no solo necesitamos métodos de producción eficientes, sino también debemos enfocarnos en la generación limpia y renovable. Las hidroeléctricas han sido pioneras en la producción eléctrica sostenible. En el 2006, la electricidad mundial generada por hidroeléctricas representaba cerca del 90% del total de generación de electricidad renovable [2]. Dentro de este contexto, muchos gobiernos (incluido Ecuador) apoyan la generación de electricidad a través de hidroeléctricas. La OLADE considera que en muchos casos, la generación eléctrica a través de mini centrales hidroeléctricas es una solución a las necesidades de una comunidad o una pequeña industria [4].

Para el presente trabajo, se ha seleccionado un caso de estudio puntual de generación de electricidad en el que se pueda analizar la factibilidad de implementación de un proyecto hidroeléctrico que cubra la demanda energética de una empresa mediana (Plantaciones Malima). El estudio se desarrolla en varias fases de análisis, empezando por una revisión general de conceptos acerca de la generación hidroeléctrica y las diferentes alternativas renovables y no renovables disponibles hoy en día. Luego, se desarrolla la metodología de investigación basada en un estudio de la demanda energética de la empresa. Los datos de la demanda sirven posteriormente para establecer el tamaño del proyecto y compararlo

con el potencial energético del río Paute que constituye la fuente de energía. La siguiente fase consiste en la selección de la mejor turbina de generación en términos hidráulicos para cumplir con lo especificado. Por último, se hace un análisis económico que compruebe la viabilidad del proyecto en términos de inversión y costo de la electricidad. Los resultados son presentados y analizados para obtener las conclusiones del caso de estudio propuesto.

### **3. Planteamiento del Problema**

#### **3.1 Antecedentes del problema**

El consumo energético en el Ecuador permite la producción de efectos luminosos, mecánicos, caloríficos, químicos, entre otros. Para el abastecimiento de la energía eléctrica se prioriza la producción de energía renovable limpia, es decir fuentes naturales como son: La energía hidráulica, fotovoltaica, eólica, biomasa y biogás. En el país al 2017 se registró 8.036,34 MW de potencia nominal y 7.434,81 de potencia efectiva, que son consideradas desde los generadores, auto generador y distribuidores.

Para la generación de la potencia efectiva se cuenta en mayor cantidad de las centrales hidráulicas, con 4.486,41 MW, que representa un 60,34% respecto al total de potencia efectiva necesaria en el Ecuador. Adicionalmente, se cuenta con centrales térmicas no renovables con 1.551,47 correspondiente a un 20,87% al total nacional.

Para la regulación de clientes se emplean los medidores, que para el 2017 contaba con 5.071.526 que corresponde al 99,69% de pobladores con servicio de red eléctrica. Además, existen 15.933 clientes sin medidor que son los que utilizan sistemas como paneles fotovoltaicos, entre otros.

La energía bruta total producida por el país al año 2017 fue de 28.032,91 GWh, que a su vez es distribuida de la siguiente manera: Hidráulica 20.088,61 GWh (71,66%), térmica 7.374,75 GWh (26,31%), biomasa 430,85 GWh (1,54%), eólica 73,40 GWh (0,26%), biogás 27,82 GWh (0,10%) y fotovoltaica 37,48 GWh (0,13%). [9]

Según la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica, el Operador Nacional de Electricidad (CENACE) administra y liquida comercialmente las transacciones del sector eléctrico. Por lo tanto, la entidad reportó el 2017 mensualmente por venta de energía eléctrica por contratos regulados, transacciones de corto plazo y contratos que no son liquidados un total de 899 millones de dólares correspondientes a 23.125,68 GWh. [9]

Por esta razón es necesario diseñar una central hidroeléctrica para abastecer la demanda de consumo eléctrico en PLANTACIONES MALIMA, que siga normas para la

generación de electricidad utilizando la energía hidráulica, la cual es la más desarrollada, con lo antes mencionado y con la intención de apoyar el incremento de la utilización de energías limpias en el Ecuador, además de presentar alternativas para la población no conectada se presenta como opción el diseño de una central hidroeléctrica a implementarse en Plantaciones Malima que siga normas para la generación de electricidad utilizando la energía hidráulica ya que es la más desarrollada en el país identificándose grandes construcciones hidroeléctricas como Manduriacu, Quijos, Toachi Pilatón, Central Paute entre otras.

El diseño implica problemas a solucionar como la selección de la tecnología adecuada a las condiciones de Plantaciones Malima, el sistema de captación de agua la infraestructura civil necesaria y el sistema mecánico general.

### **3.2 Problema General**

¿Es factible el diseño de una central hidroeléctrica para abastecer el consumo eléctrico de Plantaciones Malima Cía. Ltda.?

### **3.3 Problemas Específicos**

- ¿Cuáles son las características de consumo, emplazamiento y captación de agua para la implementación de un proyecto hidroeléctrico en Plantaciones Malima Cía. Ltda.?
- ¿Es posible diseñar un sistema de generación hidroeléctrica considerando las condiciones con las que cuenta Plantaciones Malima Cía. Ltda.?
- ¿Es rentable diseñar un sistema de generación hidroeléctrica que abastezca el consumo de electricidad para los equipos en Plantaciones Malima Cía. Ltda.?

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Diseñar una central hidroeléctrica para la generación de energía que abastezca el consumo eléctrico de Plantaciones Malima Cía. Ltda.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Establecer las características de consumo, emplazamiento y captación de agua en Plantaciones Malima Cía. Ltda.
- Diseñar un sistema de generación hidroeléctrica para abastecer el consumo energético de Plantaciones Malima Cía. Ltda.

- Determinar la rentabilidad del diseño de un sistema de generación hidroeléctrica que abastezca el consumo de electricidad en Plantaciones Malima Cía. Ltda. Para su posterior implementación.

## 5. Marco Teórico Referencial

### 5.1. Tipos de fuentes de energía y centrales hidroeléctricas

En el último tiempo la dependencia de la población por fuentes provenientes del petróleo, es decir de combustibles fósiles, se ha visto la necesidad de implementar el desarrollo de energías alternativas para que se puedan explotar diferentes recursos energéticos.

Por otra parte, al reducir el uso de combustibles fósiles, se necesita disminuir el impacto al medio ambiente para evitar la degradación del planeta. Existen energías que se conocían, pero que a su vez no se empleaban por su alto costo para su aprovechamiento. Sin embargo, la inversión a largo plazo hace viable la utilización de dicha tecnología.

Existen dos tipos de energías como forma de producción para que el ser humano aproveche. Los cuales son: energías renovables y no renovables.

Las energías renovables se consideran como inagotables, con estas las consecuencias ambientales se reducen si se aprovechan al máximo. En cambio, las energías no renovables implican una fuente que no se puede reponer con el tiempo, es decir desaparecerían con el uso desmedido actual, y afectando en gran medida el medio ambiente [5]. En la tabla 1 se muestran los tipos de fuentes de energía que existen.

Tabla 1 Fuentes renovables y no renovables [5] Fuente: Portal Educativo, 2017

<b>Tipo</b>	<b>Forma de producción</b>	<b>Fuente natural de energía</b>
<b>No renovables</b>	Central termoeléctrica	Combustibles fósiles
	Energía nuclear de fisión	Uranio – 235
	Energía hidráulica	Agua fluyente o embalsada
	Energía solar	Sol
	Energía eólica	Viento
<b>Renovables</b>	Biomasa	Residuos orgánicos
	Residuos sólidos urbanos	Basura
	Energía mareomotriz	Mareas
	Central oceánica	Olas del mar
	Energía geotérmica	Calor interno terrestre

## **5.2. Fuentes renovables**

Se refieren a fuentes limpias e inagotables, es decir que a diferencia de los combustibles fósiles se encuentran en abundancia y con una mayor presencia. A su vez, no producen gases de efecto invernadero que son los causantes del cambio climático en el planeta. Mundialmente la Agencia Internacional de la Energía (AIE) el aumento en el uso de las energías limpias va en crecimiento desde el año 2014, como su principal uso la generación de energía eléctrica. Se estima que hasta el año 2040 la demanda de electricidad en el planeta aumentara a un 25%, en donde los principales países en potencial peligro son las de India, China, África, Oriente medio y el sureste Asiático, por su crecimiento poblacional exponencial [6].

### **5.2.1. Ventajas del uso de las energías renovables**

- Las fuentes renovables no emiten gases de efecto invernadero cuando se utilizan para la formación de energía, dando como resultado un uso más viable frente al medio ambiente.
- Son consideradas inagotables a diferencia de las fuentes fósiles como el carbón, el gas, el petróleo o la energía nuclear, cuyas reservas son agotables. Por lo tanto, se consideran como un sistema energético sostenible que favorece el desarrollo sin poner en riesgo el planeta a futuro [7].
- Existe una disminución de la dependencia al petróleo, es decir las economías de países en vías de desarrollo existe la necesidad de importar combustibles fósiles, lo que produce un gasto anual que se podría disminuir si existe la implementación de tecnologías que aprovechan las fuentes renovables como son: viento, sol, agua, materia orgánica- susceptible de aprovecharlo para producir energía de forma sostenible [7].
- Su futuro competitivo como las principales tecnologías renovables en comparación con las convencionales significan un número creciente de emplazamientos. Por lo tanto, las energías renovables son tecnologías más sostenibles, no sólo ambiental sino también económicamente [7].

En 2020 se firmará un acuerdo que pretende establecer un objetivo global que vincule a las potencias mundiales, por medio de los cual 200 países se comprometen a reducir sus emisiones de forma que el límite de cambio climático disminuya por debajo de 1,5 grados

[8]. Por lo expuesto anteriormente es necesario el estudio de energías renovables y los tipos de fuentes que existen para elegir la más adecuada para su implementación en diferentes zonas del país, a continuación, se muestran los tipos de energías renovables que se tienen.

### 5.2.2. Energía mareomotriz (mareas)

Se producen por el movimiento de las masas de agua provocado por las subidas y bajadas de las mareas, y también por las olas que se originan en la superficie del mar por la acción del viento (ver Figura 1) [9]. Existen ventajas al utilizar este tipo de energías renovables las cuales son:

- Se encuentra disponible durante todo el año, con la diferencia que es considerada cíclica, por lo que no se genera la misma potencia de manera constante.
- Es limpia silenciosa razón por la cual reducen la emisión de gases de efecto invernadero y puede reemplazar a los combustibles fósiles, o a la energía nuclear.
- Cuando ya se procede a la construcción de la tecnología, la producción de energía mareomotriz es considerada de bajo costo por su obtención de la naturaleza.
- Al realizar el estudio que genere energía mareomotriz no requieren una gran inversión para su mantenimiento, ya que las barreras, o generadores con hélices son duraderas.

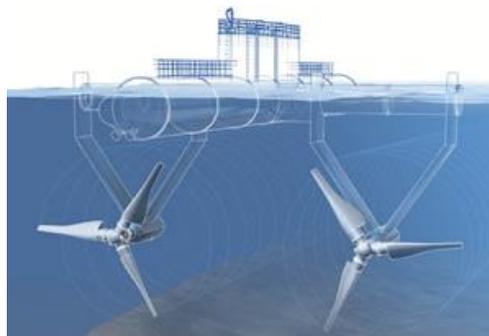


Figura 1 Energía mareomotriz [9] Fuente: Bassam y Schlichting, 2013

### 5.2.3. Energía geotérmica

Son aquellas energías que se obtienen mediante el aprovechamiento del calor del interior de la tierra. La energía geotérmica puede hacer uso de las aguas termales que se

encuentran a poca profundidad y que emanan vapor. Otra fuente de energía geotérmica es el magma (mezcla de roca fundida y gases), aunque no existen recursos tecnológicos suficientes para una explotación industrial del mismo. En la Figura 2 se muestra la fuente geotérmica [10].



Figura 2 Energía geotérmica [11] Fuente: Gorjian, 2017

Se encuentra disponible en cualquier estación. En muchos países ya se utiliza la energía geotérmica para generar electricidad o también para distribución térmica. La energía geotérmica presenta una base sólida para la producción de energía limpia y no contaminante, especialmente para regiones. Las características geológicas del Ecuador son altamente favorables para la presencia de un importante flujo de calor terrestre. No es casual el hecho que en el país se presente una de las más altas concentraciones de fuentes volcánicas de todo el cinturón volcánico andino [12]. En el Ecuador existen diferentes planes de aprovechamiento como son:

- La geotermia para climatización de edificaciones
- Mapa de propiedades térmicas del suelo de Guayaquil.
- Análisis de consumo de energía de una torre de enfriamiento de un edificio tipo de Guayaquil
- Instalación de un sistema alternativo experimental de aprovechamiento geotérmico
- Desarrollo de metodologías para la estimación del potencial geotérmico
- Documento que consolida la información técnica histórica
- Metodología geo-científica (estudios de geología y geoquímica, interpretación de resultados

#### **5.2.4. Energía hidráulica**

Se produce por el agua retenida en embalses o pantanos a gran altura (que posee energía potencial gravitatoria). Si en un momento dado se deja caer hasta un nivel inferior, esta

energía se convierte en energía se convierte en energía cinética y, posteriormente, en energía eléctrica en la central hidroeléctrica, como se indica en la Figura 3 [2].



Figura 3 Energía hidráulica [2] Fuente: Lejeune, 2012

En el Ecuador se han construido centrales hidroeléctricas que aprovechan la energía del agua, lo cual implica un gran avance productivo y energético. La meta a mediano y largo plazo es obtener autonomía energética, reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, sustituir la importación de energía y generar empleos [4]. Los proyectos que en los últimos años se han construido son:

#### **5.2.4.1 Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair**

Esta Central Hidroeléctrica se encuentra localizada en las provincias de Napo y Sucumbíos, por donde pasan los ríos Quijos y Salado, fue inaugurada el 18 de noviembre del 2016 y a aproximadamente 20 mil habitantes por la construcción de sistema de alcantarillado, agua potable, nueva infraestructura en centros educativos de comunidades, ampliación del servicio eléctrico, etc., aportando una energía neta de 6.2425,02 desde abril de 2016 hasta julio de 2017 [4].

#### **5.2.4.2 Hidroeléctrica del Sitanisagua**

Utiliza el potencial del Río Zamora para la generación de energía hidráulica, que se encuentra en la provincia de Zamora Chinchipe. Con una ayuda a cerca de 25 mil habitantes con la construcción de sistemas eléctricos, alcantarillado y agua potable [4].

#### **5.2.4.3 Proyecto Hidroeléctrico Manduriacu**

Se inauguró 19 de marzo del 2015 en las provincias de Pichincha e Imbabura, cantones Quito y Cotacachi respectivamente. La misma cumple con la generación de 678,36 GWh de energía neta, beneficiando a más de 10 mil habitantes correspondientes a las parroquias de Pacto y García Moreno [4].

#### **5.2.4.4 Proyecto Hidroeléctrico Mazar Dudas**

Esta central hidroeléctrica se construyó en la provincia de Cañar, la cual aprovecha el caudal de los Ríos Pindilig y Mazar. Además, aporta una energía eléctrica anual de 125.4 GWh y posee un registro internacional como Proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio MDL, en julio de 2013 en la Organización de las Naciones Unidas, por los programas como manejo de desechos, mejoramiento de infraestructura de unidades educativas, servicio eléctrico y dotación de servicios básicos a la población del lugar [4].

#### **5.2.4.5 Proyecto Hidroeléctrico Minas San Francisco**

Este proyecto se encuentra en las provincias de Azuay y El Oro y se estima que generará una energía eléctrica anual de 1290 GWh. En los cantones de Pucará, Zaruma y Pasaje. Adicionalmente, se han ejecutado proyectos de electrificación, infraestructura, implementación de obras de seguridad, mejoramiento de vías, construcción y mantenimiento de sistemas de servicios básicos y mejoramiento de la productividad agraria [4].

#### **5.2.4.6 Proyecto Hidroeléctrico Quijos**

El proyecto aportará una energía anual de 355 GWh, desde septiembre del 2013 registró internacionalmente su nombre como proyecto de desarrollo amigable con el ambiente, en la Organización de las Naciones Unidas. Por otro lado, está ubicado en la Provincia de Napo y aprovecha el caudal de los Ríos Quijos y Papallacta para la generación de energía eléctrica [4].

#### **5.2.4.7 Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón**

Esta central se encuentra ubicada en las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi, utilizando los caudales de los Ríos Toachi y Pilatón. A su vez, los programas de compensación benefician a más de 471 mil habitantes correspondientes a los cantones Mejía, Santo Domingo y Sigchos [4].

#### **5.2.5. Energía eólica**

Es la energía cinética generada por la acción del viento que se transforma en electricidad por medio de dispositivos aparatos llamados aerogeneradores que son la evolución de los molinos de viento que existían en la antigüedad [13]. (Ver Figura 4)



Figura 4 Energía eólica [13] Fuente: Kaldellis, 2012

En las últimas décadas a nivel mundial, un sostenido crecimiento de la energía producida por parques eólicos que, en muchos países, representa ya un importante componente del total de la oferta de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables no contaminantes. El país, aunque no desarrolla las tecnologías para el uso de grandes centrales para la generación de energía posee proyectos como lo siguientes [4]:

- Desarrollo de herramienta informática que permite el análisis de datos, que será de gran utilidad para futuros proyectos eólicos.
- Estudio y recomendaciones para el buen funcionamiento de parques eólicos en gran altura.

#### **5.2.6. Energía solar**

La energía solar es la que llega a la tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor, y rayos ultravioletas) procedentes del sol, donde ha sido generada por un proceso de fusión nuclear. El aprovechamiento de la energía solar se puede realizar de dos formas: por conversión térmica de alta temperatura (sistema foto térmico) y por conversión fotovoltaica (sistema fotovoltaico) [11]. En la figura 5 se muestra un sistema de conversión de alta temperatura. Los proyectos de investigación que posee el Ecuador son:

- La estimación del potencial de energía renovable mediante la instalación de estaciones meteorológicas [4]
- 26 estaciones meteorológicas [4].
- Metodología y herramienta informática para el análisis de datos [4].
- Mapas preliminares del potencial solar y eólico en las zonas de influencia con mediciones en campo [4].



Figura 5 Energía solar [11] Fuente: Gorjian, 2017.

### 5.2.7. Biomasa

La biomasa está formada por un conjunto de organismo vivos que existen sobre los continentes y en los océanos, pueden ser microorganismo, planta o animales. Sin embargo, el uso de la energía de biomasa se basa, principalmente en las plantas y en los árboles [14].

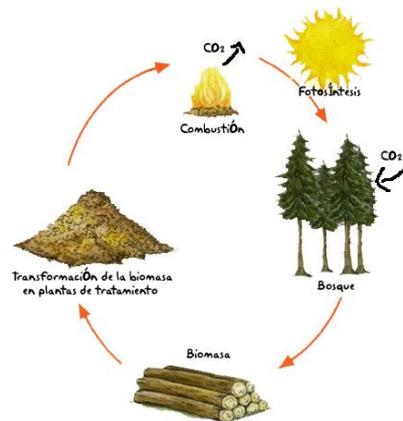


Figura 6 Biomasa [11] Fuente: Gorjian, 2017.

La biomasa, por su capacidad de transformación en energía no contaminante, puede contribuir eficientemente al reemplazo de aquellas energías derivadas del petróleo por lo que constituye un valioso recurso para el desarrollo de nuevas fuentes de energía renovable, ya que el Ecuador posee un enorme potencial, tanto por la magnitud de su actividad agrícola cuanto por las posibilidades de aprovechamiento de los residuos urbanos. Existen proyectos que pretenden utilizar este recurso para la generación de energía como son [4]:

- Gasificación de residuos sólidos para producción de combustibles
- Construcción de planta prototipo para obtener biocombustibles para transporte, a partir del aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos.

- Producción de hidrógeno a partir de biomasa residual de la producción de banano
- Diseño de tecnología para obtención de hidrógeno a partir de los desechos del banano. Procedimiento para desarrollar catalizadores para optimizar la producción de hidrógeno.
- Captura de carbono de emisiones de plantas termoeléctricas para producción de biocombustibles a partir de micro algas.
- Planta piloto para captura de carbono y producción de biocombustibles a partir de micro algas. Modelo de utilidad en extracción de aceites de micro algas.

### 5.3. Fuentes no renovables

Principalmente las fuentes de energía no renovables se obtienen de la combustión de hidrocarburos, siendo esta la fuente principal utilizada en las industrias en el transporte tanto carga como el de personas, esta es una fuente de energía que no es renovable ya que los hidrocarburos no hay como generarlo con algún proceso conocido por el hombre [15].

Existen varias fuentes de energía no renovable, como son:

- Los combustibles (carbón, petróleo y gas natural)
- La energía nuclear (fisión y fusión nuclear)

#### 5.3.1. Carbón

Es una sustancia ligera, de color negra, que procede de la fosilización de restos orgánicos vegetales. Existen 4 tipos: antracita, hulla, lignito y turba. El carbón se utiliza como combustible en las industrias, en las centrales térmicas y en las Calefacciones domésticas [15].



Figura 7 Carbón [15] Fuente: MIEM,2014

El carbón es el combustible con el 25% de la energía primaria consumida en el planeta, y es el segundo detrás del petróleo. Además, en lo que se refiere a la generación de energía eléctrica corresponde a un 40% de la producción mundial. Existen diferentes aplicaciones para el carbón como las que se enuncian a continuación [15]:

### **Generación de energía**

Las centrales térmicas de carbón pulverizado constituyen la principal fuente mundial de energía eléctrica, junto a la de ciclos combinados que emplean como combustible gas de síntesis obtenido mediante la gasificación del carbón [5].

### **Uso doméstico**

el carbón fue empleado como combustible doméstico desde la antigüedad. Sin embargo, en la actualidad se utiliza para calefacción en países en desarrollo, mientras que otros ya son reemplazados por otras fuentes calor como son: gas natural, propano, butano, entre otros [5].

### **5.3.2. Petróleo**

Es el resultado de la descomposición de los restos de organismos vivos microscópicos cuya formación lleva ciento de años en mares, lagos y desembocaduras de ríos. Se trata de sustancia líquida, menos densa que el agua, de color oscuro, aspecto aceitoso y olor fuerte, formada por una mezcla de hidrocarburos (compuestos químicos que solo contienen en sus moléculas carbono e hidrogeno), luego de extraído, debe ser separado del gas y del agua por medio del proceso conocido como refinado [15].



Figura 8 Petróleo [15] Fuente: MIEM,2014

### **5.3.3. Gas natural**

El gas natural es una mezcla de distintos hidrocarburos, generalmente gaseosos, que se producen en el subsuelo de manera natural. Tiene un origen similar al del petróleo, y suele estar formando una capa o bolsa sobre yacimientos de petróleo. Está compuesto, fundamentalmente, por metano ( $CH_4$ ). El gas natural es un buen sustituto del carbón como combustible, debido a su facilidad de transporte y elevado poder calorífico ya que es menos contaminante que los otros combustibles fósiles [15].



Figura 9 Gas natural [15] Fuente: MIEM,2014

#### 5.3.4. Energía nuclear

Es la energía almacenada en el núcleo atómico, que se desprende en la desintegración de dichos núcleos. Una central nuclear eléctrica en la que, en lugar de combustible fósiles se emplea uranio-235, un isótopo del elemento uranio que se fisiona en núcleos de átomos, más pequeños y libera una gran energía, la cual se emplea para calentar agua que, convertida en vapor, acciona unas turbinas unidas a un generador que se produce la electricidad [15].



Figura 10 Energía nuclear [15] Fuente: MIEM,2014.

#### 5.4. Centrales hidroeléctricas

Es una tecnología que emplea energía hidráulica para la generación de energía eléctrica. Sus inicios se remontan a los molinos que aprovechaban la corriente de los ríos para que una rueda de madera se mueva.

La característica principal de estas centrales es aprovechar la energía potencial que posee la masa de agua de un cause natural en virtud de un desnivel, también conocido como un salto geodésico [2].

El cauce de un río es fundamental, ya que el fluido pasa por una turbina hidráulica, que se encarga de transmitir la energía a un generador donde se transforma en energía eléctrica. Por lo tanto, se trata de una instalación con un diseño que utiliza la energía del movimiento del agua para transformarla en energía eléctrica.

Estas instalaciones se clasifican por el tipo de utilización del agua y según la altura del salto. Con el movimiento del agua se caracterizan por emplear la velocidad del agua como

materia prima. Además, de que trabajan con regulaciones altas. A continuación, se enuncian las centrales [16].

- Centrales de agua fluente o centrales de pasada o de filo de agua
- Centrales de embalse o regulación
- Centrales de regulación
- Centrales de bombeo

Según la altura del salto o desnivel se clasifican como:

- Centrales de alta presión
- Centrales de media presión
- Centrales de baja presión

Según el criterio de la utilización del agua se pueden clasificar en distintos tipos de centrales, los cuales se mencionan a continuación y de manera general.

#### **5.4.1. Centrales de pasada o de filo de agua**

Se conocen también como centrales de agua fluyente, son los que aprovechan el flujo del río mediante una toma y mediante canales se redirige hasta la central donde se instala la turbina. Después de obtener la energía eléctrica, el agua utilizada regresa al río y el proceso se repite [3].

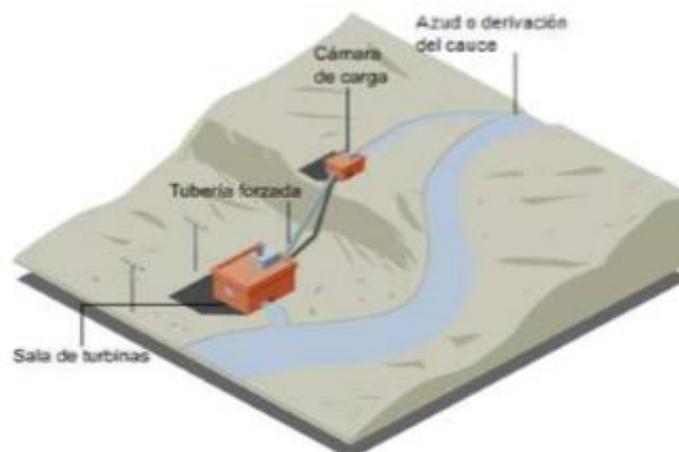


Figura 11 Centrales de pasada [3] Fuente: Castro, 2012.

#### **5.4.2. Centrales de embalse o regulación**

Se trata de la creación de un embalse o regulación que almacena el cauce del río. La característica principal de estas instalaciones es la regulación de caudal a la salida del agua, según la necesidad de la turbina empleada [3].

En este tipo de centrales consideran la sedimentación que se acumula en el tiempo en la parte inferior de los embalses, y necesitan de acciones para el degradado. Una ventaja de este tipo de instalaciones es que producen energía todo el año según la acumulación que exista [3].

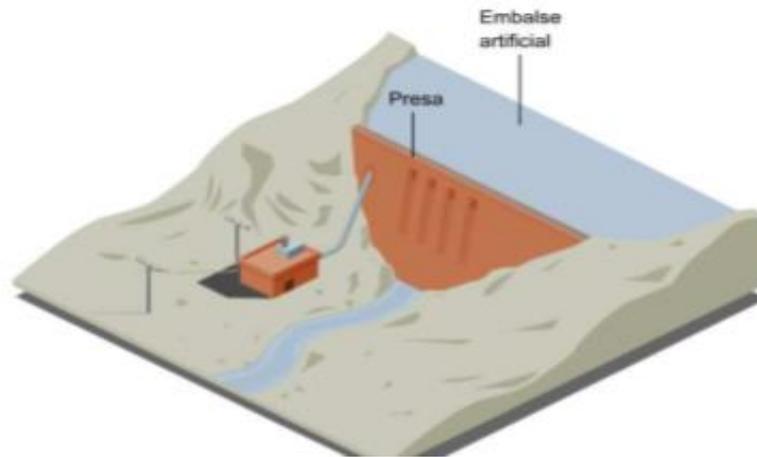


Figura 12 Centrales de embalse [3] Fuente: Castro, 2012.

#### 5.4.3. Centrales de regulación

Almacenan grandes volúmenes de agua en el embalse, que prolongan el uso del caudal anual a la turbina. Cuando existen bajos caudales la regulación es muy conveniente para la producción y cubrir horas punta de consumo [3].

#### 5.4.4. Centrales de almacenamiento por bombeo

El almacenamiento por bombeo se realiza por sistemas de bombas que toman agua de un embalse secundario y la elevan hasta el primario para generar potencia eléctrica. Si el flujo excede la potencia necesaria se apagan las bombas y se invierten los términos [3]. En la Figura 13 se muestra una central de este tipo.

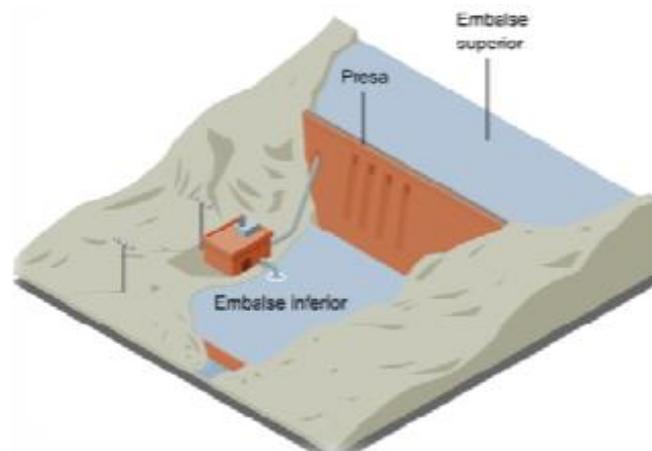


Figura 13 Centrales de almacenamiento por bombeo [3] Fuente: Castro, 2012.

Según el criterio de la altura del salto se pueden clasificar en distintos tipos de centrales, los cuales se mencionan a continuación de manera general.

#### 5.4.5. Centrales de alta presión

Estas instalaciones se conforman por salto hidráulico cuya altura debe ser superior a los 200 m, y los caudales son relativamente pequeños, 20 m<sup>3</sup>/s por máquina. Se emplean turbinas Pelton para máquinas motrices o turbinas Francis si la altura es menor. Son adecuadas para zonas montañosas [17].

#### 5.4.6. Centrales de media presión

Estas centrales de salto hidráulico se encuentran entre 20 y 200 m aproximadamente, con caudales de 200 m<sup>3</sup>/s por turbina. Se emplean turbinas Francis y Kaplan, y en ocasiones Pelton para saltos grandes [17].

#### 5.4.7. Centrales de baja presión

Dentro de estas centrales se utilizan tres tipos de turbinas, Kaplan, Hélice y Francis extra rápidas, se aplican para saltos inferiores a los 20 m. Cada máquina se alimenta de un caudal que puede superar los 300 m<sup>3</sup>/s [17].

### 5.5. Componentes principales de la hidroeléctrica

Para las micro y mini centrales hidroeléctricas en general la OLADE hace algunas recomendaciones acerca de los elementos que debe poseer y la forma de determinar los costos [18]. La tabla 2 muestra los componentes necesarios de una hidroeléctrica, su descripción y materiales sugeridos para la construcción.

Tabla 2 Principales elementos de una mini central hidroeléctrica [18] Fuente: Fernández, 2010

<b>PRINCIPALES ELEMENTOS DE UN MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA</b>	
<b>LISTA DE CONTROL</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Azud o Presa	Obra sobre el cauce principal del agua para almacenamiento y/o elevación de su nivel. En una M.C.H. generalmente se emplea para elevación de su nivel, construcción sencilla; MATERIALES: concreto, tierra, roca, madera, plásticos o combinaciones

Obras de Toma	Estructura para facilitar la entrada de agua al sistema de conducción. Puede ser sumergida o no. Para M.C.H. puede ser de construcción permanente o artesanal; MATERIALES: Concreto, mampostería, piedra lanzada (construcción artesanal)
Sistema de Conducción	Para el transporte de agua desde la toma hasta la cámara de carga, puede ser por medio de canales o túneles. En M.C.H. Es posible utilizar canales de regadío. CONSTRUCCIÓN: con y sin revestimiento.
Cámara de Carga	Estructura que facilita el ingreso del agua a la tubería de presión. MATERIALES: Concreto, concreto pobre, asbesto-cemento, ferrocemento.
Desarenador	Sistema para evitar el ingreso de partículas sólidas a la tubería de presión (Protección de la Turbina). Puede instalarse como parte de la obra de toma o la cámara de carga (según caudal, terreno, materiales de canal)
Accesorios de Obras Civiles	Rejillas (control de sólidos), compuertas, vertederos, etc.,
Tubería	Conducto por donde fluye el agua a presión desde la cámara de carga a la turbina
Casa de Máquinas	Estructura que aloja los grupos generadores, así como a los demás equipos electromecánicos
Canal de Fuga	Estructura de conducción que restituye el agua de la casa de máquinas a la fuente de donde fue tomada o a otra vecina
Turbina	Motor hidráulico que convierte la energía del agua (Salto o caída y caudal) en energía mecánica
Regulador de Velocidad	Servomecanismo que mantiene constante la velocidad de giro de la turbina y consecuentemente constante la frecuencia de la energía eléctrica generada. TIPOS; MECÁNICO: Casi no se emplea. OLEO MECÁNICO: esquema convencional. ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO: con regulación de caudal o disipación de energía.
Generador	Máquina eléctrica que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. TIPOS; ALTERNADOR (Generador Síncrono): más frecuentemente empleado en MCH; GENERADOR ASINCRONO (Motor eléctrico invertido):
Regulador de Tensión	Sistema electrónico que mantiene la tensión generada a un nivel constante.
Transformador	Equipo eléctrico para variar la tensión (voltaje) permitiendo el transporte de energía a distancias económicas.

Accesorios de Equipo	Válvula principal (compuerta o esférica)	Transmisión
Electromecánico	Turbina-Generador, por acoplamiento directo o por sistemas de transmisión (fajas en V, cadenas, engranajes).	Instrumentación hidráulica (manómetro).

---

## 5.6. Turbinas hidráulicas

El estudio de turbo máquinas hidráulicas no se toma en cuenta efectos térmicos. Sin embargo, esto no quiere decir que hay que dejar de lado conceptos termodinámicos. Se pretende estudiar los fenómenos de régimen permanente, los cuales se poseen una velocidad de rotación y un caudal, constantes.

En una máquina hidráulica, el agua intercambia energía con un dispositivo denominado rodete o rotor, el mismo que gira alrededor en su eje de simetría. Además, esta parte del mecanismo tiene álabes con unos espacios libres o canales, por los que circula el agua.

Una turbo máquina elemental cuenta, con una serie de álabes fijos que en su conjunto es denominado distribuidor. Por otra parte, álabes móviles (rueda, rodete, rotor), y finalmente un difusor [19].

### 5.6.1 Distribuidor

Es la parte de una maquina hidráulica, la cual se encuentra fija y la que es la encargada de dirigir el agua, desde la sección de entrada de la máquina hacia la entrada en el rodete, distribuyéndola alrededor del mismo, (turbinas de admisión total), o a una parte, (turbinas de admisión parcial), es decir, permite regular el agua que entra en la turbina, desde cerrar el paso totalmente, caudal cero, hasta lograr el caudal máximo [19].

### 5.6.2 Rodete

Es el elemento más importante de la turbina, se encuentra provisto de álabes en los que tiene lugar el intercambio de energía entre el agua y la turbo máquina.

Según la presión varíe o no en el rodete, las turbinas se clasifican de la siguiente forma:

- Turbinas de acción
- Turbinas de reacción

En las turbinas de acción el agua sale del distribuidor a la presión atmosférica, y llega al rodete con la misma presión. La energía potencial del salto se transmite al rodete en forma de energía cinética. En cambio, en las turbinas de reacción el agua sale del distribuidor con una cierta presión que decrece mientras el agua pasa por los álabes del rodete, razón por la cual, a la salida se posee una presión ser nula o incluso negativa. A su vez, en estas

turbinas el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete y, por lo tanto, la energía potencial del salto se transforma, una parte, en energía cinética, y la otra, en energía depresión.

El difusor o tubo de aspiración, es un conducto por el que se evacua el agua, el mismo que se va ensanchando progresivamente, puede ser recto o poseer un ángulo determinado, que sale del rodete y la conduce hasta el canal de fuga, lo que permite recuperar parte de la energía cinética a la salida del rodete para lo cual debe ensancharse. Un simple difusor cilíndrico permite su recuperación, que de otra forma se perdería. Si la turbina no posee tubo de aspiración, se la llama de escape libre [19].

### 5.6.3 Tipos de turbinas

Existen diferentes tipos de turbinas según su movimiento del rodete, las cuales pueden ser: Axiales, en donde el agua entra paralelamente al eje, como se observa en la Figura 14a. En las radiales, el agua entra perpendicularmente al eje (Figura 14.b) y tangenciales donde el agua entra lateral o tangencialmente contra los álabes del rodete, como se muestra en la Figura 14.c.

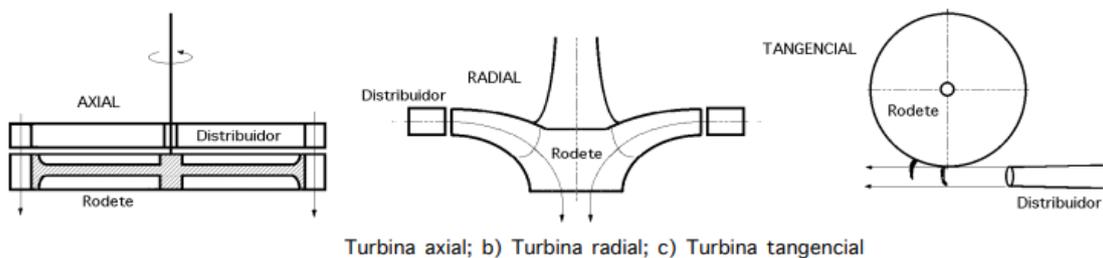


Figura 14 Movimiento de los álabes por entrada de agua [19] Fuente: Fernández, 2010

#### 5.6.3.1 Turbinas de reacción

- Turbina *Fourneyron* (1833), radial, en la que el rodete se mueve dentro del agua. Es una turbina con un rodete de gran diámetro. (Figura 15a) [19].
- Turbina Heuschel-Jonval, axial, y con tubo de aspiración; el rodete es prácticamente inaccesible y actualmente no se construyen. (Figura 15b) [19].
- Turbina Francis (1849), radial, con tubo de aspiración; el rodete es de fácil acceso, por lo que es muy práctica. Es fácilmente regulable y funciona a un elevado número de revoluciones. Además, es la turbina más empleada, y se utiliza en saltos variables, desde 0,5 m hasta 180 m, para velocidades, lentas, normales, rápidas y extra rápidas [19].

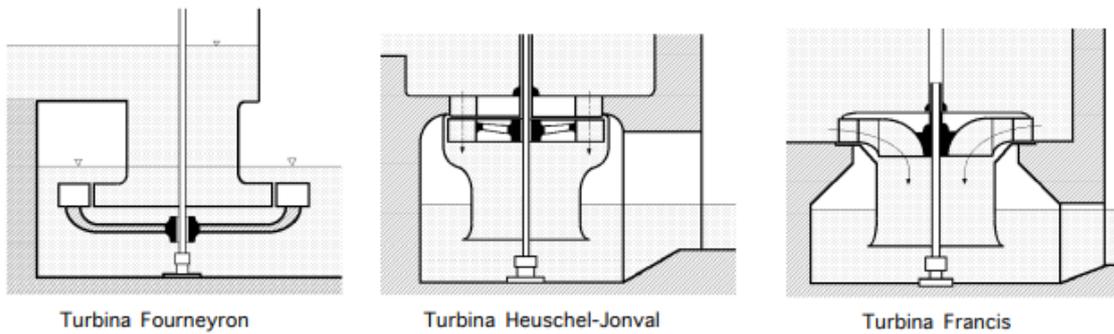


Figura 15 Turbinas de reacción [19] Fuente: Fernández, 2010

- Turbina Kaplan, las palas del rodete tienen forma de hélice; se emplea en saltos de pequeña altura, lo que da como resultado elevados rendimientos, con palas orientables con un paso variable. Si las palas son fijas, se denominan turbinas hélice. En la Figura 16 se muestra este tipo de turbina [19].

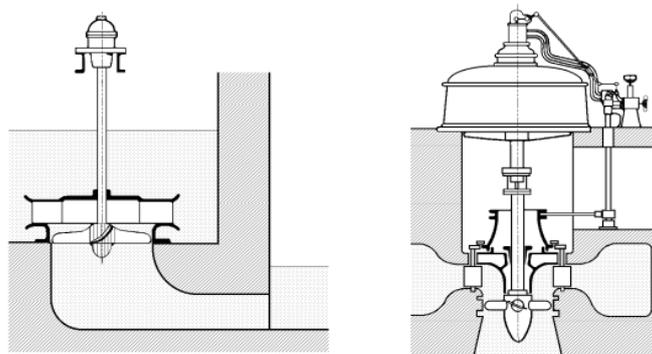


Figura 16 Turbina Kaplan [19] Fuente: Fernández, 2010

### 5.6.3.2 Turbinas de acción

Estas turbinas se empezaron a utilizar antes que las de reacción; entre ellas se tienen:

- Turbina Zuppinger (1846), con rueda tangencial de cucharas
- Turbina Pelton, es tangencial, y la más utilizada para grandes saltos, como se muestra en la Figura 17 [19], [20].

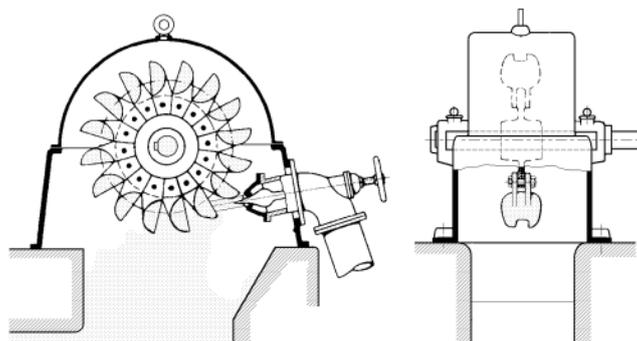


Figura 17 Turbina Pelton [19] Fuente: Fernández, 2010

- Turbina Schwamkrug, (1850), radial y centrífuga, ver Figura 18

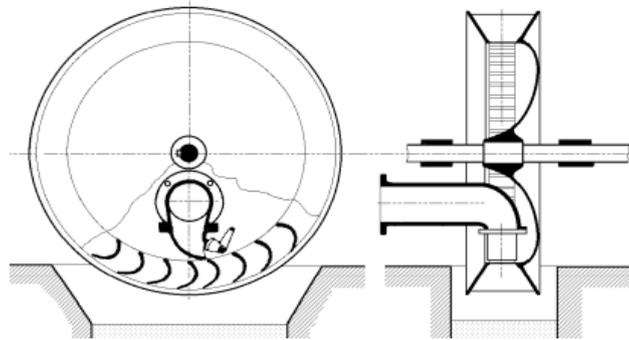


Figura 18 Turbina Schwamkrug [19]

Fuente: Fernández, 2010

- Turbina Girard, (1863), axial, con el rodete fuera del agua; mientras el cauce no subía de nivel, trabajaba como una de acción normal, mientras que, si el nivel subía y el rodete quedaba sumergido, trabajaba como una de reacción, aunque no en las mejores condiciones (Figura 19). Actualmente este tipo de turbinas no se emplean [19].

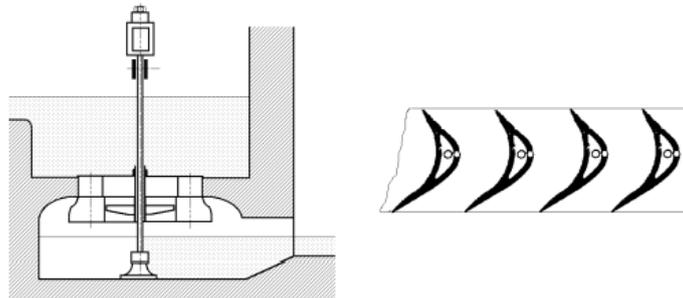


Figura 19 Turbina Girard [19] Fuente: Fernández, 2010

- Turbina Michel-Banki, en esta el agua pasa dos veces por los álabes del rodete, construido en forma de tambor, la misma se emplea para pequeños y grandes saltos. En la Figura 20 se muestra este tipo de turbina de acción [19].

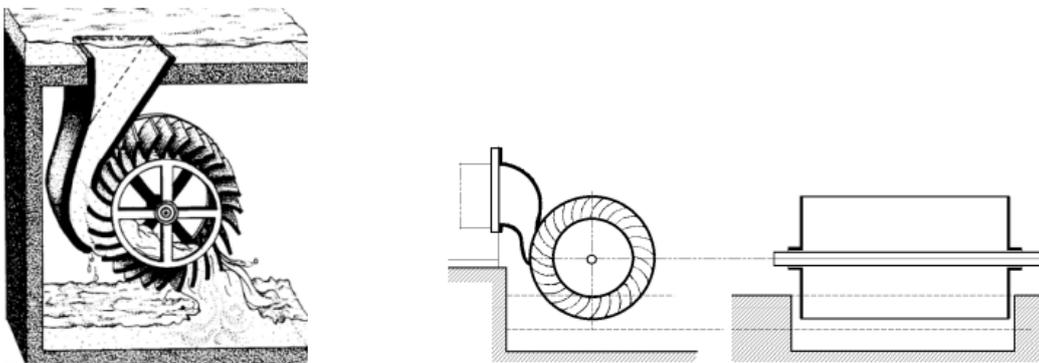


Figura 20 Turbina Banki [19] Fuente: Fernández, 2010

## 5.7. Obra civil y excavaciones

Al contar con el Rio Paute se procede a recoger los diferentes parámetros necesarios para el diseño de la central hidroeléctrica. Por lo tanto, se necesita como primer paso describir las obras civiles que inicialmente se consideran en una construcción de este tipo [3].

- Construcción de presa
- Compuertas y rejas
- Accesos a la central hidroeléctrica
- Tuberías de presión y desagüe

### 5.7.1. Movimientos de tierras

Son los necesarios para habilitar el redireccionamiento del cauce y posterior construcción de una presa de almacenamiento de agua, que garantice la circulación del caudal. Adicionalmente, sirven para habilitar la instalación eléctrica y la colocación de desagüe al final del ciclo [3].

### 5.7.2. Centro de máquinas

Es el lugar donde se instalan los equipos para que la central funcione, en este cuarto se colocan la turbina, el generador, transformador de potencia y todas las protecciones necesarias como son: cuadros de mando, equipos de control y protección, celdas de media tensión. Generalmente para este tipo de generadores se construye una habitación de 6 m de alto, para que facilite el mantenimiento de las máquinas y si es necesario el cambio de estas. En la parte superior deben estar ubicados aparatos de izaje para movilizar el equipo si necesita ser extraído. En la Figura 21 se muestra una sala de máquinas [3].



Figura 21 Cuarto de máquinas [3] Fuente: Castro, 2006.

Además, del cuarto de máquinas se dispone de una habitación para el transformador, la cual deberá contar con un mallado electro-soldado con conexión a tierra. Las puertas deberán estar cerradas y con acceso restringido.

### 5.7.3. Tuberías

Se colocan tuberías que enlazarán la presa construida con el edificio central, y debe ser la adecuada para transportar el caudal necesario. En la figura 22 se muestra tuberías que se emplean para este fin [3].



Figura 22 Tuberías [3] Fuente: Castro, 2006.

### 5.7.4. Vertedero

Son equipos que controlan el nivel de una presa, la cual va colocada en la entrada de la cámara de presión, para dirigir el agua al final del proceso. Estos elementos permitirán que la cámara tenga siempre un nivel máximo de agua, siendo necesario la ubicación de sistemas de control. En la Figura 23 se muestra un vertedero lateral con un canal de alimentación [3].



Figura 23 Vertedero lateral [3] Fuente: Castro, 2006.

### 5.7.5. Caudal

Es la cantidad de agua que llega a las turbinas, el mismo debe suministrar un determinado caudal concesional que sirva para el funcionamiento del equipo sin afectar el medio ambiente. Generalmente se necesita de un vertedero lateral para no afectar el caudal

ecológico de un río. Además, en centrales hidroeléctricas este parámetro es constante siempre por motivo de diseño [3].

## 6. Métodos y Materiales

En vista de que el objetivo del presente trabajo es diseñar un sistema hidráulico de generación eléctrica que posibilite cubrir la demanda energética de la empresa Plantaciones Malima, es indispensable en primera instancia analizar la demanda eléctrica de la empresa a fin de poder establecer la capacidad neta del sistema a diseñar.

Luego de esto, a través de un estudio hidrológico del sitio permitirá plantear las condiciones con las que se cuenta a fin de seleccionar la mejor tecnología a utilizar; con estos detalles se podrán desarrollar los cálculos correspondientes.

### 6.1. Estudio de la Demanda Energética

#### 6.1.1. Potencia Requerida

El estudio de la demanda energética se lo realiza en dos partes. Primero se estima la cantidad de potencia utilizada en la empresa. Este cálculo se realiza suponiendo que todos los equipos están en funcionamiento al mismo tiempo, es decir se sobrestima la demanda de potencia para que la turbina tenga un margen de seguridad, por recomendación este corresponde al 10% [17].

Tabla 3 Potencia de los equipos usados en plantaciones Malima Fuente: Hernández, 1985.

Descripción	Cantidad	Potencia en kW
Motor trifásico de 1 hp 220 V.	4	2,984
Motor monofásico 0,5 hp 220 V.	1	0,373
Motor monofásico 1 hp 220 v.	4	2,984
Motor trifásico de 1 hp 220 V.	16	11,936
Motor trifásico de 1 hp 220 V.	5	3,73
Motor trifásico de 1 hp 220 V.	6	4,476
Motor Trifásico de 2 hp 220 V.	1	1,492
Compresor refrigeración 5 hp trifásico 220 V.	1	3,73
Compresor refrigeración 12,5 hp trifásico 220 V.	5	46,625
Evaporadores monofásicos de 0,8 hp 220 V.	8	4,7744
Evaporadores monofásicos de 0,5 hp 220 V.	6	2,238
Motor monofásicos 3/4 hp 220 V.	2	1,119
Motor trifásicos 1 hp 220 V.	3	2,238
Motor trifásico 5 hp 220 V.	1	3,73
Motor trifásico 1-1/2 hp 220 V.	1	1,119
Motor monofásico 1 hp 220 V.	1	0,746
Motor trifásico 1/2 hp 220 V.	1	0,373
Motor monofásico 1 hp 220 V.	1	0,746

bombas trifásicas 40 hp 440 V.	2	59,68
Contenedores refrigerados 20 Hp 440 V.	2	29,84
Contenedores refrigerados 20 Hp 440 V.	6	89,52
Compresor de refrigeración 5 hp Trifásico 220 V.	1	3,73
Evaporador de 0,5 hp Monofásico 220 V.	1	0,373
Motor Trifásico de 1 Hp 220 V.	2	1,492
Motor trifásico 1 hp 220 V.	4	2,984
<b>Potencia total consumida (kW)</b>		<b>283,0324</b>

Como se puede observar en la Tabla 3, la suma de las potencias de todos los equipos instalados en plantaciones Malima es de 283,0324 kW. Es decir que usando un factor de disponibilidad del 10% se puede establecer que la capacidad para demanda está en el orden de los 300 kW.

### 6.1.2. Consumo Eléctrico

El consumo eléctrico es un parámetro de análisis que sirve para visualizar la energía requerida en una empresa a lo largo del tiempo. Analizando el consumo podemos determinar si la empresa tiene un crecimiento claro en la demanda energética que puede significar una necesidad de potencia mayor debido al crecimiento de la empresa. La Figura 24 muestra el consumo eléctrico de la empresa desde el año 2014 al año 2018.

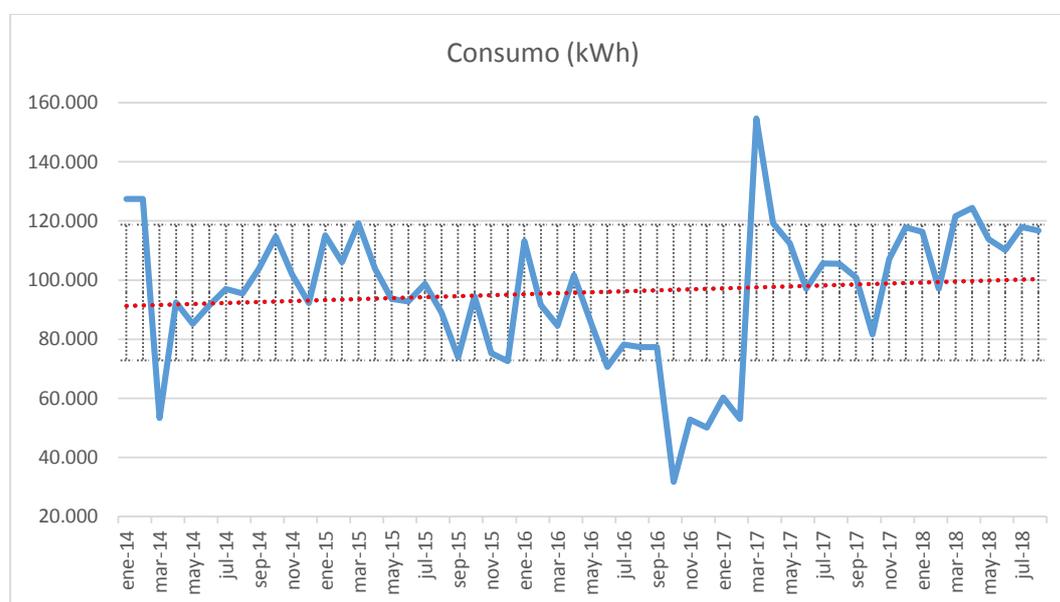


Figura 24 Consumo eléctrico de plantaciones Malima. Fuente: Autores

La Figura 24 y la Tabla 4 muestran claramente que hay meses en los cuales la demanda energética es mayor, debido a la mayor producción por la demanda temporal. Sin embargo, no se visualiza un crecimiento significativo de la demanda de energía eléctrica. Realizando un análisis estadístico a los valores de consumo energético mostrados en la

Tabla 4 se puede determinar parámetros importantes como el máximo histórico, desviación estándar, variación máxima y variación mínima con respecto a la media.

Tabla 4 Consumo energético de plantaciones Fuente: Malima (2014-2018)

Mes	Consumo (kWh)	Mes	Consumo (kWh)
ene-14	127.406	may-16	85.882
feb-14	127.406	jun-16	70.612
mar-14	53.390	jul-16	78.141
abr-14	92.428	ago-16	77.317
may-14	85.161	sep-16	77.317
jun-14	91.508	oct-16	31.718
jul-14	97.008	nov-16	52.782
ago-14	95.442	dic-16	50.069
sep-14	103.928	ene-17	60.306
oct-14	114.732	feb-17	53.003
nov-14	101.871	mar-17	154.655
dic-14	92.270	abr-17	119.290
ene-15	115.141	may-17	112.419
feb-15	106.092	jun-17	97.093
mar-15	119.262	jul-17	105.600
abr-15	103.826	ago-17	105.519
may-15	93.690	sep-17	100.878
jun-15	92.729	oct-17	81.667
jul-15	98.721	nov-17	107.128
ago-15	89.059	dic-17	117.843
sep-15	73.880	ene-18	116.280
oct-15	94.552	feb-18	97.103
nov-15	75.226	mar-18	121.648
dic-15	72.622	abr-18	124.447
ene-16	113.149	may-18	113.803
feb-16	91.590	jun-18	110.180
mar-16	84.592	jul-18	117.912
abr-16	101.684	ago-18	116.775,00

Con la muestra de datos obtenida, se puede realizar un análisis estadístico basado en el promedio y la desviación estándar. A continuación, se indica la fórmula del cálculo del promedio de consumo energético.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N c_i}{N} \quad (1)$$

$$\mu = 95.817 \text{ kWh}$$

Donde:

$\mu$ : Promedio general de la muestra

$c_i$ : Consumo energético mensual de la muestra (tabla 4)

N: Número de meses analizados

El resultado de la ecuación 1, muestra el consumo energético promedio de la empresa en el tiempo analizado, es decir durante los años 2014 a 2018. Sin embargo, no es suficiente para conocer el comportamiento del consumo en sus picos altos y bajos. Para esto se utiliza el cálculo de la desviación estándar mostrado a continuación.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N |c_i - \mu|^2}{N}} \quad (2)$$

$$\sigma = 22.780 \text{ kWh}$$

Donde:

$\sigma$ : Desviación estándar de la muestra

$\mu$ : Promedio general de la muestra (ecuación 1)

$c_i$ : Consumo energético mensual de la muestra (tabla 4)

N: número de meses analizados

El resultado de este cálculo indica la variación de los consumos energéticos con respecto a la media. En base a este resultado se puede calcular los límites máximos y mínimos de la muestra analizada.

$$\lim_{\max} = \mu + \sigma ; \lim_{\min} = \mu - \sigma \quad (3)$$

$$\lim_{\max} = 118.597 \text{ kWh}$$

$$\lim_{\min} = 73.037 \text{ kWh}$$

Donde:

$\lim_{\max}$  y  $\lim_{\min}$ : Límites máximo y mínimo de la muestra analizada

$\sigma$ : Desviación estándar de la muestra (ecuación 2)

$\mu$ : Promedio general de la muestra (ecuación 1)

Luego del cálculo de los resultados mostrado anteriormente se puede observar que la mayoría de los consumos mensuales se encuentran dentro del límite de la desviación

estándar y que el máximo histórico registrado es de 154.655 kWh, considerando un aproximado de 24 horas de consumo por 31 días mensuales, teniendo una cantidad de horas aproximadas de uso eléctrico en un mes de 744. A partir de esto se puede calcular su equivalente en potencia.

$$P_{\text{requerida}} = \frac{\text{lim}_{\text{max}}}{t} \quad (4)$$

$$P_{\text{requerida}} = 208,87 \text{ kW}$$

Donde:

$P_{\text{requerida}}$ : Potencia requerida por la plantación

$\text{lim}_{\text{max}}$ : Máximo consumo energético mensual estimado con la desviación estándar

$t$ : Tiempo estimado de consumo eléctrico

Esta potencia final calculada con la ecuación 4 corresponde a un valor estimado de potencia para el cual se está diseñando, lo que permite asegurar el suministro energético a la plantación. La tabla 5 resume los valores calculados para el análisis del consumo eléctrico.

Tabla 5 Análisis estadístico del consumo eléctrico Fuente: Autores.

Promedio (kWh)	95.817
Desviación Estándar	22.780
Límite Máximo	118.597
Límite Mínimo	73.037
Máximo Histórico	154.655

## 6.2. Estudio Hidrológico del Sitio

El estudio hidrológico del sitio consiste en la determinación de dos parámetros principales: el salto neto existente de acuerdo con la topografía del sitio y el caudal disponible.

### 6.2.1. Salto Neto Hidráulico

El cálculo del salto neto se ha ejecutado por medio de la utilización del software Google Earth, que es capaz de calcular los desniveles del terreno en un tramo determinado. Para esto se debe especificar las ubicaciones y los tramos de tubería desde el lugar de captación hasta la casa de máquinas como lo muestra la Figura 25. Aquí también se puede apreciar la ubicación de plantaciones Malima con respecto a los lugares elegidos.



Figura 25. Ubicaciones del lugar de captación y la hidroeléctrica. Fuente: Google Earth, 2019

Luego de estimar el posible trazado del tramo de tubería se procede a estimar el salto hidráulico con la herramienta de elevación que posee Google Earth como se muestra en la Figura 26.



Figura 26 Perfil de elevación en el sitio. Fuente: Autores

A partir de la Figura 26 podemos determinar el salto neto hidrológico como la resta entre la altura de captación y la altura de central hidráulica como se muestra en la ecuación 2 [3].

$$H_n = H_{\text{captacion}} - H_{\text{central}} = 27 \text{ m} \quad (5)$$

### 6.2.2. Caudal Hidrológico

La determinación del caudal hidrológico es la una parte crucial en el diseño de una central hidráulica, para realizar la toma de datos existen varios procedimientos que varían en su precisión. La Organización Latinoamericana de Energía OLADE propone un procedimiento para la determinación de caudal en zonas con ausencia de datos que

consiste en reducir al mínimo los estudios de reconocimiento físico, debido a su elevado costo en relación de la inversión. Este procedimiento consiste en recoger datos de estaciones meteorológicas cercanas, como es este caso y estimar el caudal hidrológico de las sub-cuencas en las que se plantea colocar el proyecto [21]. En este estudio se utilizan los datos entregados por la central hidrológica H0894 instalada en el río Paute para suministrar datos al complejo hidroeléctrico Paute Integral (Figura 27). Esta estación resulta ser la más cercana al sitio de estudio [22].



Figura 27 Ubicaciones del proyecto de generación y de la central hidrológica. Fuente: Autores

En la Figura 27 se puede observar que la central hidrológica se encuentra en el cauce del río Paute. Sin embargo, el presente estudio está realizado para uno de sus afluentes (río Cuenca). Con esta observación en mente, el cálculo del caudal se realiza suponiendo que el caudal del río Cuenca es el 50% del caudal del río Paute, debido a que los dos afluentes del río Paute tienen aproximadamente la misma sección transversal (3m) como se puede observar en la figura 28.



Figura 28 Afluentes del río Paute. Fuente: Autores

### 6.2.3. Caudal medio

El caudal medio representa la media de los caudales máximos y mínimos presentados en la serie de tiempo. Los datos de los caudales diarios en la estación hidrológica H0894 se presentan en la Figura 29. Podemos observar que el caudal medio durante el año 2018 es 34 m<sup>3</sup>/s y el caudal mínimo es 2 m<sup>3</sup>/s.

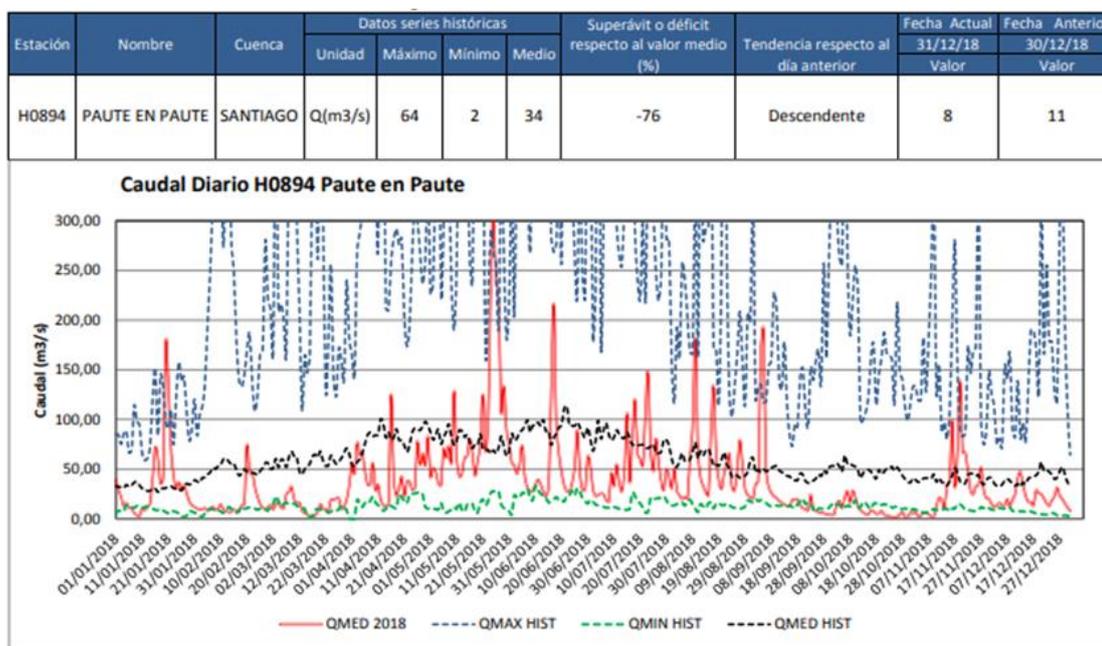


Figura 29 Caudal diario de la estación H0894 [22] Fuente: INAMHI, 2018

En la Tabla 6 se muestra un resumen de los caudales presentes en los ríos Paute y Cuenca, calculados con la suposición explicada anteriormente. El caudal medio es la base del cálculo del caudal disponible.

Tabla 6 Caudales en los ríos Paute y Cuenca en el 2018 Fuente: Autores.

Río	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Año 2018
Paute	Mínimo	2
Paute	Medio	34
Cuenca	Mínimo (considerando 50%)	1
Cuenca	Medio (considerando 50%)	17

### 6.2.4. Caudal de Equipamiento

El caudal de equipamiento se define como el caudal necesario para que el volumen turbinado sea máximo, en este caso corresponde al 70% del caudal medio [3].

$$Q_{eq} = Q_m * 70\% \quad (6)$$

$$Q_{eq} = 11,9 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde:

$Q_{eq}$ : Caudal de equipamiento ( $m^3/s$ )

$Q_{dis}$ : Caudal disponible ( $m^3/s$ )

$Q_m$ : Caudal medio ( $m^3/s$ )

### 6.2.5. Caudal Ecológico

El caudal ecológico es el mínimo caudal necesario para preservar el ecosistema en el cauce ecológico, el valor puede ser determinado de acuerdo a recomendaciones de otros proyectos [3], [17], de acuerdo a lo siguiente:

$$Q_e = Q_{eq} * 25\% \quad (7)$$

$$Q_e = 2,97 \text{ m}^3/s$$

Donde:

$Q_e$ : Caudal ecológico ( $m^3/s$ )

$Q_{eq}$ : Caudal de equipamiento ( $m^3/s$ )

### 6.2.6. Caudal Disponible

El caudal disponible final para la producción eléctrica es la resta del caudal de equipamiento menos el caudal ecológico, por lo tanto [3].

$$Q = Q_{eq} - Q_e \quad (8)$$

$$Q = 8.93 \text{ m}^3/s$$

### 6.3. Preselección de la Turbina

La preselección consiste en elegir las turbinas que cumplan con los parámetros necesarios. Posteriormente se selecciona la mejor opción basándose en criterios de rendimiento, costo y mantenimiento. Los datos de caudal disponible y altura neta calculados mediante las ecuaciones 1 y 2 sirven como entrada para seleccionar las opciones posibles que se presentan en la Figura 30. En este caso las turbinas preseleccionadas corresponden a las turbinas de flujo cruzado (Michelle-Banki/Ossberger), Francis, y Kaplan [3], [17].

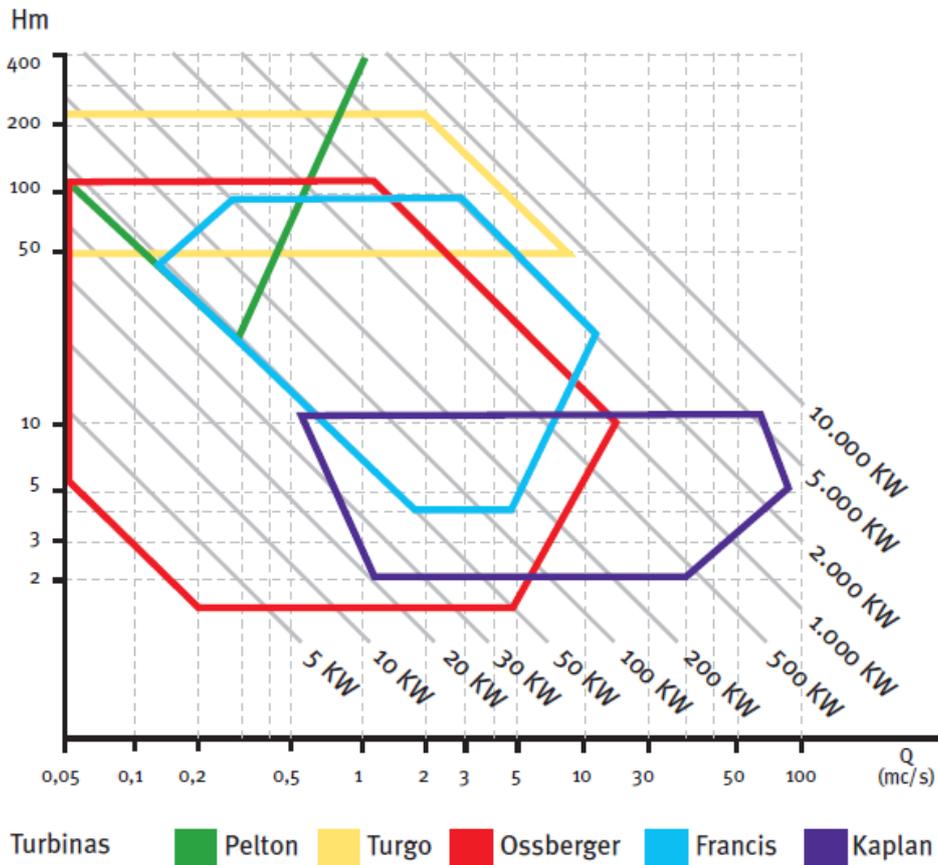


Figura 30 Diagrama de selección de turbinas [3] Fuente: Castro, 2006.

### 6.3.1. Análisis de ventajas y desventajas

Para efectuar este análisis ha sido necesario establecer un criterio de ponderación que tomará en cuenta los parámetros de facilidad de construcción, costo de implementación y facilidad de mantenimiento, tal como lo muestra la Tabla 7.

Tabla 7 Criterios de selección de las turbinas Fuente: Autores.

Criterios de Selección	
I	Facilidad de construcción y mantenimiento
II	Costo de implementación
III	Eficiencia para caudales variables

Los criterios de costo, construcción y mantenimiento se los evaluó tomando en cuenta las recomendaciones hechas por la OLADE [21]. El criterio de rendimiento fue evaluado usando las gráficas de la Figura 31 [3].

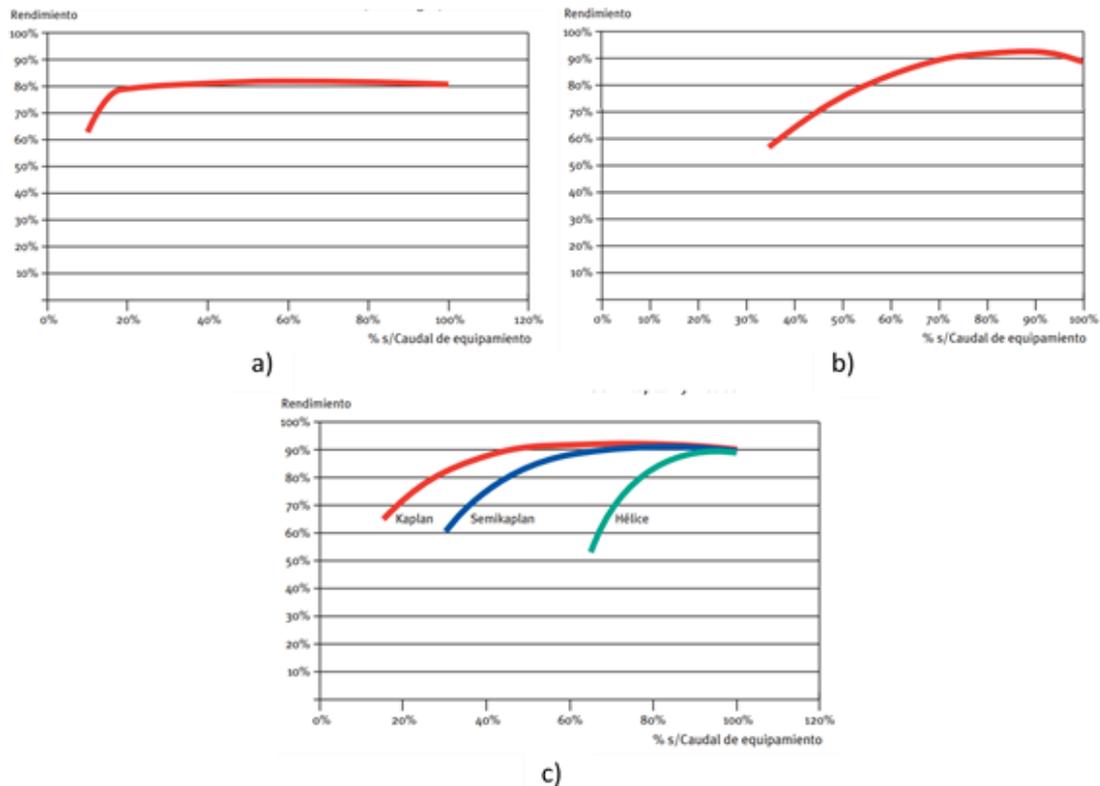


Figura 31 Comparación de rendimientos de turbinas; a) Michelle-Banki, b) Francis, c) Kaplan, Semikaplan y Hélice. Fuente: Autores.

La ponderación se realizó con el método de matrices cuadradas. Este método consiste en asignar un valor de decisión entre 1 y 10 a cada criterio de selección (columnas I, II y III) correspondiente a las alternativas individuales (filas A, B y C). Luego se calculan los porcentajes de los criterios de acuerdo con la importancia que se asigne en la ponderación. La importancia es determinada por la evaluación de los criterios técnicos y necesidades específicas. En este caso se considera que la facilidad de construcción y el costo de implementación tienen la misma importancia (30%) y la eficiencia para caudales variables es el criterio de mayor importancia (40%). Finalmente se pondera porcentualmente cada una de las alternativas de acuerdo con los criterios señalados y se suman los resultados. La alternativa con mayor resultado en la suma de ponderaciones es la ganadora como se muestra en las Tablas 8 y 9.

Tabla 8 Ponderación de las alternativas de turbinas Fuente: Autores.

Criterios de Selección				
Alternativas	I	II	III	Ponderación
A (Turbina Francis)	10	7	5	30
B (Turbina Kaplan)	10	8	5	30
C (Turbina Michelle-Banki)	10	10	8	40
$\Sigma$	30	25	18	100

Tabla 9 Resultado de la ponderación Fuente: Autores.

<b>Criterios de Selección</b>						
<b>Alternativas</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>Ponderación</b>		
A (Turbina Francis)	0,3333	0,28	0,2778	0,3	I	A= <b>29,51</b>
B (Turbina Kaplan)	0,3333	0,32	0,2778	0,3	II	B= <b>30,71</b>
C (Turbina Michelle-Banki)	0,3333	0,4	0,4444	0,4	III	C= <b>39,78</b>
	1	1	1	1		100

Como se puede observar, la opción C correspondiente a la turbina Michelle-Banki es la mejor opción, por lo que esta turbina es la preseleccionada ya que cumple con las condiciones establecidas.

#### 6.4. Esquema de la Central Hidroeléctrica

El esquema de construcción de la central recomendada depende del rango de generación en el que se encuentre y su clasificación. Según la OLADE [17] la clasificación de los proyectos hidroeléctricos en Latinoamérica se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 Clasificación de las centrales hidroeléctricas [17] Fuente: Hernández, 1985.

	Rango de Potencia (kW)	Salto (m)		
		Bajo	Medio	Elevado
Microcentrales Hidroeléctricas	hasta 50	menos de 15	15-50	más de 50
Minicentrales Hidroeléctricas	50-500	menos de 20	20-100	más de 100
Pequeñas Centrales Hidroeléctricas	500-5000	menos de 25	25-130	más de 130

Como se puede observar, de acuerdo con el rango de potencia (300 kW) y el salto neto calculado (27 m), el presente estudio es clasificado como un proyecto de mini-central hidroeléctrica con salto medio.

##### 6.4.1. Tipo de emplazamiento

El tipo de emplazamiento también es otra forma de clasificar a las centrales hidroeléctricas. En general existen tres tipos de emplazamientos comunes: Central Fluyente, Central de Pie de Presa y Central de Conducción [3]. La selección del tipo de emplazamiento puede depender de varios factores, entre los cuales el factor económico y caudal de diseño son los más importantes. En nuestro caso el caudal de diseño calculado en la sección 6.2.6 sugiere que la mejor alternativa es una central de agua fluyente, ya que

el caudal de diseño es menor que el caudal disponible calculado. El esquema de este tipo de central se muestra en la Figura 32.

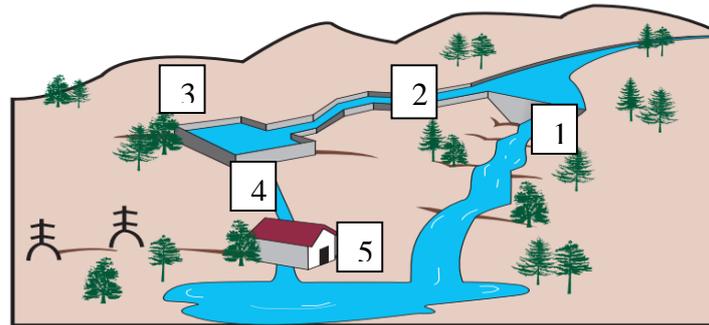


Figura 32 Central Hidroeléctrica de tipo Fluyente [3] Fuente: Castro, 2006.

Los elementos que constituyen la central fluyente se indican a continuación.

1. Azud
2. Canal de derivación
3. Cámara de carga o captación
4. Tubería forzada
5. Edificio central y equipamiento electromecánico

La desviación del caudal del río por medio del emplazamiento de un azud, representa la configuración que ayuda a ahorrar costos de construcción y evita problemas de mantenimiento [3], [17].

#### 6.4.2. Ubicación geográfica de la central

En la Figura 25 se muestra la ubicación geográfica elegida para el lugar de captación y la central hidroeléctrica. Estas ubicaciones se eligieron debido a que el tramo trazado está dentro de la propiedad de plantaciones Malima, además que son las zonas en donde se tiene el salto neto del río Cuenca más grande, por lo que se tiene un recurso energético disponible cercano a las instalaciones de la empresa.

#### 6.5. Pérdidas Mayores y Menores

El cálculo de las pérdidas producidas en la captación y conducción del agua a la casa de máquinas es de vital importancia en el cálculo de la potencia entregada por la turbina. La energía aprovechable se pierde debido a la fricción con la tubería y accesorios necesarios en el tramo de tubería.

Los cálculos de fricción tienen varias metodologías propuestas [23], [24]. En este trabajo se hace uso del software Pipe Flow Expert v7.40 para realizar los cálculos de pérdidas, ya que dicho programa permite realizar un esquema de la tubería, establecer parámetros de entrada en los nodos y presenta los resultados de manera visual, además de un reporte con todos los cálculos realizados.

### 6.5.1. Esquema de tubería y parámetros iniciales

La disposición de la tubería forzada se basa en las ubicaciones geográficas mostradas en la Figura 25. Al partir del sitio de captación, se requiere 3 tramos de tubería para llegar al lugar de casa de máquinas como se muestra en la Figura 33.

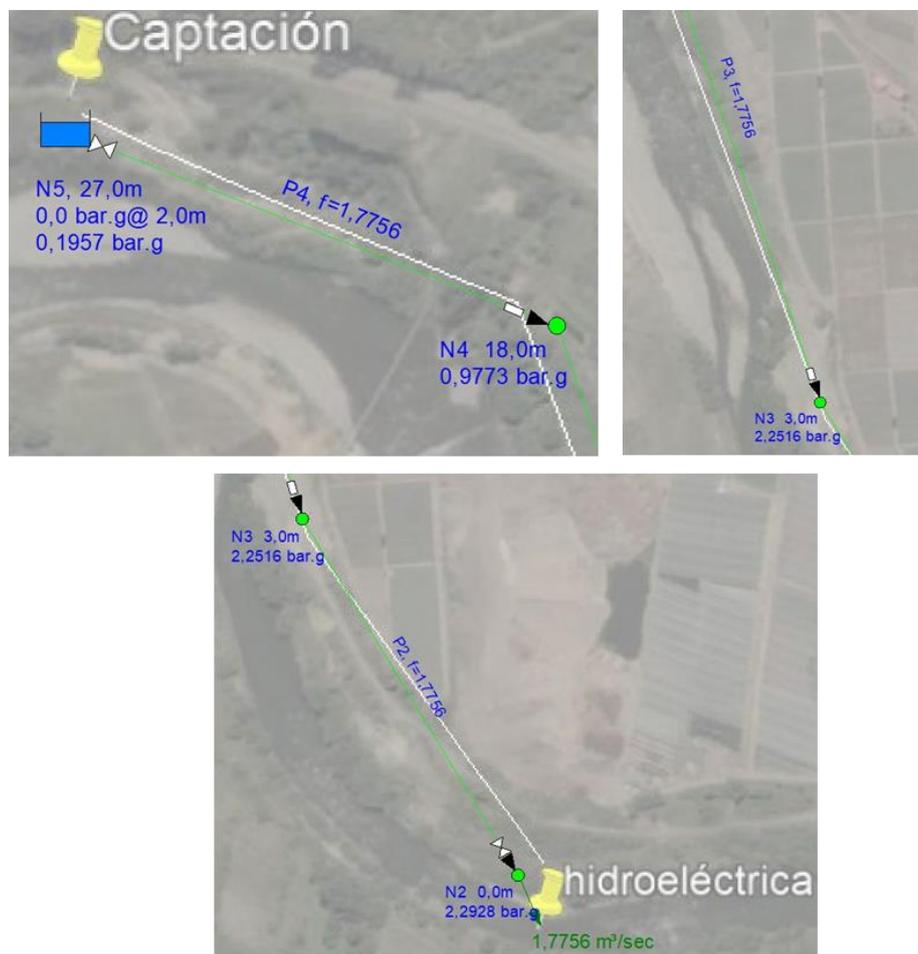


Figura 33 Tramos de la tubería de presión Fuente: Autores.

La altura especificada en los nodos se basa en los datos del perfil de elevación mostrados en la Figura 26. Por lo tanto, el nodo 5 es el lugar de captación a 27 m de altura, el nodo 4 es la terminación del primer tramo de tubería a 18 m, el nodo 3 es la terminación del segundo tramo a 3 m y el nodo 2 corresponde al nivel de referencia a 0 m.

### 6.5.2. Caudal de diseño preliminar

El caudal de diseño preliminar establece el caudal necesario para producir la potencia de 300 kW establecida con el estudio de la demanda energética, por lo tanto:

$$P_T = \frac{P_g}{\eta_g \eta_{tr}} \quad (9)$$

Donde:

Pt: Potencia al freno de la turbina

Pg: Potencia máxima entregada por el generador al sistema eléctrico (300 kW)

ng: Eficiencia de un generador de 300 kW (93%)

ntr: Eficiencia del sistema de transmisión (95%)

Por lo tanto, la potencia al freno resultante en el caso de esta central hidroeléctrica es de 339,56 kW. Con esta potencia se puede calcular el caudal de diseño preliminar utilizando la altura de salto neto calculada en la sección 6.2.1 con la siguiente fórmula [17].

$$Q_d = \frac{P_T}{\gamma H_n \eta_t} \quad (10)$$

$$Q_d = 1,5854 \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde:

Qd: Caudal de diseño preliminar (m<sup>3</sup>/s)

Pt: Potencia al freno (kW)

γ: Peso específico del agua (kN/m<sup>3</sup>)

nt: Eficiencia de la turbina (0.78 turbina Banki)

Con este cálculo obtenemos el caudal preliminar de diseño que se utiliza como dato de entrada para el cálculo del diámetro de la tubería en la siguiente sección.

### 6.5.3. Selección del diámetro de tubería

El diámetro de la tubería depende de varios parámetros relacionados con el diseño, es por esto que se realiza una selección preliminar utilizando el diagrama de la Figura 34 y luego verificando la velocidad del fluido y pérdidas, se realiza los ajustes necesarios para seleccionar el diámetro adecuado.

### Diámetro de la tubería en función del caudal

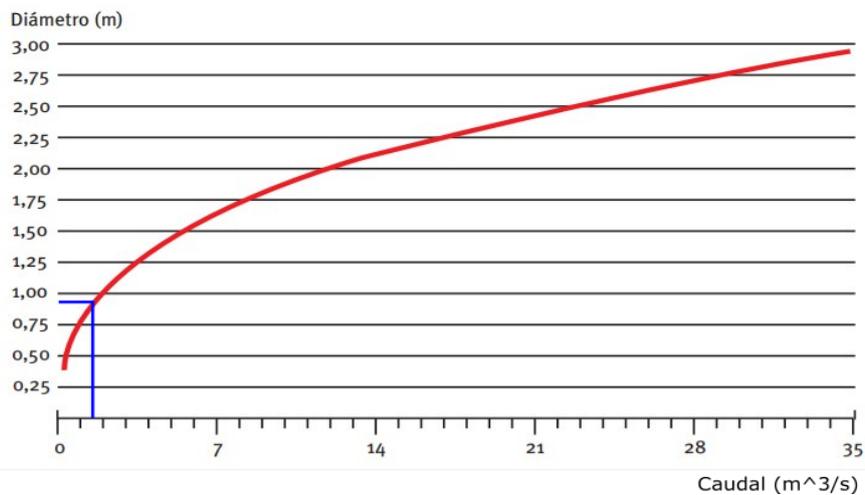


Figura 34 Diagrama de diámetro de tubería en función del caudal [3] Fuente: Castro, 2006.

Para el caudal de diseño de  $1,5854 \text{ m}^3/\text{s}$  calculado con la ecuación 7, se puede observar que el diagrama nos entrega un diámetro preliminar cercano a un metro. Este valor de diámetro permite tener una primera estimación que será corregida más adelante con los valores de las pérdidas y los diámetros de tubería nominales disponibles en el mercado.

#### 6.5.4. Ingreso de datos iniciales de cálculo

El software Pipe Flow Expert posee una interfaz intuitiva para el ingreso de los datos necesarios en el cálculo de pérdidas mayores y menores. En la Figura 35 se puede observar el método de ingreso de datos de la captación y la tubería. La captación puede ser simulada como un tanque en el que se indica el nivel del líquido y la altura de instalación. Para las tuberías los datos de entrada son la longitud, el diámetro interno (puede ser escogido con un catálogo integrado) y la rugosidad (depende del material seleccionado en una base de datos incorporada).

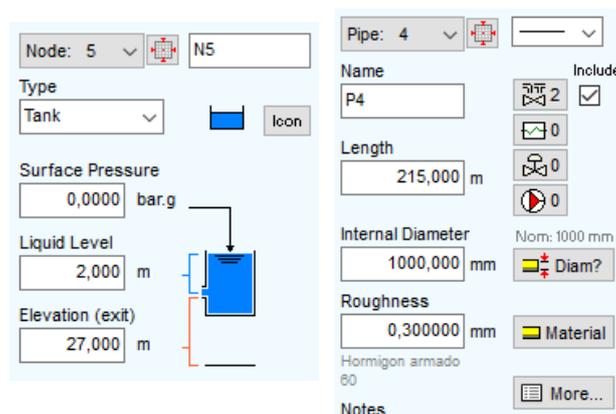


Figura 35 Ingreso de datos de la captación y tubería. Fuente: software Pipe Flow

### 6.5.5. Base de datos de tubería

El software Pipe Flow Expert presenta una librería muy extensa de tuberías de acuerdo al material y el diámetro seleccionados. Cada elemento de la librería indica los parámetros nominales de fabricación de acuerdo a normas. Además si un elemento no se encuentra en la base de datos, puede ser añadido manualmente. La Figura 36 muestra la ventana de selección de material y el diámetro en el programa.

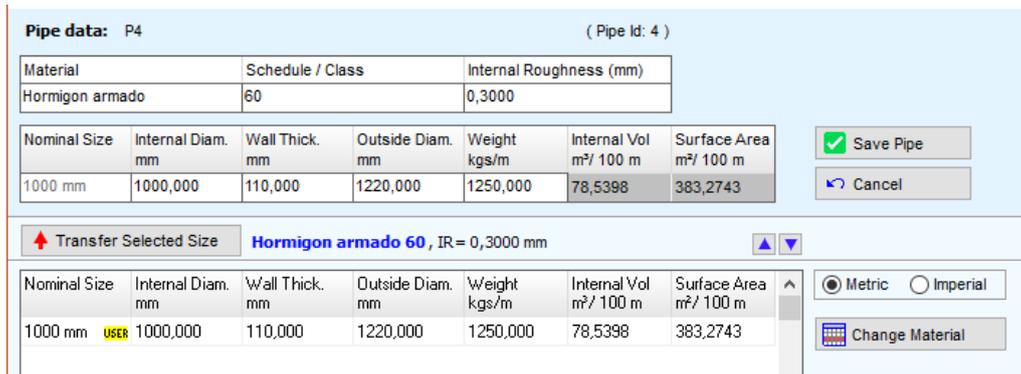


Figura 36 Selección de diámetro y material en Pipe Flow Expert. Fuente: software Pipe Flow

### 6.5.6. Base de datos de accesorios

Pipe Flow Expert además ofrece la posibilidad de agregar cualquier tipo de accesorio a la tubería, entre estos se incluyen codos, válvulas, elementos de control, geometrías de ingreso, etc. Cuando un elemento elegido en el sistema de análisis no se encuentra en la base de datos se puede ingresar uno nuevo con su respectivo coeficiente de pérdida, tal y como lo muestra la Figura 37.

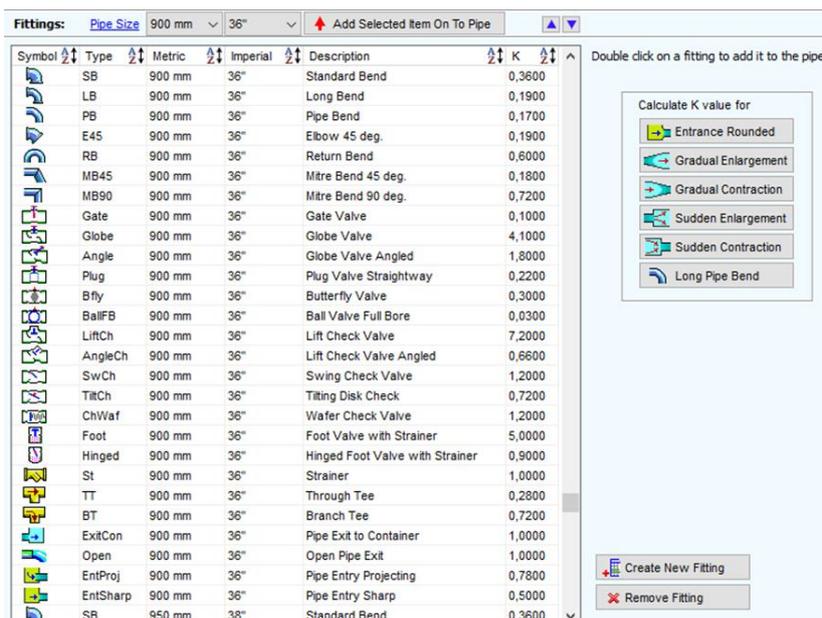


Figura 37 Selección de accesorio en Pipe Flow Expert. Fuente: Pipe Flow.

### 6.5.7. Fluido de trabajo

Pipe Fluid Expert es capaz de realizar cálculos para diferentes fluidos de trabajo, incluidos fluidos compresibles e incompresibles, para el caso de este proyecto el fluido de trabajo es agua a temperatura ambiente y presión atmosférica, como lo muestra la Tabla 11.

Tabla 11 Datos del fluido de trabajo

Nombre del Fluido	Formula Química	Temperatura °C	Presión bar <sub>g</sub>	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Presión de vapor bar <sub>a</sub>	Estado
Agua	H <sub>2</sub> O	20	0	998	0,024	Líquido

### 6.5.8. Materiales de tuberías

El material para las tuberías es seleccionado en base del catálogo, el dato de entrada utilizado es el diámetro preliminar calculado en la sección 6.5.3 (menor a 1 m). Con este dato, podemos seleccionar la tubería del catálogo entregado. En este caso se seleccionó una tubería de PVC con diámetro nominal de 900 mm y cédula DR 32.5 (tabla 12).

Tabla 12 Material de las tuberías. Fuente: Autores.

Nombre de la tubería	Tamaño nominal	Material	Cédula	Rugosidad	Diámetro interno	Espesor	Diámetro externo	Longitud
			Clase	mm	mm	mm	mm	m
P2	1000 mm	Hormigón armado	60	0,3	1000	110	1220	247
P3	1000 mm	Hormigón armado	60	0,3	1000	110	1220	453
P4	1000 mm	Hormigón armado	60	0,3	1000	110	1220	215

### 6.5.9. Accesorios en el sistema

En el caso de los accesorios, el esquema propuesto necesita dos codos para el cambio de dirección, una válvula de compuerta en la cámara de carga para evitar el desbordamiento, y una válvula de globo antes del ingreso a la tubería para realizar mantenimiento. Los datos de estos accesorios fueron tomados del catálogo de Pipe Flow Expert y se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Accesorios del sistema. Fuente: Autores.

Tubería	Posición en la tubería	Descripción	Tamaño	Valor de K	Cantidad	K Total
P2	Fin de tubería	Válvula de globo	900 mm	4,1	1	4,1

P3	Fin de tubería	Codo 45°.	900 mm	0,19	1	0,19
P4	Inicio de tubería	Válvula de compuerta	900 mm	0,1	1	0,1
P4	Inicio de tubería	Entrada a la tubería	900 mm	0,78	1	0,78
P4	Fin de tubería	Codo 45°	900 mm	0,19	1	0,19

### 6.5.10. Resultados en tuberías

Con los datos ingresados se puede proceder con el cálculo de pérdidas, velocidades y presiones. Pipe Flow Expert realiza un cálculo iterativo que lleva a la solución con menor error para el sistema ingresado. Los resultados en los tres tramos de tubería propuestos se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14 Resultados para los tramos de tubería forzada. Fuente: Autores.

<b>Id de la tubería</b>	<b>Rugosidad Interior</b>	<b>Long.</b>	<b>Número de Reynolds</b>	<b>Tipo de Flujo</b>	<b>Factor de Fricción</b>	<b>Factor K entrada</b>	<b>Factor K salida</b>
	mm	m					
P2	0,3	247	2251739	Turbulento	0,015266	ninguno	ninguno
P3	0,3	453	2251739	Turbulento	0,015266	0	0,19
P4	0,3	215	2251739	Turbulento	0,015266	0,1	0,19

### 6.5.11. Resultados en nodos

Pipe Flow Expert también entrega resultados en los nodos de conexión en los que se puede observar la presión final luego de restar las pérdidas del sistema, En nuestro caso el nodo de salida corresponde al N2 y entrega una altura final de 24,273 m luego de restar las pérdidas mayores y menores. La Tabla 15 resume los resultados en todos los nodos junto con su presión.

Tabla 15 Resultados para los nodos del sistema. Fuente: Autores.

<b>Tipo de Nodo</b>	<b>Nodo</b>	<b>Elevación</b>	<b>Nivel del líquido</b>	<b>Presión en la superficie</b>	<b>Presión en el nodo</b>	<b>HGL en el nodo</b>	<b>Demanda de caudal</b>
		m	M	bar.g	bar.g	m.hd Fluid	m³/s
Unión	N2	0	N/A	N/A	2,4697	25,235	1772,0488
Unión	N3	3	N/A	N/A	2,2723	26,217	0
Unión	N4	18	N/A	N/A	0,9855	28,069	0
Tanque	N5	27	2	0	0,1957	29	N/A

## 6.6. Confirmación de la selección

Las pérdidas calculadas en la sección anterior nos permiten obtener los resultados exactos de los cálculos hidráulicos correspondientes al caudal de diseño y altura aprovechable. Con estos datos se puede confirmar la selección de la turbina y determinar más adelante los parámetros geométricos.

### 6.6.1. Altura aprovechable después de pérdidas

La altura aprovechable se calcula restando la altura neta menos la suma de pérdidas mayores y menores en el sistema. El resultado se obtiene directamente con el programa Pipe Flow Expert en el nodo 2 (nodo de referencia), el cual se puede observar en la Tabla 12.

$$H = H_n - H_{\text{pérdidas}} = 25,235 \text{ m} \quad (11)$$

Donde H es el salto aprovechable expresado en metros.

### 6.6.2. Caudal de diseño de acuerdo con la demanda

El caudal de diseño entregado en este caso es el mismo que el preliminar, ya que la central está diseñada para que supla la demanda de caudal necesaria para producir los 300 kW necesarios en el generador.

$$Q_d = 1,5854 \text{ m}^3/\text{s} \quad (12)$$

### 6.6.3. Número de Revoluciones

Otro parámetro necesario para el diseño de la turbina lo constituye el número óptimo de revoluciones con que deberá operar la turbina, que se deduce de la fórmula [17].

$$N = \frac{39.85 H^{1/2}}{D_e} \quad (13)$$

En donde:

N: número de revoluciones óptimas en RPM

De: diámetro exterior del rodete, en metros

H: salto neto aprovechable, en metros

Para la aplicación de la micro central hidroeléctrica es recomendable elegir un generador asíncrono debido al menor costo [3], En este caso la metodología sugiere que se asuma

un diámetro exterior de rodete. En este caso se asume un diámetro de 0.4 m de acuerdo con las turbinas Banki estandarizadas [17].

Tabla 16 Dimensiones estandarizadas de turbinas Banki [17]. Fuente: Hernández, 1985.

Cota (mm)	Diámetro de Rodete - De (mm)			
	300	400	500	600
Di	100	133	167	200
Re	110	147	183	220
Re	49	65	82	98

Por lo tanto, el número de revoluciones óptimas resulta:

$$N \approx 527 \text{ rpm}$$

#### 6.6.4. Números Específicos de Revoluciones

La turbina Michell-Banki es una de las turbinas que presenta mejores perspectivas de utilización en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Su rango de aplicación lo definen los números específicos de revoluciones  $N_q$  y  $N_s$ , los cuales se obtienen con las fórmulas siguientes [17]:

$$N_q = N \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}} \quad (14)$$

$$N_q = 56.02$$

$$N_s = N \frac{P^{1/2}}{H^{5/4}} \quad (15)$$

$$N_s = 182.73$$

Donde:

P: potencia al freno de la turbina en C.V

Q: caudal máximo que fluye por la turbina en m<sup>3</sup>/s

H: salto neto de la central en metros

N: velocidad de giro de la turbina en RPM

De acuerdo con los resultados se puede utilizar lo presentado en la Tabla 17, misma que muestra el rango de aplicación de los diferentes tipos de turbina de acuerdo con sus revoluciones específicas. Estos rangos se han definido en base a las limitaciones de su diseño mecánico en el límite superior y la eficiencia en el rango inferior [17]. La tabla 17 confirma además que la turbina Banki es la elección correcta para la aplicación presente.

Tabla 17 Tipos de Turbinas [17] Fuente: Hernández, 1985.

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

## 6.7. Parámetros Geométricos

Las geometrías de construcción del rodete y del inyector de la turbina Banki varían dependiendo del tipo de inyector seleccionado. Sin embargo, los parámetros principales pueden ser calculados en base a una selección estandarizada y los cálculos hidráulicos realizados anteriormente [17].

### 6.7.1. Selección del Inyector

Para definir la geometría del inyector es necesario considerar en el diseño una buena conducción y aceleración del flujo de agua, así como también una adecuada orientación y regulación de este flujo hacia los álabes del rodete. La elección considerada en este estudio es la recomendada en [17], que señala al inyector horizontal de dos compartimientos como el que produce el mejor rendimiento en rango más amplio de caudales como se puede observar en la Figura 38.

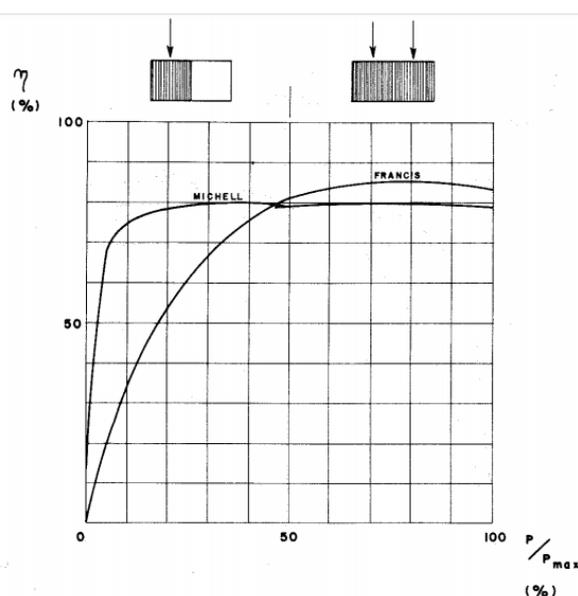


Figura 38 Rendimiento turbina Michelle - Banki para un inyector con 2 compartimientos [17]. Fuente: Hernández, 1985.

La Figura 39 muestra la geometría del inyector seleccionado con sus respectivas cotas de construcción que dependen del diámetro exterior del rodete asumido.

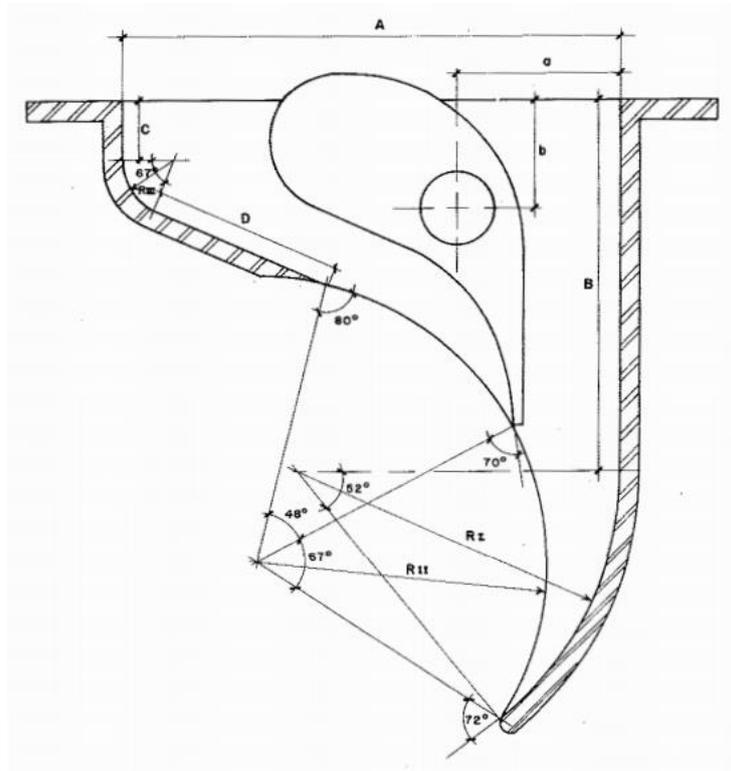


Figura 39 Geometría del inyector de dos compartimientos [17] Fuente: Hernández, 1985.

La Tabla 18 muestra las cotas definidas en la Figura 39 para diferentes diámetros exteriores de rodete, de acuerdo a una suposición, las cotas correspondientes son las del diámetro externo de 400 mm.

Tabla 18 Cotas de la geometría del inyector de dos compartimientos. Fuente: Autores.

Cota (mm)	Diámetro de Rodete - De (mm)			
	300	400	500	600
A	261	348	435	522
B	195	260	325	390
C	31	41	52	62
D	102	136	170	204
a	85	113	142	170
b	55	73	92	110
Ri	168	224	280	336
Rii	151	201	252	302
Riii	28	37	47	56
R1	94	125	157	188
R2	39	52	65	78
R3	31	41	52	62
R4	60	80	100	120
R5	100	133	167	200
R6	70	93	117	140

R7	133	177	222	266
x	35	47	58	70
y	116	155	193	232
11	51	68	85	102
12	98	131	163	196
13	20	27	33	40

### 6.7.2. Ancho del inyector

Para el inyector seleccionado se conoce la siguiente fórmula práctica para calcular el ancho del inyector, esta es función del caudal de diseño y de la altura aprovechable [17].

$$B = \frac{0.96 Q_d}{D_e \sqrt{H_n}} \quad (16)$$

$$B = 0.719 m$$

Donde:

Qd: caudal de diseño en (m<sup>3</sup>/s)

De: diámetro exterior del rodete (tabla 18)

Hn: altura neta en metros

### 6.7.3. Diámetro interno del rodete

La geometría del rodete está determinada por la Figura 40: Las cotas respectivas se encuentran indicadas en la Tabla 18, para diámetros de rodete estandarizados.

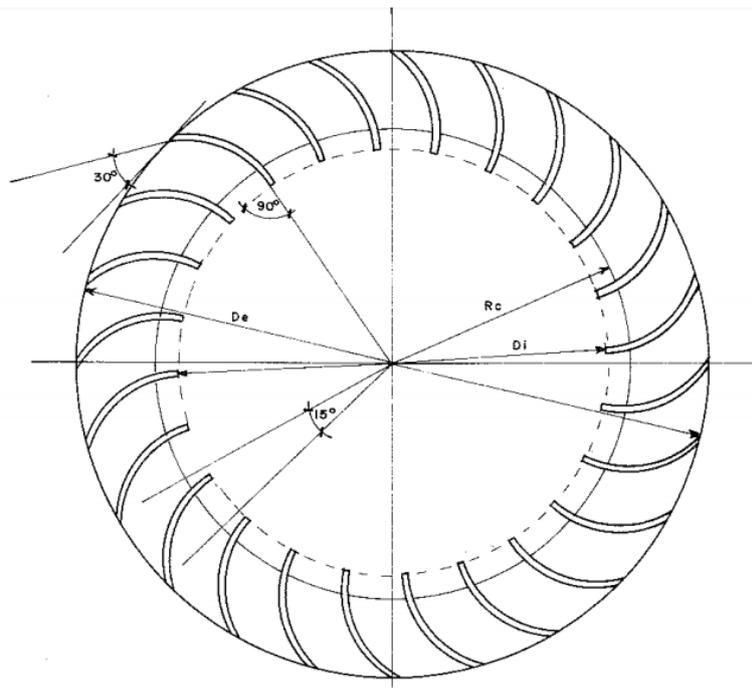


Figura 40 Geometría del rodete de la turbina Michelle-Banki [17]. Fuente: Hernández, 1985.

El cálculo del diámetro interno se realiza con la siguiente fórmula práctica [17] para el rodete más eficiente.

$$D_i = 0.66 D_e \quad (17)$$

$$D_i = 0.264 m$$

Donde:

De: diámetro externo del rodete (tabla 18).

#### 6.7.4. Radio de curvatura y ángulo de curvatura de los álabes

Para el radio de curvatura de los álabes, se tiene la siguiente fórmula práctica para el mejor rendimiento de la turbina. De la misma manera el ángulo de curvatura es recomendado para el diseño óptimo [17].

$$r = 0.163 D_e \quad (18)$$

$$r = 0.0652 m$$

$$\phi = 73^\circ$$

Donde:

r: radio de curvatura de los alabes

De: diámetro exterior del rodete en metros (tabla 14)

$\phi$ : Ángulo de curvatura

#### 6.7.5. Diámetro máximo del eje

El diámetro máximo para la configuración del rodete presentada en las secciones anteriores se calcula con la siguiente fórmula práctica [17].

$$d = 0.328 D_e \quad (19)$$

$$d = 0.1312 m$$

Donde:

De: diámetro exterior del rodete en metros (Tabla 14)

#### 6.8. Geometría del desarenador y de la cámara de carga

El diseño de la cámara de carga y del desarenador es dependiente del caudal de diseño de la central hidroeléctrica considerada y del tamaño de las partículas. El diseño geométrico de estos dos componentes es similar en todos los aspectos, excepto en la salida. Para el desarenador tenemos una salida común que permite circular el agua, en cambio para la cámara de carga tenemos una rejilla que conduce a la tubería de presión. Debido a que la

forma de cálculo es la misma, se presenta únicamente los resultados para las cotas del desarenador (Figura 41) [25].

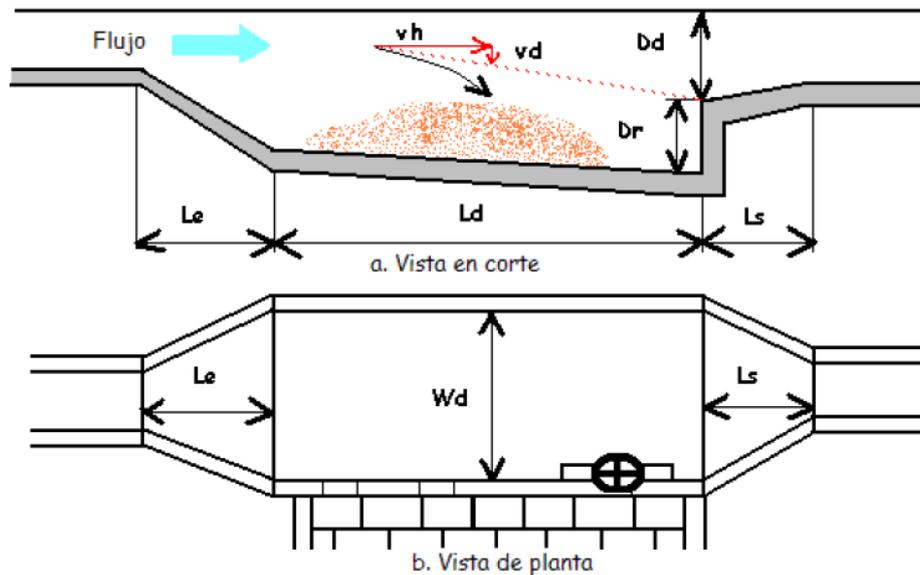


Figura 41 Vista lateral y superior del desarenador [25]. Fuente: Coz, 1995.

En la figura anterior se puede observar que la longitud total del desarenador se divide en tres partes principales: longitud de entrada ( $L_e$ ), longitud de decantación ( $L_d$ ) y longitud de salida ( $L_s$ ). En cuanto a la profundidad, esta se divide en dos partes: profundidad de decantación ( $d_d$ ) y profundidad de recolección ( $d_r$ ). Por último, la dimensión mostrada en la vista superior del desarenador corresponde al ancho que se puede notar con ( $W$ ).

### 6.8.1. Longitud y ancho del desarenador

El desarenador debe ser diseñado con el objetivo de que la velocidad horizontal del agua ( $V_h$ ) sea baja para que los sedimentos puedan decantarse. La recomendación general es que la velocidad oscile entre 0.2 m/s y 0.5 m/s. Sin embargo, el valor más bajo es deseable en la mayoría de los casos [25]. Con respecto a la profundidad de decantación se recomienda un valor de un 1m para que sea fácil el drenaje de la sedimentación. Por último suponiendo que el tamaño de las partículas es de 0.3 mm (como en la mayoría de los casos en micro hidroeléctricas) se puede saber la velocidad de decantación de las partículas que para este tamaño corresponde a 0.03 m/s [25]. Por lo tanto, la longitud de decantación se calcula de la siguiente manera.

$$L_d = \frac{V_h}{V_d} d_a f \quad (20)$$

$$L_d = 13,33 \text{ m}$$

Donde:

$L_d$ : Longitud de decantación

$V_h$ : Velocidad horizontal del fluido (se recomienda 0.2 m/s)

$V_d$ : Velocidad de decantación (0.03 m/s para partículas de 0.3 mm)

$d_d$ : Profundidad de decantación (se recomienda 1 m para facilidad de drenaje)

$f$ : Factor de seguridad (se recomienda 2)

Las longitudes de entrada ( $L_e$ ) y de salida ( $L_s$ ) se estiman de manera proporcional con la longitud de decantación, en este caso establecemos 1,5 m para ambos casos. Para el cálculo del ancho se debe considerar el caudal de diseño requerido y los datos proporcionados anteriormente de la siguiente manera:

$$W = \frac{Q_d}{V_h d_d} \quad (21)$$

$$W = 7,93 \text{ m}$$

Donde:

$W$ : Ancho del desarenador

$Q_d$ : Caudal de diseño (1,5854 m<sup>3</sup>/s)

$V_h$ : Velocidad horizontal del fluido (se recomienda 0.2 m/s)

$d_d$ : Profundidad de decantación (se recomienda 1 m para facilidad de drenaje)

### 6.8.2. Profundidad de recolección

La profundidad de recolección del desarenador se calcula tomando en cuenta la cantidad de sedimentos transportados en el lecho del río analizado. Debido a que la OLADE recomienda mantener los costos de estudios físicos al mínimo en la etapa de factibilidad [18]. El dato se asume en base a las recomendaciones de la bibliografía. En esta etapa también establecemos el periodo de drenaje recomendado. Para este caso tomamos un periodo de 3 días según lo sugerido. Por lo tanto:

$$m_s = Q_d T S \quad (22)$$

$$m_s = 41093.5 \text{ Kg}$$

Donde:

$m_s$ : Masa de sedimentos acumulados

$Q_d$ : Caudal de diseño (1,5854 m<sup>3</sup>/s)

$T$ : Periodo de drenaje (3 días)

$S$ : Cantidad de sedimentos transportados por segundo (suponemos 0.1 Kg/m<sup>3</sup>)

Conociendo que la densidad de la arena es  $2600 \text{ Kg/m}^3$ , podemos calcular el volumen de sedimentos acumulados en el periodo de drenaje.

$$v_s = \frac{m_s}{\rho_{\text{arena}}} \quad (23)$$

$$v_s = 15,8 \text{ m}^3$$

Donde:

$v_s$ : Volumen de los sedimentos acumulados

$m_s$ : Masa de los sedimentos acumulados

$\rho_{\text{arena}}$ : Densidad de la arena

Por último, suponiendo una densidad de acumulación del 50%, sabemos que la capacidad del tanque debe ser  $31,6 \text{ m}^3$ . Por lo tanto, la profundidad de recolección se calcula:

$$d_r = \frac{C_{\text{tanque}}}{W L_d} \quad (24)$$

$$d_r = 0,3 \text{ m}$$

Donde:

$d_r$ : Profundidad de recolección de arena

$C_{\text{tanque}}$ : Capacidad del tanque ( $31,6 \text{ m}^3$ )

$W$ : Ancho del desarenador ( $7,93 \text{ m}$ )

$L_d$ : Longitud de decantación ( $13,33 \text{ m}$ )

En la Figura 42 podemos observar el esquema lateral y superior de la cámara de carga. Los cálculos de sus cotas se realizan de la misma manera que las del desarenador por lo que sus dimensiones son iguales, sin embargo, la construcción al final cambia para conducir hacia la tubería de presión.

### 6.8.3. Cámara de carga

Para el diseño de la cámara de carga se repiten las mismas constes como son el caudal, la velocidad de decantación y la velocidad del fluido, la cantidad de partículas en el fluido este caso se considera de  $0.02 \text{ Kg/m}^3$ . Por lo tanto, la longitud de decantación será:

$$L_d = 13.33 \text{ m}$$

$$d_d = 1 \text{ m} \quad (25)$$

$$W = 7,93 \text{ m}$$

Donde:

$L_d$ : Longitud de decantación

$W$ : Ancho del desarenador

$d_d$ : Profundidad de decantación

Únicamente se procede a recalcularse la profundidad de recolección de sedimentos, para lo cual previamente debe calcularse los sedimentos acumulados.

$$m_s = Q_d T S \quad (26)$$

$$m_s = 8218,7 \text{ Kg}$$

Donde:

$m_s$ : Masa de sedimentos acumulados

$Q_d$ : Caudal de diseño (1,5854 m<sup>3</sup>/s)

$T$ : Periodo de drenaje (3 días)

$S$ : Cantidad de sedimentos transportados por segundo (suponemos 0.02 Kg/m<sup>3</sup>)

Se calcula el volumen en base a la densidad de la arena 2600 Kg/m<sup>3</sup> el periodo de drenaje.

$$v_s = \frac{m_s}{\rho_{\text{arena}}} \quad (27)$$

$$v_s = 3.16 \text{ m}^3$$

Donde:

$v_s$ : Volumen de los sedimentos acumulados

$m_s$ : Masa de los sedimentos acumulados

$\rho_{\text{arena}}$ : Densidad de la arena

Considerando una densidad de acumulación del 50%, sabemos que la capacidad del tanque de acumulación debe ser 6.3 m<sup>3</sup>. Por lo tanto, la profundidad de recolección se calcula:

$$d_r = \frac{C_{\text{tanque}}}{W L_d} \quad (28)$$

$$d_r = 0,06 \text{ m}$$

Donde:

$d_r$ : Profundidad de recolección de arena

$C_{\text{tanque}}$ : Capacidad del tanque (6.3 m<sup>3</sup>)

$W$ : Ancho del desarenador (7,93 m)

$L_d$ : Longitud de decantación (13,33 m)

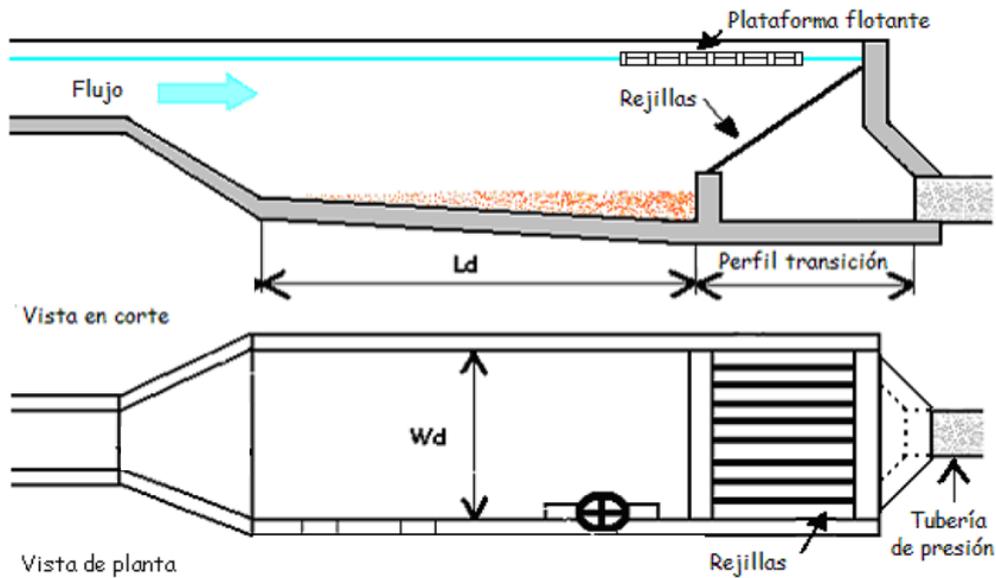


Figura 42 Vista lateral y superior de la cámara de carga. [25]. Fuente: Coz, 1995.

## 7. Resultados y Validación

### 7.1. Factibilidad técnica

La factibilidad técnica del proyecto está determinada por los resultados entregados en las cuatro áreas principales analizadas anteriormente correspondientes con: demanda energética, diseño hidráulico, diseño de la turbina y obras civiles adicionales. A continuación, se presenta una tabla con los resultados obtenidos para la puesta en marcha del proyecto satisfaciendo las necesidades planteadas. En resumen, los resultados indican que el caudal y el salto presentes en el río Cuenca pueden cubrir las necesidades energéticas de la empresa Malima en su totalidad, teniendo una potencia extra estimada de 92 kW operando con caudal medio. Esta potencia extra asegura la operatividad en época de estiaje.

Tabla 19 Resultados del análisis técnico. Fuente: Autores.

	Parámetro	Cantidad
<b>Demanda Energética</b>	Demanda energética (media)	95.817 kWh
	Demanda energética (máxima)	118.597 kWh
	Demanda energética (mínima)	73.037 kWh
	Potencia requerida	208,87 kW
<b>Diseño Hidráulico</b>	Altura neta	27 m
	Caudal medio	17 m <sup>3</sup> /s
	Caudal de equipamiento	11,9 m <sup>3</sup> /s

	Caudal ecológico	2,97 m <sup>3</sup> /s
	Caudal disponible	8,92 m <sup>3</sup> /s
	Potencia del generador	300 kW
	Potencia al freno	339,56 kW
	Caudal de diseño	1,59 m <sup>3</sup> /s
	Diámetro nominal de la tubería	1000 mm
	Rugosidad de la tubería	0,3 mm
	Longitud de la tubería de presión	915 m
	Pérdidas en la tubería de presión	2 m
<b>Diseño de la Turbina</b>	Velocidad en el inyector	22,54 m/s
	Diámetro exterior del rodete	0,4 m
	Número de revoluciones de la turbina	527
	Número específico de revoluciones (Nq)	56
	Número específico de revoluciones (Ns)	183
	Ancho del inyector	0,719 m
	Tamaño del compartimiento B1	0,239 m
	Tamaño del compartimiento B2	0,479 m
	Diámetro interno del rodete	0,264 m
	Radio de curvatura de los alabes	0,0652 m
Ángulo de curvatura de los álabes del rodete	73°	
Diámetro máximo del eje	0,1312 m	
<b>Obras Civiles</b>	Longitud de decantación	13,33 m
	Ancho del desarenador	7,93 m
	capacidad del tanque	31,6 m <sup>3</sup>
	profundidad de recolección	0,3 m

### 7.1.1. Esquema general de la central hidroeléctrica

Luego de conocer los resultados referidos a las diferentes partes de la central hidroeléctrica, se establece el esquema final del proyecto. En la sección 6.4.1 mencionamos que el tipo de central elegida para la construcción es fluyente o también conocida como de pasada. A continuación, se muestra el esquema final de la hidroeléctrica con algunos de los resultados principales del análisis hidrológico.

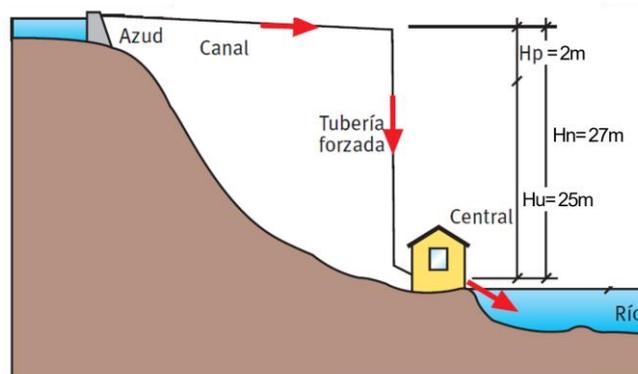


Figura 43 Esquema general de la central hidroeléctrica Fuente: Autores

En la figura 44 se puede observar de manera general la ubicación de los diferentes componentes de la instalación, entre ellos se cuenta con un desarenador que tiene unas dimensiones de 13,3 metros de longitud y un volumen de 15,8 metros cúbicos de capacidad, la cámara de carga desde donde sale la tubería de presión que tienen una longitud total de 915m y un diámetro de 1000 mm, los datos completos de los componentes se encuentran en la tabla 18.



Figura 44 Esquema de captación de la central hidroeléctrica. Fuente: Autores

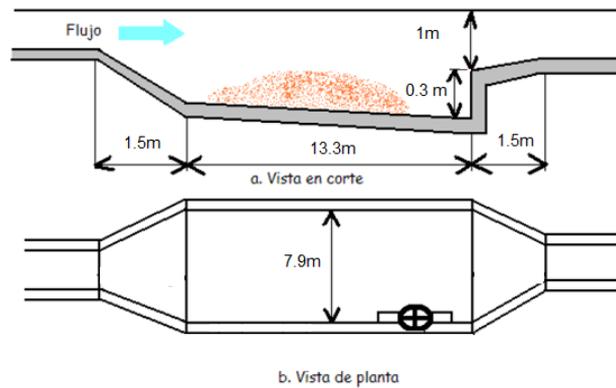


Figura 45 Esquema del desarenador. Fuente: Autores

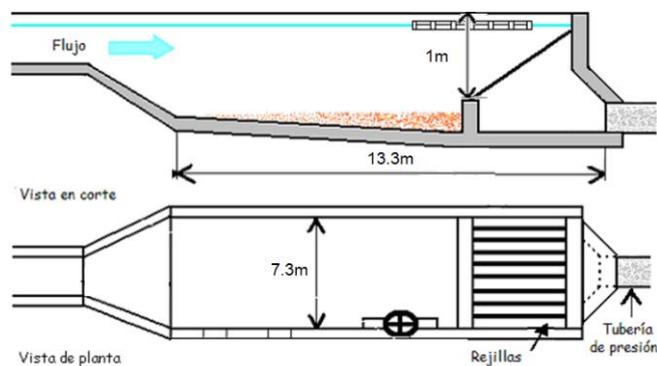


Figura 46 Esquema de la cámara de carga. Fuente: Autores

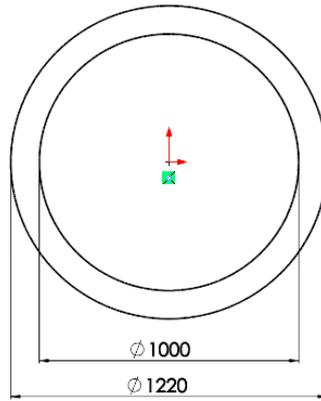


Figura 47 Tubería de presión

La tubería de presión tiene un diámetro interior de 1 metro y un espesor de 110 mm, debe ser construido en hormigón armado en sus tres tramos. La casa se plantea que sea construida en estructura metálica para que pueda ser armada en la obra se estima que serán necesarios  $100 m^2$  de construcción.

## 7.2. Factibilidad económica

### 7.2.1. Costos unitarios reales

Luego de describir los elementos necesarios en la sección 7.1 se realiza una búsqueda de estos en el mercado. La OLADE recomienda en la medida de lo posible utilizar industria local [18]. En este caso, seleccionamos industria local para la realización de toda la obra civil, es decir, para la captación, tubería de presión y construcción de la casa de máquinas. Sin embargo, debido a los costos, se selecciona una industria peruana para la fabricación de la turbina, controles electrónicos, generador, transmisión y demás componentes hidráulicos. A continuación se presentan los costos otorgados por el sistema de cotización de la empresa CYPE Ingenieros S.A. [26].

Tabla 20 Costos unitarios por metro para tubería de presión [26] Fuente: CYPE, 2019.

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
<b>Materiales</b>				
Tubo de hormigón armado, fabricado por compresión radial, clase 60, carga de rotura $60 \text{ kN/m}^2$ , de 1000 mm de diámetro nominal (interior), unión por enchufe y campana con junta elástica, en tramos de 1220 mm de diámetro exterior, 110 mm de espesor, 2400 mm de longitud útil, 2500 mm de longitud total, campana de 1405 mm de diámetro exterior y 2550 kg de peso, con junta de caucho EPDM, de deslizamiento y compresión, tipo arpón.	m	1,050	96,46	101,28
Lubricante para unión con junta elástica, en colector enterrado de saneamiento sin presión.	kg	0,043	3,48	0,15

Arena de 0 a 5 mm de diámetro.	m <sup>3</sup>	1,175	14,16	16,64
			<b>Subtotales materiales:</b>	<b>118,07</b>
Camión con grúa de hasta 10 t.	h	0,324	54,55	17,67
Retrocargadora sobre neumáticos, de 70 kW.	h	0,211	35,50	7,49
Pisón vibrante de guiado manual, de 80 kg, con placa de 30x30 cm, tipo rana.	h	0,949	3,41	3,24
			<b>Subtotal equipo y maquinaria:</b>	<b>28,40</b>
Albañil de obra civil.	h	0,759	7,08	5,37
Ayudante de albañil de obra civil.	h	0,836	4,51	3,77
			<b>Subtotal mano de obra:</b>	<b>9,14</b>
Herramienta menor	%	2,000	155,61	3,11
Coste de mantenimiento decenal: \$ 7,94 en los primeros 10 años.			<b>Costos directos (1+2+3+4):</b>	<b>158,72</b>

### 7.2.1.1. Costos unitarios de la casa de máquinas

Tabla 21 Costos unitarios por metro cuadrado de la cubierta para casa de máquinas [26] Fuente: CYPE, 2019.

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
Acero A 36, en perfiles conformados en frío, según ASTM A 36, acabado galvanizado, incluso accesorios, tornillería y elementos de anclaje. Trabajado y montado en taller, para colocar con uniones atornilladas en obra.	kg	5,000	3,57	17,85
			<b>Subtotal materiales:</b>	<b>17,85</b>
Montador de estructura metálica.	h	0,334	7,38	2,46
Ayudante montador de estructura metálica.	h	0,334	4,71	1,57
			<b>Subtotal mano de obra:</b>	<b>4,03</b>
Herramienta menor	%	2,000	21,88	0,44
Coste de mantenimiento decenal: \$ 1,12 en los primeros 10 años.			<b>Costos directos (1+2+3):</b>	<b>22,32</b>

Tabla 22 Costos unitarios por metro cuadrado de nivelación de terreno [26] Fuente: CYPE, 2019.

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
-------------	--------	----------	----------------	---------------

Grava de cantera de piedra caliza, de 40 a 70 mm de diámetro.	m <sup>3</sup>	0,220	20,41	4,49
			<b>Subtotales materiales:</b>	<b>4,49</b>
Pala cargadora sobre neumáticos de 120 kW/1,9 m <sup>3</sup> .	H	0,011	39,54	0,43
Bandeja vibrante de guiado manual, de 300 kg, anchura de trabajo 70 cm, reversible.	H	0,011	6,28	0,07
Camión cisterna de 8 m <sup>3</sup> de capacidad.	H	0,011	39,43	0,43
			<b>Subtotal equipo y maquinaria:</b>	<b>0,93</b>
Peón de albañil.	H	0,233	4,33	1,01
			<b>Subtotal mano de obra:</b>	<b>1,01</b>
Herramienta menor	%	2,000	6,43	0,13
			<b>Costos directos (1+2+3+4):</b>	<b>6,56</b>

### 7.2.1.2. Costos unitarios del grupo hidroeléctrico

Tabla 23 Costos del grupo hidroeléctrico provistos por la empresa 3HC [2] Fuente: Castro, 2006.

<b>Costos del Grupo Hidroeléctrico (Empresa "3HC Centrales Hidroeléctricas")</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>
Turbina hidráulica tipo Michelle-Banki. Modelo R389. Potencia de 120 a 500 kW. Altura: 20 a 350 m. Caudal: 60 a 1500 litros /seg	1
Válvula principal	1
Junta de montaje	1
Generador eléctrico	1
Tablero de control y gobernador de velocidad tipo electrónico	1
Sistema de transmisión de potencia	1
<b>Costo del grupo hidroeléctrico</b>	<b>150000 USD</b>

### 7.2.2. Costos unitarios supuestos

En un análisis de pre factibilidad muchas veces no es posible determinar todos los costos reales del proyecto debido a que muchos de ellos llevan asociados estudios detallados de la geografía del sitio, litigación, permisos, etc. Sin embargo, la metodología propuesta por la OLADE [18], sugiere que se determinen los costos reales posibles de acuerdo al mercado y para los costos restantes se utilice un sistema de porcentajes en función del costo supuesto total de la obra. Para esto se utiliza la fórmula empírica que relaciona el costo por kilovatio instalado con la altura y la potencia del proyecto [18].

$$C_t = \frac{30500}{H^{0.15} P^{0.4}} \quad (29)$$

$$C_t = 1959,24 \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$

Donde:

$C_t$  Costo total de la obra por kW instalado aproximado con la fórmula empírica

$H$  Salto hidráulico en metros (en este caso 22 m)

$P$  Potencia instalada en kW (en este caso 300 kW)

Teniendo este valor supuesto podemos calcular los costos unitarios de las obras faltantes teniendo en cuenta la estimación de porcentajes entregada por la OLADE para otros estudios similares [18], [27].

### 7.2.2.1. Costo unitario de la obra de captación

La obra de captación constituye el azud para el desvío del cauce del río y la bocatoma para la conducción hacia la cámara de carga. De acuerdo con la OLADE esta obra constituye aproximadamente el 8% del valor total supuesto de la hidroeléctrica, por lo tanto:

$$C_{captacion} = 1959,24 \times 8\% \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$

$$C_{captacion} = 156,73 \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$

Donde  $C_{captacion}$  es el costo unitario de la obra de captación por kilovatio instalado. A continuación se muestra un esquema genérico de la obra de captación proporcionado por la OLADE [18].

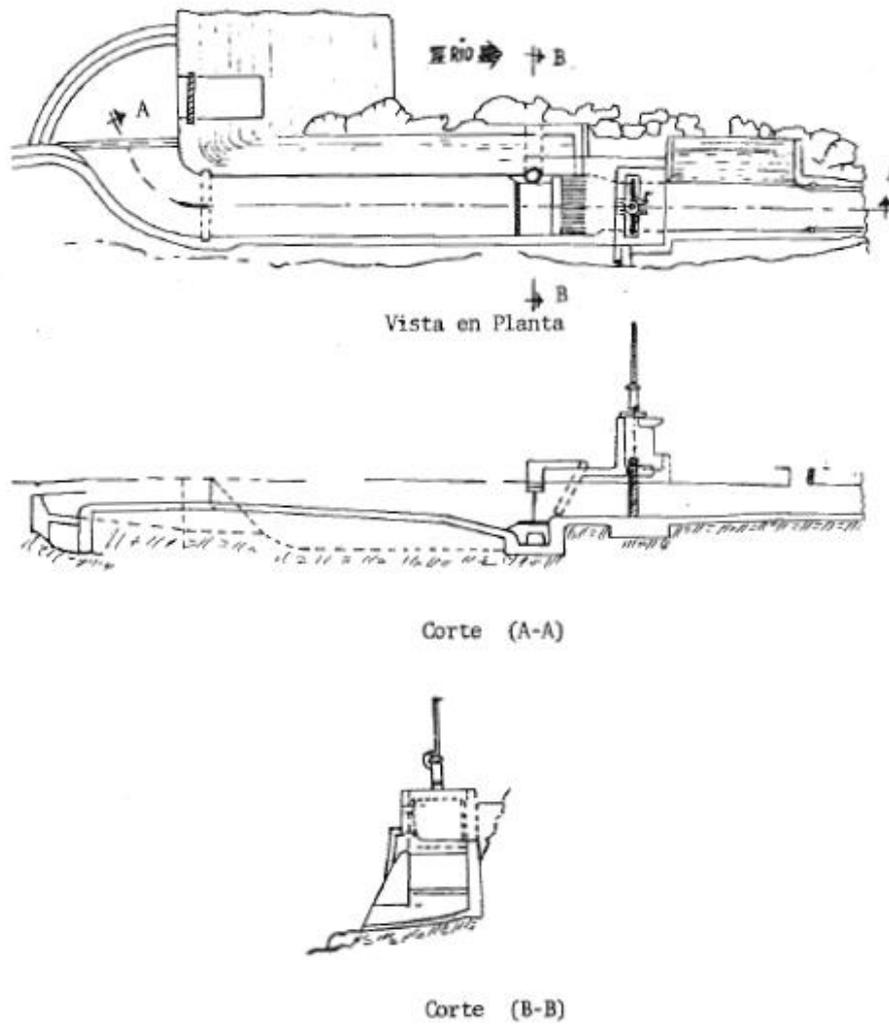


Figura 48 Esquema de la obra de captación [18]. Fuente: Indacochea, 1981.

### 7.2.2.2. Costo unitario del desarenador

El desarenador es un dispositivo hidráulico que filtra las partículas sólidas que se encuentran en el agua para que estas no lleguen a la turbina y generen daños mecánicos o tiempos de parada. De acuerdo con la OLADE el costo unitario del desarenador representa aproximadamente el 6% del costo total supuesto de la obra, por lo tanto [18]:

$$C_{desarenador} = 1959,24 \times 6\% \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$

$$C_{desarenador} = 117,55 \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$

Donde  $C_{desarenador}$  es el costo unitario del desarenador por kilovatio instalado.

### 7.2.2.3. Costo unitario de la cámara de carga

La cámara de carga es una construcción civil que sirve para facilitar el ingreso del agua a la tubería de presión. De acuerdo con la OLADE su costo unitario representa el 2% del costo supuesto de la obra, por lo tanto [18]:

$$C_{cc} = 1959,24 \times 2\% \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$
$$C_{cc} = 39,18 \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$

Donde  $C_{cc}$  es el costo unitario de la cámara de carga por kilovatio instalado. La Figura 47 muestra un esquema de construcción genérico de la cámara de carga [18].

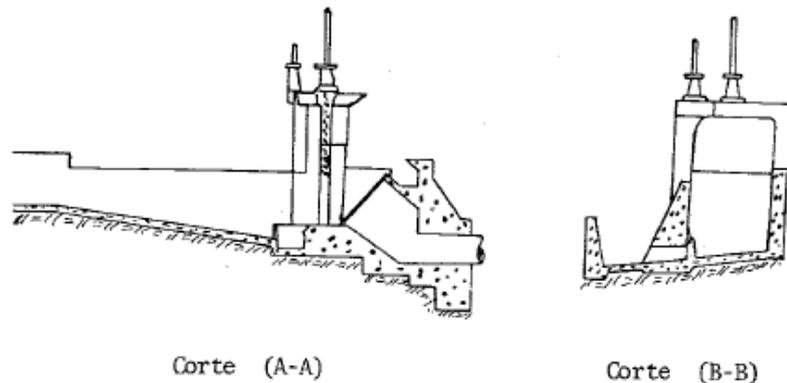


Figura 49 Esquema de la cámara de carga [18]. Fuente: Indacochea, 1981.

### 7.2.2.4. Costo unitario del canal de fuga o restitución

El canal de restitución sirve para conducir el agua utilizada para la generación de electricidad al cauce normal del río. La estimación de su costo se hace en base al porcentaje entregado por la OLADE que corresponde al 0.3% del costo total supuesto de la obra [18].

$$C_{cf} = 1959,24 \times 0.3\% \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$
$$C_{cf} = 5,87 \frac{USD}{kW \text{ instalado}}$$

Donde  $C_{cf}$  es el costo unitario del canal de restitución por kilovatio instalado.

### 7.2.3. Costos de inversión y ahorros por concepto de energía

Luego de analizar los costos unitarios se presenta un resumen de los rubros y el valor final de la inversión a efectuarse. Además, se presenta un análisis de los rubros ahorrados por

concepto de pago de energía utilizando el análisis de la demanda energética calculado en la sección 6.1. Los valores calculados se presentan a continuación.

En cantidad verificar tablas y unidades de las mismas

Tabla 24 Costos de inversión de la mini central hidroeléctrica

<b>Costos de Inversión</b>			
<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo parcial</b>
Tubería de presión	915 m	158,47 USD/m	\$ 145.000
Cubierta casa de máquinas	100 m <sup>2</sup>	22,32 USD/m <sup>2</sup>	\$ 2.232
Adecuación del terreno de la casa de máquinas	100 m <sup>2</sup>	6,56 USD/ m <sup>2</sup>	\$ 656
Grupo Hidroeléctrico (turbina, válvula, junta, generador, tablero de control, transmisión)	1		\$ 150.000
Obra de captación	300 kW	156,73 USD/kW	\$ 47.019
Desarenador	300 kW	117,44 USD/kW	\$ 35.232
Cámara de carga	300 kW	39,18 USD/kW	\$ 11.754
Canal de fuga	300 kW	5,87 USD/kW	\$ 1.761
<b>Costo Total de Inversión</b>			<b>\$ 393.654</b>
<b>Costo diseño del proyecto</b>	10% de la inversión		<b>\$39.365,4</b>

Tabla 25 Costos Anuales de Operación y Mantenimiento. Fuente: Autores.

<b>Costos de Operación y Mantenimiento</b>			
<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario anual</b>	<b>Costo parcial anual</b>
Mantenimiento de tubería	915 m	0,794 USD/m	\$ 726,51
Mantenimiento de turbina			\$ 12.000,00
Operación de la central	3 personas	800 USD/persona	\$ 28.800,00
		<b>Costo Anual O/M</b>	<b>\$ 41.526,51</b>

Tabla 26 Rubro Anual por concepto de ahorro de energía. Fuente: Autores.

<b>Ahorros por rubro de energía eléctrica</b>			
<b>Concepto</b>	<b>Cantidad anual</b>	<b>Ahorro unitario</b>	<b>Ahorro parcial anual</b>
Consumo energético	1.149.804 kWh	0,13 USD/kWh	\$ 149.474,52
		<b>Ahorro anual</b>	<b>\$ 149.474,52</b>

#### 7.2.4. Análisis Financiero con RETScreen

Con los rubros detallados y verificados se procede a hacer un análisis financiero para determinar la viabilidad económica del proyecto. Para el proyecto propuesto usamos el software de análisis RETScreen, este software desarrollado por el gobierno canadiense permite realizar análisis de factibilidad para diversos proyectos de energía renovable y es un software gratuito que se lo puede descargar directamente en su página web “Natural

Resources Canada”. El análisis financiero lo realiza usando los métodos TIR (tasa interna de retorno) y el tiempo de pago de la deuda como indicadores de la viabilidad. Para este caso se considera una tasa de interés de la deuda del 10,21% como se especifica en la figura 50 para créditos del sector empresarial. Además se considera un tiempo del proyecto de 15 años y un financiamiento de 10 años, que son periodos recomendados por la OLADE para este tipo de proyectos [18]. Los resultados son presentados de manera gráfica con capturas de pantalla del software utilizado.

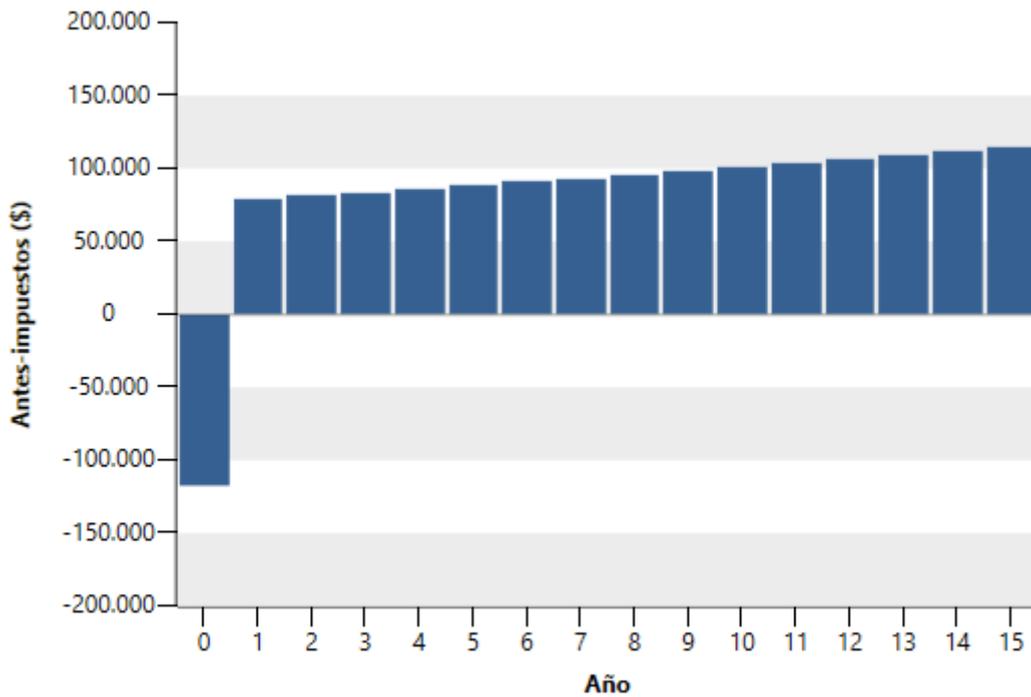


Figura 50 Flujo de caja anual para el proyecto. Fuente: Autores.

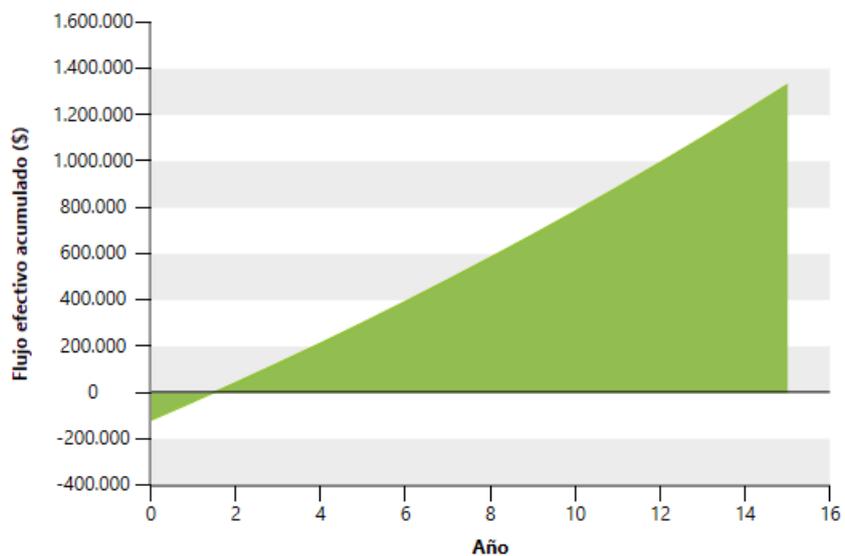


Figura 51 Flujo de efectivo acumulado durante el tiempo de vida del proyecto. Fuente: Autores.

Como se puede observar en las Figuras 45 y 46 el flujo de efectivo positivo durante los años de duración del proyecto (15 en este caso) se deben al ahorro por concepto de los rubros de eléctricos, ya que se anticipa un ahorro de aproximadamente 150.000 USD anuales. En la Figura 47 se muestran los resultados del análisis financiero efectuado, utilizando una duración de la deuda de 10 años y una tasa de interés del 10,21% como lo específica en la figura 49. Los resultados de viabilidad financiera indican un TIR del 54,2% para el valor del capital y un TIR del 15,9% para los activos, este indicador al ser positivo indica que el proyecto obtiene ganancias en el periodo analizado. Finalmente, el pago simple de retorno del capital se efectúa en el año 3,6. Esto quiere decir que la deuda por concepto del capital queda saldada en menos de 4 años, considerando que el tiempo de la deuda es de 10 años, este valor es aceptable por cualquier corporación financiera y avala la viabilidad del proyecto.

Análisis financiero		
<b>Parámetros financieros</b>		
Tasa de inflación	%	0,27%
Tiempo de vida del proyecto	año	15
Relación de deuda	%	70%
Tasa de interés de la deuda	%	10,21%
Duración de deuda	año	10
<b>Costos iniciales totales</b>	\$	393.654
<b>Incentivos y donaciones</b>	\$	
<b>Costos anuales/pagos de deuda</b>		
Operación y Mantenimiento	\$	41.527
Pagos de la deuda - 10 años	\$	45.251
<b>Costos anuales totales</b>	\$	<b>86.778</b>
<b>Ahorros e ingresos anuales</b>		
energía	\$	149.475
Ingresos por reducción GEI	\$	0
Otros ingresos (costo)	\$	0
<b>Ingresos y ahorros anuales totales</b>	\$	<b>149.475</b>
<b>Viabilidad financiera</b>		
TIR antes de impuestos - capital	%	54,2%
TIR antes de impuestos - activos	%	15,9%
Pago simple de retorno del capital	año	3,6
Repago - capital	año	1,9

Figura 52 Resultados del análisis financiero. Fuente. Autores

## 8. Conclusiones y Recomendaciones

- Se ha verificado de manera general, que el consumo energético de la empresa Floricultora Plantaciones Malima Cía. Ltda., mensualmente asciende a 62.100 *kWh*, lo que significaría una capacidad instalada de aproximadamente unos 100 *kW*. En base a la desviación estándar del consumo mensual histórico se obtiene un consumo máximo esperado de 118.597 *kWh* y un mínimo de 73.037 *kWh*.
- Al realizar el estudio del emplazamiento se determinó que se puede tener un salto neto hídrico de 27 m, que pueden ser aprovechados para la generación eléctrica.
- Conociendo el caudal del río Paute que es de 34  $m^3/s$ , y mediante una relación del tamaño de sus afluentes, se estima que el río Cuenca tiene un caudal de 17  $m^3/s$ , de los cuales al considerar el caudal de equipamiento y el caudal ecológico únicamente se dispone para la generación eléctrica con 8,93  $m^3/s$ .
- El caudal de diseño calculado en base a la demanda energética es de 1,585  $m^3/s$ , valor que es inferior al caudal disponible, con lo que se concluye que se puede cubrir con la demanda eléctrica y su proyección de crecimiento a largo plazo.
- Bajo las consideraciones ya establecidas en base a factores de diseño como: la factibilidad de construcción y mantenimiento, el costo de implementación, la eficiencia para caudales variables se selecciona como mejor alternativa la turbina Michelle-Banki.
- Se determina la trayectoria de la tubería de presión, su diámetro interior en función del caudal es de 1 metro y el espesor de la tubería 110 mm, además según la trayectoria de la tubería esta tiene una longitud de 915m.
- Las dimensiones para que el desarenador cumpla su función es de 13,3 metros de longitud, un ancho de 7,93 metros y una altura de la cámara de la arena de 0,3 metros.
- De acuerdo a los parámetros considerados para la selección de la turbina (tabla 19), se determinó que la turbina hidráulica tipo Michelle-Banki. Modelo R389, es la más apropiada para el sistema de generación hidroeléctrico motivo de este proyecto.
- Para el análisis económico, se consideró al ahorro de energía como un rubro de ingreso económico para la empresa, en base a esto y a la inversión que se debería realizar se obtiene un TIR del 54,2% para el valor del capital y un TIR del 15,9%

para los activos, por lo cual se considera que el proyecto es rentable, presentando ganancias a los 15 años de vida útil de la central. Además, se observa que la deuda por concepto del capital puede ser saldada en menos de 4 años.

### **8.1. Recomendaciones**

- En el caso que se requiera implementar proyectos similares futuros en la zona, se recomienda realizar en primera instancia un estudio del caudal del río Paute y sus afluentes.
- Para el presente proyecto se decidió colocar tres tramos de tubería forzada de acuerdo a las recomendaciones de diseño, en estudios posteriores se recomienda considerar el efecto que tendría colocar una sola tubería y reducir su longitud, ya que al reducir la pérdida de presión se podría reducir el salto hidráulico.
- Realizar un análisis de la viabilidad de construir una mini central hidroeléctrica usando un mayor caudal y un menor salto hidráulico, lo que podría significar una variación en los costos de inversión inicial y un cambio sustancial en el diseño.
- Como uno de los trabajos futuros se recomiendan desarrollar un estudio en el que considere el diseño y selección del generador eléctrico, sistema de distribución y conexión a la red eléctrica interconectada de energía

## 9. Referencias Bibliográficas

- [1] N. G. Jara Cobos, «Impacto de las políticas energéticas en la industria de la fabricación de refrigeradores domésticos en Latinoamérica: caso México, Colombia y Ecuador», Tesis Doctoral, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2018.
- [2] A. Lejeune, *Hydro power - introduction*, vol. 6. Elsevier Ltd., 2012.
- [3] A. Castro, «Minicentrales hidroeléctricas», Madrid, p. 302, oct-2006.
- [4] E. Rosero y B. Chilingua, «Observatorio de Energías Renovables en América Latina y el Caribe (Ecuador)», 2011.
- [5] Portal Educativo, «Energías renovables y no renovables». [En línea]. Disponible en: <https://www.portaleducativo.net/sexta-basico/756/energia-renovable-y-no-renovable>. [Accedido: 17-mar-2019].
- [6] F. (IEA) Birol, «World Energy Outlook 2018», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/weo2018/>. [Accedido: 19-mar-2019].
- [7] ACCIONA, «La importancia de las energías renovables», 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.accionacom.es/energias-renovables/>. [Accedido: 17-mar-2019].
- [8] NACIONES UNIDAS, «Acuerdo de París», 2016.
- [9] N. El Bassam, P. Maegaard, y M. L. Schlichting, «Marine Energy», *Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities*, pp. 175-184, 2013.
- [10] T. I. Sigfusson, *Geothermal Energy – Introduction*, vol. 7. Elsevier Ltd., 2012.
- [11] S. Gorjian, «An Introduction to the Renewable Energy Resources», n.º June, 2017.
- [12] INER, «Proyectos en eficiencia energética». Quito, 2016.
- [13] J. K. Kaldellis, *Wind energy - introduction*, vol. 2. Elsevier Ltd., 2012.
- [14] D. J. Roddy, *Biomass and Biofuels – Introduction*, vol. 5. Elsevier Ltd., 2012.
- [15] MIEM, «Fuentes de energía NO renovables», 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.energiasolar.gub.uy/index.php/aula-didactica/que-es-la-energia/fuentes-de-energia-no-renovables>. [Accedido: 30-ene-2019].
- [16] O. (Escuela P. N. Mallitasig Panchi y L. (Escuela P. N. Tapia, «Modelación y diseño digital para micro centrales de generación hidroeléctrica», *XXII JORNADAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA*, 2008.
- [17] C. Hernández B., «MANUAL DE DISEÑO ESTANDARIZACIÓN Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS PARA PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELECTRICAS (BANKI)», Quito, 1985.
- [18] E. Indacochea, L. E. Machado, C. Hernández, L. A. Suarez, y M. Carlos, «Minicentrales Hidroeléctricas (manual para toma de decisiones)», Quito, 1981.
- [19] P. Fernández Diez, «Turbinas hidráulicas», *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. ...*, pp. 1-19, 2010.
- [20] B. Mateos Rodríguez y F. Leco Berrocal, «La producción de energía hidroeléctrica en Extremadura», p. 246.
- [21] E. Indacochea, «METODOLOGÍA SINTÉTICA PARA EL CÁLCULO Y ESPECIFICACIÓN PRELIMINAR DE MICROCENTRALES HIDROELECTRICAS», Quito, 1980.
- [22] INAMHI, «Situación y Perspectivas Hidrológicas Principales Ríos del Ecuador», 2018.
- [23] Robert L. Mott, *Mecánica de Fluidos*, vol. 3 ed. Pearson, 2002.
- [24] E. D. Mena Lema y S. A. Mena Lema, «Diseño y simulación hidráulica para una central hidroeléctrica con una capacidad de generación de 16.8 mw», Universidad Politécnica Salesiana, 2015.

- [25] F. Coz *et al.*, *Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas*. Lima, Perú: Intermediate Technology Development Group, ITDG-Perú., 1995.
- [26] CYPE, «Generador de Precios Ecuador», 2019. [En línea]. Disponible en: [http://www.ecuador.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Adecuacion\\_del\\_terreno/Red\\_de\\_desague/Acometidas/ASB020\\_Conexion\\_de\\_la\\_acometida\\_del\\_edific.html](http://www.ecuador.generadordeprecios.info/obra_nueva/Adecuacion_del_terreno/Red_de_desague/Acometidas/ASB020_Conexion_de_la_acometida_del_edific.html). [Accedido: 10-abr-2019].
- [27] H. Garcés, «Determinación de Costos Unitarios para la Construcción de Minicentrales Hidroeléctricas», Escuela Politécnica Nacional, 2012.
- mini