



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO**  
**DE MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

**Título:**

---

**“Evaluación del potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug 2013. Diseño de un Sistema para el aprovechamiento de la energía hidráulica”.**

---

**Autor: Ing. Oscar Bladimir Arteaga López**

**Tutor: PhD. Gustavo Rodríguez Bárcenas**

**LATACUNGA – ECUADOR**

**Abril – 2015**



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADOS

Latacunga – Ecuador

---

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe en consideración de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Arteaga López Oscar Bladimir, con el título de tesis: **“Evaluación del potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug 2013. Diseño de un Sistema para el aprovechamiento de la energía hidráulica”**, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, diciembre 2014

Para constancia firman:

.....  
MSc. Paulina Freire  
PRESIDENTA

.....  
PhD. Vicente Córdova  
MIEMBRO

.....  
PhD. Héctor Laurencio  
MIEMBRO

.....  
PhD. Yoalbys Retirado Mediaceja  
OPOSITOR

## **AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS**

Latacunga, Septiembre del 2014

En mi calidad de Director de Tesis presentada por el Ing. Arteaga López Oscar Bladimir, Egresado de la Maestría en Gestión de Energías, previa a la obtención del mencionado grado académico, cuyo título es **“Evaluación del potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug 2013. Diseño de un Sistema para el aprovechamiento de la energía hidráulica”**.

Considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador.

Atentamente

PhD. Gustavo Rodríguez Bárcenas.

**DIRECTOR DE TESIS**

## **AUTORÍA**

Yo, Oscar Bladimir Arteaga López, portador del número de cédula 1802379261, declaro que la presente Tesis de Grado, es fruto de mi esfuerzo, responsabilidad y disciplina, logrando que los objetivos propuestos se culminen con éxito.

Atentamente

Oscar Bladimir Arteaga López  
C.I. 1802379261

## **AGRADECIMIENTO**

Mi más sincero agradecimiento a los docentes de Posgrado de la Universidad Técnica de Cotopaxi, a los docentes del ISMMM de Cuba, quienes con su profesionalismo y don de gente nos supieron encaminar para cumplir los objetivos propuestos.

A mi tutor, Gustavo Rodríguez Bárcenas, por su acertada dirección para culminar con éxito el presente proyecto y por su apoyo incondicional.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por brindarme vida, salud y la oportunidad de seguir siempre adelante, ya que sin sus bendiciones nada de esto sería posible.

A mi esposa Liliana, por su amor y compañía en todos los instantes de mi vida, por su apoyo y comprensión incondicional en la realización de este proyecto y además por compartir conmigo los momentos más felices y más tristes de mi vida.

A mis padres y hermanos, por su esfuerzo y sacrificio, por el ejemplo que me han dado, por el apoyo y amor que siempre me han brindado.

## **CERTIFICACIÓN DE CRÉDITOS QUE AVALAN LA TESIS**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
UNIDAD DE POSGRADOS**

**PROGRAMA: “MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS”**

“Evaluación del potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug 2013. Diseño de un Sistema para el aprovechamiento de la energía hidráulica”

Autor: Oscar Bladimir Arteaga López

Fecha: Marzo 2015

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

**TÍTULO: Evaluación del potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug 2013. Diseño de un Sistema para el aprovechamiento de la energía hidráulica.**

**AUTOR:** Arteaga López Oscar Bladimir.

**TUTOR:** PhD. Rodríguez Bárcenas Gustavo.

**RESUMEN**

En la presente investigación se evalúa el potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug en la Provincia de Tungurahua, en base a la fundamentación teórica y los estudios hidrológicos, topográficos y geotécnicos desarrollados en el área de estudio.

En la propuesta se diseña una pequeña central hidroeléctrica que además de aprovechar el caudal de agua cruda concedida a la Empresa Pública – Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A) y las particulares condiciones topográficas del terreno por donde cruza la línea de conducción que traslada dicha agua hacia la planta de tratamiento, garantiza la máxima generación posible de energía y la continuidad en el suministro de agua por gravedad hacia la planta de tratamiento, aún en situaciones en las que sea necesario detener el funcionamiento de la turbina por mantenimientos o por imprevistos.

Del análisis de resultados se determinó que la alternativa propuesta es técnica y económicamente factible debido a que es capaz de generar 1,08 MW con una inversión aceptable de 1 927 650,79 USD gracias a que utiliza varias de las obras desarrolladas para el proyecto Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato y con menos impacto ambiental que la producida por otras fuentes de generación eléctrica como el petróleo, la solar y la eólica.

**Descriptores:** Potencial energético, generación hidroeléctrica, central hidroeléctrica.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

**TITLE: Energy potential evaluation of the pipeline for potable water of Chiquihurco Dam – Apatug Treatment Plant 2013. System design to take advantage of hydraulic energy.**

**AUTOR:** Arteaga López Oscar Bladimir.

**TUTOR:** PhD. Rodríguez Bárcenas Gustavo.

**ABSTRACT**

This paper evaluates the energy potential of the pipeline for water supply Chiquihurco Dam - Apatug Treatment Plant in the province of Tungurahua, this study is based on the theoretical foundation and hydrological, topographical and geotechnical studies developed in the area.

In this study the design of a small hydroelectric plant is proposed, which shows the advantages of: harnessing the raw water flow provided to Empresa Pública – Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A), using the particular topographic and soil conditions where the pipeline that transports such water to the treatment plant cuts across, and ensuring the maximum possible power generation and continuity in the by-gravity water supply to the treatment plant, even in situations where it is necessary to stop the operation of the turbine for maintenance or contingencies.

The profitability of the proposed alternative is determined by the results analysis. The plant designed is capable of generating 1,08 MW with an acceptable investment of \$ 1 927 650.79 and little environmental impact as several of the works developed for the Chiquihurco High Zone in Ambato water supply system can be used and with less environmental impact than that produced by other sources of electricity generation such as oil, solar and wind.

**Descriptors:** Energy potential, hydroelectric generation, hydroelectric plant.

## ÍNDICE

<b>Contenidos</b>	<b>Páginas</b>
PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	ii
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS.....	iii
AUTORÍA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA.....	2
1.1.- Antecedentes del problema.....	2
1.2.- Formulación del problema.....	6
1.3.- Objeto de estudio.....	6
1.4.- Justificación de la Investigación.....	6
1.5.- Objetivos.....	8
1.5.1- Objetivos Generales.....	8
1.5.2- Objetivos Específicos.....	8
1.5.3- Campo de acción.....	9
1.6.- Hipótesis.....	9
1.7. - Conclusión del capítulo.....	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	10
2.1.- Antecedentes de la investigación.....	10
2.1.1- Principales referentes teóricos.....	12
2.2.- Fundamentación teórica.....	14
2.2.1.- Tipos de aprovechamiento hidroeléctricos.....	15
2.2.2.- Caudal disponible.....	17
2.2.3.- Altura del salto de agua.....	17
2.2.4.- Fundamentos de ingeniería hidráulica.....	18
2.2.5.- Estimación del salto neto.....	21

2.2.6.- Espesor de tubería por presión interna y golpe de ariete.....	22
2.2.7.- Potencial hidroenergético.....	23
2.2.8.- Turbinas hidráulicas.....	25
2.3.- Fundamentación legal.....	30
2.4.- Definición de términos básicos.....	32
2.5. - Conclusión del capítulo.....	33
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	34
3.1.- Diseño de la investigación.....	34
3.2.- Modalidad de la investigación.....	35
3.2.1.- Investigación documental.....	35
3.2.2.- Investigación de campo.....	35
3.3.- Tipo de investigación.....	36
3.3.1.- Investigación experimental.....	36
3.3.2.- Investigación descriptiva.....	36
3.4.- Unidad de estudio (población y muestra).....	37
3.5.- Operacionalización de variables.....	38
3.6.- Modelo de la investigación.....	39
3.7.- Recopilación y análisis de la información.....	39
3.7.1.- Delimitación de la zona de estudio.....	39
3.7.2.- Recurso hídrico disponible.....	41
3.7.3.- Salto bruto disponible.....	45
3.7.4.- Longitud de la tubería de conducción.....	46
3.7.5.- Diámetro de la tubería de conducción.....	46
3.7.6.- Material de la tubería de conducción.....	48
3.7.7.- Cota de implantación del proyecto.....	50
3.7.8.- Salto neto.....	51
3.7.9.- Potencial energético.....	51
3.8.- Metodología de análisis económico.....	51
3.8.1.- Requerimiento de obras y equipamiento.....	52
3.8.2.- Consideraciones básicas.....	53
3.9.- Conclusiones del capítulo.....	59

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS...	60
4.1.- Resultados para el caudal de diseño .....	60
4.2.- Resultados para el salto bruto.....	61
4.3.- Resultados para la longitud de la tubería.....	62
4.4.- Resultados para el diámetro de tubería.....	62
4.5.- Resultados para la rugosidad de la tubería.....	63
4.6.- Resultado para la cota de implantación del proyecto .....	67
4.7.- Resultado para el salto neto .....	68
4.8.- Resultado para el potencial energético .....	68
4.9.- Rentabilidad del proyecto hidroeléctrico .....	69
4.10.- Conclusiones del capítulo.....	69
CAPÍTULO V: LA PROPUESTA.....	70
5.1.- Título.....	70
5.2.- Justificación.....	70
5.3.- Objetivo de la propuesta.....	71
5.4.- Estructura de la propuesta.....	71
5.5.- Diseño de la propuesta.....	72
5.5.1.- Selección del sitio de implantación de la casa de máquinas .....	72
5.5.2.- Descripción detallada de la zona de ubicación del proyecto.....	74
5.5.3.- Diseño hidráulico .....	81
5.5.4.- Desarrollo hidroeléctrico.....	83
5.5.5.- Dimensionamiento de las estructuras hidráulicas.....	86
5.5.6.- Dimensionamiento de los equipos electromecánicos .....	88
5.5.7.- Evaluación económica de la propuesta.....	93
5.6.- Impacto medio ambiental.....	98
5.6.1.- Evaluación del impacto ambiental.....	98
5.6.2.- Análisis comparativo con otras tecnologías de generación.....	100
5.7.- Validación de la hipótesis.....	102
5.8.- Conclusiones del capítulo.....	103
CONCLUSIONES GENERALES.....	104
RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFÍA.....	106
ANEXOS.....	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Configuración de una central integrada en sistemas de alimentación para agua potable .....	16
Figura 2.2.- Abaco para la selección del tipo de turbina.....	26
Figura 2.3.- Dimensiones básicas de la turbina Pelton.....	28
Figura 3.1.- Diseño de la investigación .....	34
Figura 3.2.- Ubicación geográfica del proyecto.....	41
Figura 3.3.- Represa Chiquihurco.....	42
Figura 3.4.- Canal de captación a la salida de la Presa Chiquihurco.....	43
Figura 3.5.- Medición del flujo de agua con flujómetro ultrasónico.....	44
Figura 3.6.- Simulación de la conducción en el programa Pipe Flow Expert ...	48
Figura 4.1.- Histograma de caudales en la captación de línea de conducción ..	60
Figura 4.2.- Pérdidas de presión en función del diámetro de tubería .....	63
Figura 4.3.- Tensiones de Von Mises en la tubería de conducción.....	64
Figura 4.4.- Desplazamientos resultantes en la tubería de conducción .....	65
Figura 4.5.- Distribución del factor de seguridad en la tubería de conducción..	66
Figura 4.6.- Posible cota de implantación del sistema de generación de hidroeléctrica .....	67
Figura 5.1.- Sitio de implantación del sistema de generación de energía .....	72
Figura 5.2.- Fotografía del sitio de implantación de la central hidroeléctrica...	73
Figura 5.3.- Imagen satelital del sitio de posible ubicación de la central hidroeléctrica .....	74
Figura 5.4.- Localización del proyecto de generación hidroeléctrica.....	75
Figura 5.5.- Terreno por donde cruza el tramo final de la tubería de carga.....	76
Figura 5.6.- Trazado final de la línea de conducción antes de la casa de máquinas .....	77
Figura 5.7.- Características geológicas del suelo en el sitio del proyecto .....	79
Figura 5.8.- Acceso al área del proyecto .....	80
Figura 5.9.- Comparación de los impactos ambientales de ocho tecnologías de generación eléctrica .....	100
Figura 5.14.- Impactos ambientales de la generación eléctrica mediante ocho tecnologías .....	101

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Características principales de varias turbinas hidráulicas.....	27
Tabla 2.2.- Velocidad de embalamiento con respecto a la velocidad nominal.	28
Tabla 2.3.- Precios preferentes centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW.....	31
Tabla 3.1.- Variables Independientes: Características de línea de conducción.	38
Tabla 3.2.- Variable Dependiente: Potencial energético.....	38
Tabla 3.3.- Características principales de la presa Chiquihurco.....	42
Tabla 3.4.- Caudales medidos en la captación de la tubería de conducción...	45
Tabla 3.5.- Distribución de frecuencia de las mediciones de caudal.....	45
Tabla 3.6.- Materiales para tuberías de presión.....	50
Tabla 3.7.- Presupuesto de inversiones.....	54
Tabla 3.8.- Gastos anuales de mantenimiento y operación.....	55
Tabla 3.9. Resumen de depreciación de obras y equipos .....	55
Tabla 3.10. Ingresos anuales por venta de energía .....	56
Tabla 3.11. Proyección del flujo de caja del aprovechamiento hidroeléctrico..	58
Tabla 4.1.- Medidas de tendencia central de caudales .....	61
Tabla 4.2.- Resultados de las simulaciones en el programa Pipe Flow Expert.	62
Tabla 4.3.- Resultados de los indicadores económicos .....	69
Tabla 5.1.- Pérdidas de carga desde la represa hasta la casa de máquinas .....	83
Tabla 5.2.- Datos de diseño del canal de descarga .....	86
Tabla 5.3.- Datos de diseño del tanque de carga .....	87
Tabla 5.4.- Parámetros para la selección de la turbina hidráulica .....	89
Tabla 5.5.- Dimensiones de la turbina Pelton .....	90
Tabla 5.6.- Características principales del generador eléctrico .....	91
Tabla 5.7.- Resumen del presupuesto de inversiones .....	94
Tabla 5.8.- Resumen de costos y gastos .....	95
Tabla 5.9.- Depreciación anual de obras y equipos .....	95
Tabla 5.10.- Ingresos medios anuales por venta de energía.....	96
Tabla 5.11.- Flujo de caja para la central hidroeléctrica propuesta.....	97
Tabla 5.12.- Indicadores económicos de la propuesta.....	98
Tabla 5.13.- Impactos durante la fase de construcción .....	99
Tabla 5.14.- Impactos durante la fase de generación .....	99
Tabla 5.15.- Medidas de tendencia central de la potencia generada.....	102

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como finalidad evaluar el potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug en la Provincia de Tungurahua y diseñar un sistema de generación hidroeléctrica para el aprovechamiento de dicho potencial. En cuanto a la estructura de la tesis, ésta comprende cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

En el Capítulo I, se analiza el problema de investigación con su contextualización a niveles macro, meso y micro, pronosis, delimitación temporal y espacial, justificación y significación, interés y utilidad. Se determina el objeto y campo de acción de la investigación, se formulan los objetivos generales, los específicos y la hipótesis.

En el Capítulo II, se establecen los antecedentes de la investigación, los principales referentes documentales de la problemática, la fundamentación teórica, la conceptualización de términos básicos, el marco legal y la reglamentación vigente, necesarios para la fundamentación científica y legal del proyecto.

En el Capítulo III, se diseña la investigación, se establece la modalidad, tipo y nivel de investigación, la metodología a utilizarse, la población y muestra, los métodos y técnicas a ser empleadas, la operacionalización de las variables y el procedimiento de la investigación. Se delimita el área de estudio y se describe la información existente del proyecto.

En el Capítulo IV, se analiza el potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, así como también, se evalúan diferentes parámetros técnicos y económicos; a fin de determinar la alternativa más viable para el desarrollo de la propuesta.

En el Capítulo V, se plantea la propuesta de diseño de un sistema de generación hidroeléctrica para el aprovechamiento eficiente de la energía hidráulica disponible, se evalúa técnica y económicamente la alternativa propuesta, y se comprueba la hipótesis.

Finalmente se formulan las conclusiones y recomendaciones pertinentes basadas en los resultados de la investigación.

## **CAPÍTULO I: EL PROBLEMA**

Ecuador, debido a su situación privilegiada desde el punto de vista hidrológico, tiene un gran potencial para desarrollar proyectos de generación hidroeléctrica. Este potencial ha sido ampliamente explotado en proyectos de gran envergadura (grandes hidroeléctricas); sin embargo, cuando se trata de pequeños aprovechamientos, no se les da mucha importancia y se desaprovecha el potencial energético que estos pueden ofrecer. Por esta razón, en el presente capítulo se analiza el problema del desaprovechamiento de la energía hidráulica disponible en la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug.

### **1.1. Antecedentes del problema**

El consumo energético mundial aumenta sin cesar, impulsado tanto por el crecimiento socioeconómico de las naciones como por el aumento de la población mundial y aunque las abundantes reservas mundiales de combustibles fósiles hacen suponer que este recurso puede seguir siendo utilizado durante muchos años, existe un límite que impone la protección y cuidado del ambiente ante la creciente amenaza del calentamiento global y la contaminación ambiental. Pues son los combustibles fósiles los principales responsables de las emisiones de dióxido de carbono, un gas que contribuye a aumentar el efecto invernadero constituyendo una amenaza a la estabilidad del clima del planeta.

En el Ecuador con la explotación petrolera empezó la modernización de su economía, moviéndose hacia un mayor crecimiento económico y consumo energético. Como resultado de ello, ha tenido una demanda de energía creciente y una modernización de su matriz energética que posiciona a los combustibles fósiles en la fuente principal de energía para el país y a la hidroelectricidad en la principal fuente de electricidad. Esto debido a que la propuesta estatal para el cambio de matriz energética tuvo como estrategia principal en el sector eléctrico, impulsar el desarrollo de grandes centrales.

Castro (2011: 11), al analizar la importancia de la diversificación energética en el Ecuador indica:

La estrategia de impulsar el desarrollo de grandes centrales hidroeléctricas trajo como consecuencia grandes problemas ya que las mismas requerían de enormes obras y construcciones que frecuentemente debían ser implantadas en zonas de alta sensibilidad ecológica, lo que afecta en gran medida la biodiversidad y la calidad del recurso hídrico, a la vez que esta estrategia no cumple con la meta 4.3.3 del Plan Nacional para el Buen Vivir que consiste en alcanzar el 6 % de fuentes de energía renovables diferentes de la hidroelectricidad a gran escala en la matriz eléctrica.

Vallero (2008: 142), con respecto a que se continúe dependiendo principalmente de energía generada a partir de combustibles fósiles manifiesta:

El uso de combustibles fósiles trae como consecuencia la emisión de gases de efecto invernadero, dióxido de carbono, y otros contaminantes como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de azufre y material particulado. Asociados a estos gases están algunos problemas ambientales críticos como el calentamiento global y la contaminación del aire.

Por ello, Lior (2010: 35) manifiesta que “encontrar soluciones energéticas que permitan dotar de energía limpia y renovable, que satisfagan el creciente ritmo de demanda mundial, al tiempo que mitiga el cambio climático, es esencial para evitar daños irreversibles al sistema climático global”.

Por tal motivo y a efecto de disminuir la vulnerabilidad y dependencia de generación eléctrica a base de combustibles fósiles; el Directorio del CONELEC, considerando que es de fundamental importancia acelerar el proceso de diversificación de la matriz energética, prioritariamente con fuentes de energía renovables no convencionales, mediante Resolución No. 023/11, aprobó la Regulación No. CONELEC 004/11 “Tratamiento para la energía producida con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales”. En la referida Regulación, se establecen las condiciones preferentes para los generadores que utilicen energías renovables no convencionales; entre las que se incluye la generación a base de centrales hidroeléctricas con capacidad instalada menor a 50 MW.

Esta meta requiere de una revolución energética enfocada en alcanzar la diversificación de la matriz energética de nuestro país en base a fuentes de energías renovables. Por lo que, la energía hidráulica a pequeña escala constituye una alternativa viable, debido a que no genera emisiones contaminantes durante su generación.

Con este fin se evaluaron las fuentes de energía renovables en nuestro país y se determinó que las pequeñas centrales hidroeléctricas y sobre todo las construidas en sistemas de alimentación para agua potable, constituyen una gran alternativa para mitigar los problemas antes mencionadas, debido a que estos aprovechamientos además de tener un buen potencial energético y ofrecer energía limpia y renovable, tienen la ventaja de que muchas de las estructuras requeridas ya existen, lo que disminuye su costo de inversión y el impacto ambiental suplementario es prácticamente nulo.

La Empresa Pública – Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Ambato (EP-EMAPA-A) es una entidad cuyo objetivo fundamental es proveer servicios de agua potable y alcantarillado con eficiencia, mediante el cumplimiento de normas técnicas y procesos de mejoramiento continuo, con responsabilidad social y sostenibilidad empresarial para satisfacer los requerimientos de sus usuarios.

En tal virtud la EP-EMAPA-A decide desarrollar el proyecto “Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato” cuyo objetivo prioritario es dotar de agua potable a toda la población ubicada en la zona alta de Ambato. Sin embargo, este proyecto no considera en ninguna de sus etapas, aprovechar la capacidad energética de la línea de conducción de agua hacia la planta de tratamiento; y más bien propone la instalación de válvulas y tanques rompe presión en varios puntos del trazado de la tubería, con el fin de disipar la energía del agua generada por el desnivel topográfico existente.

El proyecto de agua potable sólo contempla el diseño y construcción de las siguientes obras:

- Captación en la represa Chiquihurco.

- Tubería de conducción para el agua cruda desde la represa Chiquihurco hasta la planta de tratamiento en Apatug.
- Sistema de válvulas y tanques rompe presión para disipar la energía del agua debido a la diferencia de nivel entre la represa y la planta de tratamiento.
- Planta de potabilización en Apatug.
- Líneas de distribución de agua potable a los consumidores.

Por tanto, la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, presenta el problema que desaprovecha completamente su potencial energético, ya que toda la energía que obtiene el agua gracias a la velocidad que adquiere y a la diferencia de nivel entre la represa y la planta de tratamiento, es disipada completamente a la atmósfera mediante válvulas y tanques rompe presión.

Surge entonces la necesidad de evaluar el Potencial Energético de la Línea de Conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, con el fin de determinar la cantidad de energía disponible y los costos que involucran su aprovechamiento en la generación de energía eléctrica, a fin de conocer de forma precisa la conveniencia o no de desarrollar un proyecto hidroeléctrico que aproveche el caudal de agua disponible y las condiciones topográficas del terreno por donde cruza dicha línea de conducción.

Al no aprovechar el potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, además de que no se contribuirá a disminuir la actual dependencia de los combustibles fósiles y así mitigar en algo el calentamiento global y la contaminación ambiental, se estará perdiendo la oportunidad de generar energía a partir de fuentes limpias, renovables y de bajo costo.

El problema del desaprovechamiento del potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, tuvo su origen el 28 de octubre de 2010, cuando la EP-EMAPA-A, mediante Resolución N° 01-EP-EMAPA-A-G-2010, decidió desarrollar el “Sistema de Agua

Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato”, sin considerar el desarrollo de un sistema que permita aprovechar la energía hidráulica disponible.

Es por estas razones y por el hecho de que el proyecto “Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato” está próximo a iniciar su etapa de construcción, que la evaluación del potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Panta de Tratamiento Apatug, debe concluirse, a más tardar, en los primeros meses de año 2015, con el fin de que el proyecto hidroeléctrico pueda ser incluido y coordinado dentro de las obras e instalaciones del proyecto de agua potable.

Para la evaluación del potencial energético los estudios se llevaron a cabo a lo largo de los 31,2 km que tiene el trazado de la línea de conducción, que va desde la Presa Chiquihurco ubicada en las coordenadas UTM N 9 866 125,12 y E 743 600,70 con cota de 3.705,68 msnm (metros sobre el nivel del mar), hasta la Planta de Tratamiento ubicada en el sector de Apatug en la parroquia Juan Benigno Vela en las coordenadas UTM N 9 853 765,50 y E 756 617,67 con cota de 3 258,64 msnm, en la provincia de Tungurahua.

## **1.2. Formulación del problema**

Desaprovechamiento del potencial energético disponible en la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug.

## **1.3. Objeto de estudio**

El potencial energético disponible en la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug con fines de generación hidroeléctrica.

## **1.4. Justificación de la investigación**

Sánchez y Ramírez, (1995: 28), al describir los procesos para la evaluación de los recursos hidroenergéticos escriben:

El agua, como fuente de energía, es un recurso renovable que no contamina, no produce subproductos, su utilización como portador energético no limita su aprovechamiento posterior en otras aplicaciones como es su uso para agua potable, por lo que es un recurso noble que debe ser explotado con más interés para satisfacer necesidades de electrificación y mitigar problemas ambientales, sobre todo en proyectos donde se cuente con caudales constantes y desniveles topográficos aceptables, como es el caso específico de las líneas de conducción por gravedad para agua potable, pudiendo dar el abasto necesario para electrificar pequeñas zonas rurales, bajar los costos de producción de la energía eléctrica y proveer mejoras ambientales locales y globales.

Si bien la generación de energía a partir del agua no es novedoso, el aprovechamiento de este tipo de sistemas sí lo es, pues requiere de una gran cantidad de conocimientos y el uso de tecnología de punta que permitan por un lado determinar de forma precisa el punto donde deberá implantarse el sistema de generación de forma que garantice la máxima generación posible, así como la llegada del agua por gravedad a la planta de tratamiento; y por otro lado, el diseño de un sistema de válvulas que disipe la energía del agua y garantice su continuo suministro hacia la planta de tratamiento, aún en situaciones de paradas programadas o emergentes de la turbina hidráulica.

El aumento cada vez más acelerado de la población demanda una mayor cantidad de recursos y el agua es uno de los más importantes, por esta razón cada vez son más numerosos los proyectos para dotar de agua potable a la población. Muchos de estos proyectos cuentan con líneas de conducción por gravedad, los mismos que unidos a los existentes, suman una gran cantidad de fuentes de energía limpia y renovable desperdiciada (Franco, 2007: 21).

Con el desarrollo del presente estudio se pretende dar la pauta para establecer métodos adecuados que permitan:

- Evaluar de forma técnica el potencial energético de las líneas de conducción de agua por gravedad.

- Determinar los costos de inversión que involucran por kW generado.
- Determinar la rentabilidad de este tipo de proyectos.
- Establecer tecnologías óptimas para un funcionamiento eficiente y seguro del sistema de generación.

Por lo tanto, el desarrollo del presente estudio abrirá un gran campo de investigación en nuestro país, en algo que ha sido poco explotado, como es el desarrollo de pequeñas y mini centrales hidroeléctricas que aprovechen de forma óptima estos recursos hídricos, sin afectar el objetivo primordial de dichas líneas de conducción, que es suministrar agua a las plantas de potabilización.

Desde el punto de vista técnico y tecnológico es factible realizar la presente investigación ya que se tiene acceso a toda la información relacionada con el proyecto original de agua potable, se cuenta con los conocimientos, así como con la información técnica requerida y se dispone de los equipos necesarios para cumplir los objetivos propuestos.

También es factible realizar la investigación desde el punto de vista económico debido a que la EP-EMAPA-A está comprometida en financiar todos los estudios necesarios para el desarrollo de la investigación.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. General**

1. Contribuir para el aprovechamiento eficiente del potencial energético disponible en la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug en la Provincia de Tungurahua.

### **1.5.2. Específicos**

1. Determinar las características hidrológicas, topográficas, geológicas y mecánicas de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug.

2. Valorar la cantidad de energía hidráulica aprovechable en la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug.
3. Demostrar la factibilidad técnica y económica de generar energía eléctrica sin afectar el suministro de agua hacia la planta de tratamiento.
4. Proponer un sistema de generación hidroeléctrica para el aprovechamiento eficiente de la energía hidráulica disponible.

### **1.5.3. Campo de acción**

Generación eléctrica a partir del potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug.

### **1.6. Hipótesis**

La evaluación de las características de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, permitirá el desarrollo de una central hidroeléctrica con una potencia útil superior a 1,0 MW, sin afectar el suministro de agua por gravedad hacia la planta de tratamiento.

### **1.7. Conclusiones del capítulo**

Se evidenció que el diseño actual del proyecto que se encuentra ejecutando la EP-EMAPA-A “Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato” no contempla el desarrollo de algún sistema de generación hidroeléctrica que aproveche el potencial energético de la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, con lo que se está perdiendo la oportunidad de generar energía a partir de una fuente limpia y renovables, que además de generar ingresos económicos para la EP-EMAPA-A puede contribuir a mejorar la calidad de vida de los habitantes del sector.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Evaluar el potencial energético de una fuente de energía hidráulica y dimensionar un sistema eficiente para su aprovechamiento, requiere de un conocimiento profundo de teorías y conceptos relacionados con el objeto de estudio, por lo que en este capítulo se establece la fundamentación científica, los métodos de cálculo y el marco legal que permitan el desarrollo de la investigación.

### 2.1. Antecedentes de la investigación.

Como resultado de la “Tercera Conferencia sobre el Cambio Climático de la ONU”, celebrada en Kioto en Diciembre de 1997, el mundo reconoció la necesidad urgente de poner en marcha el Programa de Cambio Climático, cuyo objetivo es reducir las emisiones de gases de invernadero, en el horizonte 2010, en un 8 % con respecto a 1990, lo que equivale a una reducción de 336 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Para facilitar a los Estados Miembros el cumplimiento de este objetivo, la Comisión identificó una serie de acciones, entre las que destacan, por su importancia, las dirigidas a reducir la intensidad de energía, y a aumentar la penetración de las energías renovables. Para ese fin elaboró, entre otros documentos, el Libro Blanco de la Energía de 1997, el Plan de acción para los recursos renovables 1998-2010 y la Directiva 2001/77/EC sobre promoción de la generación de electricidad con recursos renovables. También se dio prioridad a los recursos renovables en las nuevas regulaciones referentes a su investigación y desarrollo (Armand y Schleiss, 2006: 2).

La utilización de la energía del agua disponible entre una cota superior y una inferior, encontró aplicaciones que datan del siglo I a.C., con los molinos de agua.

Al respecto Menéndez (1995: 27) manifiesta: “En la edad media se comenzaron a desarrollar máquinas hidráulicas, las mismas que en principio se fabricaban de materiales poco resistentes como la madera, por lo que conforme pasaron los años estos materiales fueron remplazados por otros más fuertes y más resistentes, como el hierro”.

Uno de los eventos más importantes de la historia de la energía hidráulica ocurre durante la Revolución Industrial, donde la energía hidráulica fue de gran importancia para el desarrollo económico y social. La construcción de la primera presa hidroeléctrica fue en el siglo XIX, aproximadamente entre los años 1880 y 1885, en Gran Bretaña. Posteriormente, continuaron haciéndose trabajos e investigaciones para crear un generador eléctrico y lo consiguieron, perfeccionando cada detalle del generador hidráulico y ya para el siglo XX, las centrales hidráulicas producían grandes cantidades de energía eléctrica. Sin embargo, no fue sino hasta hace pocos años cuando se le ha atribuido el valor agregado respecto a otros tipos de producción de energía, por los beneficios medioambientales que supone su aprovechamiento gracias al reducido impacto que ofrece su aplicación por la no emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera, en oposición a la combustión del carbón o el petróleo (Pérez, 2007: 4).

Desde los comienzos de la producción de electricidad, la hidráulica ha sido, y sigue siendo, la primera fuente de energía renovable utilizada para su generación.

Armand y Schleiss (2006: 2) al referirse a los aprovechamientos hidroeléctricos, indican:

Los grandes aprovechamientos hidroeléctricos, en los que la magnitud de las obras civiles y la necesaria inundación de grandes áreas para embalsar el agua y crear la altura de salto necesario, dan lugar a importantes impactos en el entorno donde se implantan, por el contrario, los pequeños aprovechamientos se integran fácilmente en los ecosistemas más sensibles.

La mayoría de los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos son del tipo de agua fluvente, lo que quiere decir que las turbinas generan electricidad mientras circule por ellas un caudal igual o superior a su mínimo técnico y se paran cuando el caudal descende por debajo de ese nivel.

Morris (2010: 2-3) señala que “los aprovechamientos hidroeléctricos de agua fluvente normalmente no tiene posibilidad de almacenar agua para generar en horas pico, sin embargo, los aprovechamientos en líneas de alimentación para agua potable, cuentan con un suministro permanente de un caudal constante de agua”.

### **2.1.1 Principales referentes documentales de la problemática**

Los principales referentes teóricos para el desarrollo de la presente investigación son: El proyecto “Sistema Integrado de Agua Potable Papallacta” y el proyecto “Sistema Mica Quito Sur”, ambos de la Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable de Quito (EMAAP-Q).

#### **Sistema Integrado de Agua Potable Papallacta**

El sistema integrado de agua potable, generación y subtransmisión eléctrica “Papallacta - Santa Rosa”, fue diseñado para cubrir las necesidades de agua potable de la ciudad de Quito y al mismo tiempo aprovechar la caída de agua para generar electricidad, la misma que se utiliza principalmente para los procesos de operación del sistema de agua potable y el excedente es entregado al Sistema Nacional Interconectado (Peña y Játiva, 2010).

El sistema integrado de agua potable Papallacta se encuentra ubicado al nor-orientado de Quito e involucra las provincias de Napo y Pichincha. Este sistema está conformado por los procesos de captación, conducción y potabilización de agua cruda; la central hidroeléctrica y la línea de transmisión eléctrica.

Las captaciones del sistema integrado Papallacta tienen la función de recolectar el agua natural procedente de varios lugares como: ríos (Papallacta, Cojancos, Blanco Chico), lagunas, embalses y aguas lluvias.

La conducción principal como las aducciones laterales está constituida por tuberías metálicas y de PVC de diferentes diámetros y de características adecuadas para transportar los caudales necesarios. Paralelos a la línea de conducción se encuentran los caminos de acceso, así como tres tanques de regulación de presiones, un sistema eléctrico, un sistema para la supervisión, adquisición de datos y control. El caudal firme del proyecto se encuentra entre 1,4 y 2,2 m<sup>3</sup>/s de acuerdo a la época invernal.

Debido al desnivel topográfico de la conducción de agua cruda, entre el túnel Quito y la estación Recuperadora, en el sector se ha instalado la central hidroeléctrica, la subestación de elevación y las líneas de transmisión, que forman el subproceso de

Generación y Transmisión Eléctrica Papallacta – Santa Rosa (GETPSA) que es parte del sistema integrado de agua potable Papallacta.

La generación eléctrica se realiza en la estación Recuperadora ubicada en el sector de Paluguillo de la provincia de Pichincha, en las coordenadas UTM N 9 970 624,00 y E 802 623,00, con Datum WGS-84, aproximadamente a 10,50 km de la salida del túnel Quito, donde se ha instalado una turbina marca Sultzzer con rodete Pelton de 3 000 l/s y un generador sincronizado de 14,7 MW, tipo Schorch.

La energía generada en la central hidroeléctrica es evacuada mediante líneas de transmisión a 138 kV hacia las estaciones de bombeo Booster I, Booster II, y la estación Recuperadora y posteriormente, el excedente se incorpora al Sistema Nacional Interconectado por medio de la subestación Santa Rosa.

El agua ingresa a la estación recuperadora por medio de una válvula principal de ingreso, el agua pasa por la turbina, ésta se descarga a un tanque disipador, donde se distribuye por gravedad a las plantas de tratamiento de agua potable Bellavista, Paluguillo, y Calluma, en un valor promedio de 2 432,0 l/s, 200,42 l/s, y 31,55 l/s respectivamente.

### **Sistema Mica Quito Sur**

El proyecto Sistema Mica Quito Sur (SMQS) se encuentra localizado en la provincia de Pichincha, al norte del país. El punto inicial tiene lugar en la laguna Micacocha, ubicada a los pies del volcán Antisana en la cordillera central de Los Andes, distante 70 km de la ciudad de Quito, en donde se construyó la represa denominada “La Mica”. A partir de la represa se desarrolla un acueducto de tubería de acero, que conduce el agua cruda hacia el sur de la ciudad de Quito, lugar donde se ha construido una planta de tratamiento de agua denominada “El Troje” (Villagómez y León, 2010).

El sistema está conformado por: Represa “La Mica”; tres captaciones secundarias aguas abajo de la represa; tres túneles; acueducto de tubería de acero; central hidroeléctrica “El Carmen”; subestación de elevación y planta de tratamiento de agua.

El objetivo fundamental de la represa “La Mica” es almacenar y regular los caudales considerados en el proyecto, de tal forma que pueda suministrar 1700 l/s con una garantía de 95 %. El volumen total de la presa es superior a 50 000 000,0 m<sup>3</sup> y el volumen útil, 23 500 000,0 m<sup>3</sup>.

Aguas abajo de la represa, se construyeron tres captaciones: Antisana, con una capacidad máxima de 1 500 l/s; Jatunhuaico con capacidad de 400 l/s; y Diguchi con 150 l/s.

El acueducto del SMQS tiene una longitud total de 54 km, incluidos los ramales secundarios y está construido con tubería de acero enterrada de 915 mm (36 plg) de diámetro. De acuerdo a su ubicación en relación con la Central Hidroeléctrica “El Carmen”, el acueducto está dividido en: conducción superior, tubería de presión, y conducción inferior. A partir de la salida de la central hidroeléctrica, se desarrolla la denominada conducción inferior, formada por un sifón invertido hasta la planta de tratamiento.

La central hidroeléctrica “El Carmen” aprovecha una caída bruta de 610 m col H<sub>2</sub>O desde la represa, para generar una potencia máxima de 9 400 kW, con un caudal tope de 2,0 m<sup>3</sup>/s. La turbina instalada es tipo Pelton de dos inyectores marca VOITH, con eje horizontal. El generador eléctrico es sincrónico tiene una capacidad de 10,5 MVA y un voltaje de generación de 6,6 kV.

La subestación eléctrica de elevación dispone de tres posiciones, en barra simple, y a más de permitir la evacuación de energía de la central El Carmen, permite acoplarse con el Sistema Papallacta y el Sistema Nacional Interconectado, a través de una línea de transmisión de 138 kV

## **2.2. Fundamentación teórica**

La energía eléctrica se ha consolidado como un factor decisivo para mejorar la calidad de vida de la personas, en la medida que fortalece la productividad económica, es fundamental para la educación, alimentación y salud, no obstante, al ser este el resultado de un proceso de conversión de energía, causa impacto en el medio ambiente. En tal sentido es fundamental comprender que es importante tener

acceso a la energía eléctrica generada con fuentes de bajo impacto ambiental, como lo constituyen, las pequeñas centrales hidroeléctricas.

### **2.2.1. Tipos de aprovechamientos hidroeléctricos**

Ortiz (2011: 21) indica que “el objetivo de un aprovechamiento hidroeléctrico es convertir la energía potencial de una masa de agua situada en un punto - el más alto del aprovechamiento – en energía eléctrica, disponible en el punto más bajo, donde está ubicada la casa de máquinas”.

Sierra y Guerra, (2008: 6) establecen que de acuerdo con la cantidad de energía que generan, los aprovechamientos hidroeléctricos se pueden clasificarse en:

- Pico central: capacidad instalada menor a 5 kW
- Micro central: capacidad instalada entre 5 kW – 50 kW
- Mini central: capacidad instalada entre 50,1 kW – 500 kW
- Pequeña central: capacidad instalada entre 500,1 kW – 10 MW
- Mediana central: capacidad instalada entre 10,1 MW – 50 MW
- Grande central: capacidad instalada mayor a 50 MW

Mataix (1982: 449) señala que en función del tipo de embalse, los aprovechamientos hidroeléctricos se clasifican en:

- Centrales de agua fluyente.
- Centrales a pie de presa.
- Centrales integradas en redes de agua o tuberías de abastecimiento.

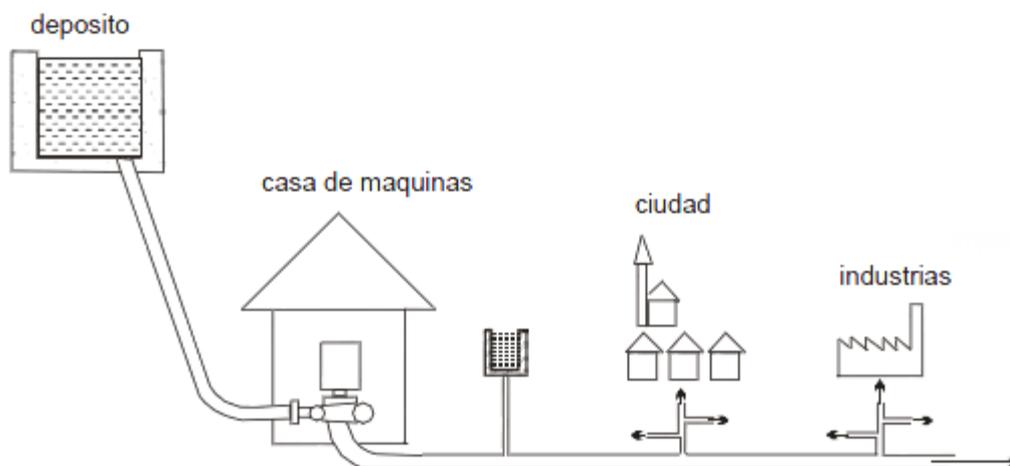
Por otro lado, Armand y Schleiss, (2006: 8) señalan que de acuerdo con la *European Small Hydropower Association* (ESHA), las centrales integradas en redes de agua o tuberías de abastecimiento, pueden ser:

- Centrales en canales de irrigación.
- Centrales en sistemas de alimentación de agua potable.
- Centrales en sistemas de depuración de aguas residuales.

## Centrales en sistemas de alimentación de agua potable

Armand y Schleiss, (2006: 9) señalan que “la conducción de agua potable a una ciudad se suele plantear como una tubería a presión que conduce el agua desde un embalse a la estación de tratamiento, a cuya entrada, un sistema de válvulas especialmente concebidas para ello se encargan de disipar la energía hidrostática, que en muchos casos es importante”.

Existe la posibilidad de disipar esa energía mediante una turbina que la emplea en generar energía eléctrica. En todo caso, previendo el cierre de la turbina (para mantenimiento o para evitar eventualmente su embalamiento) es necesario prever un circuito paralelo con válvulas que gobiernan el cierre de la turbina y la apertura simultánea del circuito paralelo, de forma que no se produzcan presiones transitorias que pongan en peligro la conducción, ni alteren las condiciones en que tiene lugar el suministro. La figura 2.1 muestra esquemáticamente la configuración de una central de este tipo, la misma que exige un sistema de regulación y control particulares.



**Figura 2.1. Configuración de una central integrada en sistema de alimentación de agua potable.**

Fuente: Armand y Schleiss, 2006.

Ortiz (2011: 5) indica que “la capacidad que tiene un sistema para generar energía a partir del agua depende de dos elementos básicos:

- Caudal del recurso hídrico ( $Q$ )
- Altura del salto de agua ( $H$ )”.

### **2.2.2. Caudal disponible**

Se entiende por caudal la masa de agua que pasa, en un tiempo determinado, por la sección de un canal o tubería (Crowe y Elger, 2009: 129).

Para valorar el recurso hídrico disponible se requiere conocer cómo evoluciona el caudal a lo largo del tiempo. En obras de gran envergadura es crucial la estimación exacta del caudal, lo que justifica un estudio de los históricos de caudal durante varios años. Sin embargo, para el caso de pequeños aprovechamientos, la literatura sugiere que es importante estimar la curva de disponibilidad de caudal a lo largo del año y es aceptable la estimación del caudal hasta con 10 % de error (Penche, 1998: 56).

La estimación del caudal medio anual es importante debido a que es un dato necesario para dimensionar la turbina, los equipos electromecánicos y las instalaciones.

Por ello, Rojas (2006: 5) señala que en el caso de no existir la información suficiente, el caudal medio puede ser estimado haciendo uso de diversas opciones:

- Método del llenado de un depósito.
- Medición de caudales por medio de vertederos.
- Medición de caudales por medio de flujómetro.
- Método de la tabla aforadora.
- Método del flotador.

### **2.2.3. Altura del salto de agua**

Penche (1998: 73) con respecto a la altura del salto de agua, señala que:

Se entiende por altura del salto de agua o salto bruto, la distancia vertical que recorre la masa de agua, es decir, el salto bruto viene dado por la diferencia de nivel entre la lámina de agua en la toma y en el punto donde se restituye a su cauce el caudal ya turbinado (nivel del agua en el canal de descarga). El salto bruto es igual a la presión estática.

De acuerdo con Mataix (1982: 457), en función de la altura del salto los aprovechamientos hidroeléctricos pueden clasificarse en:

- De gran caída: salto de más de 50 m.
- De media caída: salto entre 15 y 50 m.
- De pequeña caída: salto menor a 15 m.

Cuanto mayor es la altura del salto de agua, mayor será el potencial energético para un mismo caudal, y, en consecuencia, menor será el tamaño requerido de la turbina y mayor el número de revoluciones de su eje, para producir la misma cantidad de energía (Armand y Schleiss, 2006).

Una de las maneras más exactas para medir la altura del salto de un recurso hidráulico, es utilizando una estación total para la ejecución de estudios topográficos con curvas de nivel.

#### **2.2.4. Fundamentos de ingeniería hidráulica**

La ingeniería hidráulica, se fundamenta en la mecánica de los fluidos, aunque en ocasiones, ante la imposibilidad de abordar un problema concreto mediante su análisis matemático, se utiliza formulas empíricas. También se dispone de soluciones particulares a casos específicos, así como de una gran base de datos resultado de la experiencia.

De acuerdo con Young, Munson y Okiishi, (2005: 674), en el diseño de un aprovechamiento hidroeléctrico, la ingeniería hidráulica permite:

- Calcular las pérdidas de carga por fricción entre el agua y la pared interior del tubo.
- Optimizar las infraestructuras para reducir las pérdidas de energía.
- Diseñar los aliviaderos para que puedan dar paso a las avenidas previsibles.
- Diseñar las infraestructuras que disipen la energía del vertido.
- Controlar la erosión producida por la energía del agua.

- Controlar fenómenos tales como:
  - Inestabilidad en las conducciones de agua debido a turbulencias.
  - Entrada de aire en conductos cerrados.
  - El golpe de ariete en conductos cerrados.
  - Cavitación.
- Estudiar los fenómenos de sedimentación para eliminar las partículas que pueden dañar los equipos de generación.

Cengel y Cimbala, (2012: 199) establecen que la energía contenida en un fluido incompresible que circula por el interior de un conducto cerrado viene dada por la ecuación de Bernoulli:

$$H_1 = h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \quad (2.1)$$

Donde:

$H$ : energía total; m.

$h$ : elevación de la línea de corriente sobre un plano de referencia; m.

$P$ : presión; N/m<sup>2</sup>.

$\gamma$ : peso específico del agua; N/m<sup>3</sup>.

$V$ : velocidad de la línea de corriente; m/s.

$g$ : aceleración de la gravedad; m/s<sup>2</sup>.

La energía total en el punto 1 es la suma de la energía potencial  $h_1$ , la energía de presión  $P_1/\gamma$  y la energía cinética  $V_1^2/2g$ .

También, Cengel y Cimbala, (2012: 342) señalan que “un fluido que circula por el interior de un tubo, experimente pérdidas de energía debidas a:

1. La fricción contra las paredes del tubo.
2. La disipación viscosa como consecuencia de la fricción interna del flujo”.

Las pérdidas por fricción en régimen de flujo turbulento se presentan a lo largo de su longitud debido a la fricción entre las partículas del fluido y

entre el fluido y las paredes del conducto, y viene condicionada por la rugosidad y el gradiente de velocidad. Al aumentar la turbulencia aumenta el movimiento desordenado de las partículas y por ende aumenta la fricción. Por ello, las pérdidas de carga en régimen turbulento son siempre mayor que en régimen laminar (Pritchard y Leylegian, 2011: 358).

Aplicando la ecuación de Bernoulli en dos posiciones del recorrido del fluido se tiene:

$$h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} - h_f = h_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.2)$$

En la igualdad anterior  $h_f$  representa la energía pérdida en el tramo 1-2 debido a la fricción interna del fluido por la turbulencia y la fricción del fluido contra las paredes del tubo.

### **Pérdidas por fricción en tuberías**

Existen varias ecuaciones para calcular las pérdidas por fricción en tuberías con flujo turbulento, las cuales se han desarrollado con el objetivo de representar en forma matemática la resistencia al flujo a lo largo de un conducto. Esta resistencia al flujo comprende las fuerzas de fricción.

Para calcular las pérdidas por fricción en tuberías, Can (2005: 1-2) establece:

Las pérdidas por fricción en los tramos de la conducción se evalúan mediante la fórmula general de Darcy–Weisbach, la cual es válida tanto para flujos laminares como turbulentos circulando en conductos cerrados.

$$\Delta h_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.3)$$

Donde:

$\Delta h_f$ : pérdida de energía por fricción; m.

$\lambda$ : factor de fricción; adimensional.

$L$ : longitud de la tubería; m.

$D$ : diámetro interior de la tubería; m.

El valor del coeficiente de fricción  $\lambda$  es función de la rugosidad relativa ( $\varepsilon/D$ ) y del número de Reynolds. Su determinación se realiza con la ayuda de la ecuación de Colebrook – White, la cual es aplicable para tubos lisos o rugosos en la zona de transición o turbulenta.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \log \left( \frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.4)$$

Donde:

$\varepsilon$ : rugosidad absoluta del material de la tubería;  $\mu\text{m}$ .

$Re$ : número de Reynolds; adimensional.

### **Pérdidas en accesorios**

Cengel y Cimbala, (2012: 365), respecto a las pérdidas en accesorios, indican:

Un fluido circulando en régimen turbulento por un sistema de tuberías, con sus entradas, codos, válvulas y demás accesorios, experimenta, además de las pérdidas por fricción, pérdidas por disipación de la viscosidad. Dichas pérdidas se calculan a partir del coeficiente adimensional  $K_L$ , obtenido experimentalmente como cociente de la altura cinética. Las pérdidas localizadas son directamente proporcional a la energía cinética del fluido:

$$h_L = K_L \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.5)$$

Donde:

$K_L$ : coeficiente de pérdidas en accesorios; adimensional.

$h_L$ : pérdidas de energía en accesorios;  $m$ .

#### **2.2.5. Estimación del salto neto**

Zoppetti (1982: 2) define al salto neto como “altura de columna de agua que queda de restar al salto bruto todas las pérdidas por fricción en la tubería de conducción y las originadas por turbulencias en las rejillas, codos, válvulas y otros accesorios”.

$$H_{net} = H_{brut} - \Delta h_f - h_L \quad (2.6)$$

Donde:

$H_{net}$ : salto neto; m.

$H_{brut}$ : salto bruto disponible; m col H<sub>2</sub>O.

### 2.2.6. Espesor de tubería por presión interna y golpe de ariete

Tzatchkov y Caldiño, (2007: 106) señalan que “el espesor de pared de la tubería es función de la carga de rotura y el límite elástico del material escogido, del diámetro de la tubería y de la presión interna a la que está sometida”.

La presión interna en un punto de la tubería, es igual a la suma algebraica de la presión hidráulica estática en dicho punto más la sobrepresión por golpe de ariete.

#### Golpe de ariete

Crowe y Elger (2009: 305) definen al golpe de ariete como:

Fenómeno hidráulico de tipo dinámico oscilatorio causado por la interrupción violenta del flujo en una tubería debido al cierre rápido de una válvula, que da lugar a la transformación de la energía cinética en energía elástica, tanto en el flujo como en la tubería, produciendo incrementos de presión, subpresiones y cambios en el sentido de la velocidad del flujo.

A fin de analizar los fenómenos que se producen debido a la interrupción súbita del flujo en un conducto a presión, Ghidaoui y Zhao (2005: 51-52), utilizan los criterios de Allievi en tuberías rígidas para establecen que:

El valor de la velocidad de la onda cuando el fluido es agua, viene dado por:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}} \quad (2.7)$$

Donde:

$a$ : velocidad de la onda; m/s.

$k$ : coeficiente inverso del módulo de elasticidad del material =  $10^{10}/E$

$e$ : espesor de la tubería; m.

Si el tiempo de cierre  $T_C < \frac{2 \cdot L}{a}$  se tiene un cierre rápido, por lo que, el valor de la sobrepresión máxima producida por el golpe de ariete en algún punto de la tubería, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$G_A = \frac{a \cdot V}{g} \quad (2.8)$$

Donde:

$G_A$ : presión de golpe de ariete; m col H<sub>2</sub>O.

### **Espesor de la tubería**

Con respecto al espesor de tubería, Tzatchkov y Caldiño (2007: 107) señalan:

El espesor mínimo de pared requerido en cualquier punto de la tubería, se determina mediante la expresión:

$$e = \frac{(P_E + G_A) \cdot D}{2 \cdot S} \quad (2.9)$$

Donde:

$P_E$ : presión estática en la tubería; m col H<sub>2</sub>O.

$S$ : esfuerzo admisible del material de la tubería; MPa.

El esfuerzo actuante se debe limitar en un 75 % de la resistencia a la fluencia, cuando se considera el efecto del golpe de ariete más la presión hidráulica estática.

### **2.2.7. Potencial hidroenergético**

Smith y Amisial (1987: 18) definen al potencial energético como “cantidad total de energía presente en un sistema, independiente de cuál sea la fuente energética, posible de ser aprovechada mediante el uso de tecnología”.

Existen diferentes métodos para evaluar el potencial hidroeléctrico de un posible sitio de aprovechamiento. El método utilizado dependen del tipo de información que se tenga del sitio: información hidrológica, geológica y topográfica. Estos métodos se clasifican en dos grupos: métodos directos y métodos de operación de embalse (Ledec y Quintero, 2006: 33).

## Métodos directos

La evaluación del potencial energético en un determinado sitio de aprovechamiento se basa en informaciones de hidrología y topografía disponibles. Husain, Abdullah y Alimuddin, (2008: 69) establecen:

Para determinar la capacidad del potencial energético de un aprovechamiento se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_H = \gamma \cdot Q \cdot H_{net} \cdot 10^{-3} \quad (2.10)$$

Donde:

$\gamma$ : peso específico del agua (a 1 atm y 15°C); 9 810 N/ m<sup>3</sup> (White, 2011).

$P_H$ : potencia hidráulica a disposición de la turbina; kW.

$Q$ : caudal disponible; m<sup>3</sup>/s.

La potencia calculada con la ecuación anterior corresponde a la potencia neta que podría transformar la turbina, y como se observa, tanto la potencia como la energía producida, son directamente proporcionales al salto neto y el caudal de agua del aprovechamiento.

La potencia instalada o también denominada potencia útil nominal de una central hidroeléctrica puede ser obtenida a partir de:

$$P_{inst} = P_H \cdot \eta_T \quad (2.11)$$

$$\eta_T = \eta_t \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \quad (2.12)$$

Donde:

$P_{inst}$ : potencia instalada o potencia útil nominal; kW.

$Q_D$ : caudal de diseño; m<sup>3</sup>/s.

$\eta_t$ : rendimiento de la turbina; adimensional.

$\eta_g$ : rendimiento del generador; adimensional.

$\eta_{tr}$ : rendimiento del transformador; adimensional.

$\eta_T$ : rendimiento total; adimensional.

Para centrales hidroeléctricas se puede tomar, como primera aproximación, el producto de todos los rendimientos (rendimiento total), un valor comprendido entre 0,8 y 0,85 (Korpela, 2011: 365).

### **Métodos de operación de embalse**

Los métodos de operación de embalse permiten determinar con precisión el potencial hidroeléctrico de un determinado sitio de aprovechamiento.

Ledec y Quintero, (2006: 35) indican que “este método tiene una elevada precisión para la evaluación del potencial hidroeléctrico, pero generalmente es poco utilizado debido a la gran cantidad de información que requiere en las etapas iniciales del inventario. Este método solo se aplica cuando existe posibilidad de regulación anual en el sitio”.

### **2.2.8. Turbinas hidráulicas**

Cengel y Cimbala, (2012: 781) señalan que “las turbinas son turbomáquinas que convierten la energía mecánica libre disponible de los ríos en trabajo mecánico útil, por lo general mediante un eje rotatorio. La parte rotatoria de las turbinas hidráulicas se llama rodete”.

De acuerdo a la forma como el agua ejerce la fuerza sobre la turbina y como causa la rotación del rodete, las turbinas hidráulicas se clasifican como:

- Turbinas de acción o de impulso.
- Turbinas de reacción.

**Turbinas de acción o de impulso.-** Estas turbinas giran cuando un chorro de agua proveniente de una tobera (inyector) golpea uno de sus álabes a velocidad muy alta. Una gran proporción de la energía del agua está en forma de energía cinética debido a su velocidad (Korpela, 2011: 62).

Se han desarrollado tres tipos de turbinas de acción: Pelton, Turgo y Michael Banki.

**Turbinas de reacción.-** Estas turbinas actúan debido al agua que se mueve con una velocidad relativamente baja pero con alta presión. El agua llega al rodete de la

turbina a través de un sistema denominado de distribución que es totalmente cerrado (Korpela, 2011: 362).

Las turbinas de reacción en general son de dos clases: Las denominadas turbinas de flujo mixto que incluyen las turbinas Francis y las turbinas de flujo axial que incluyen las turbinas Kaplan.

**Selección.-** La selección de la turbina hidráulica adecuada depende del caudal y del salto neto de agua y se determina por medio de ábacos de selección como el mostrado en la figura 2.2.

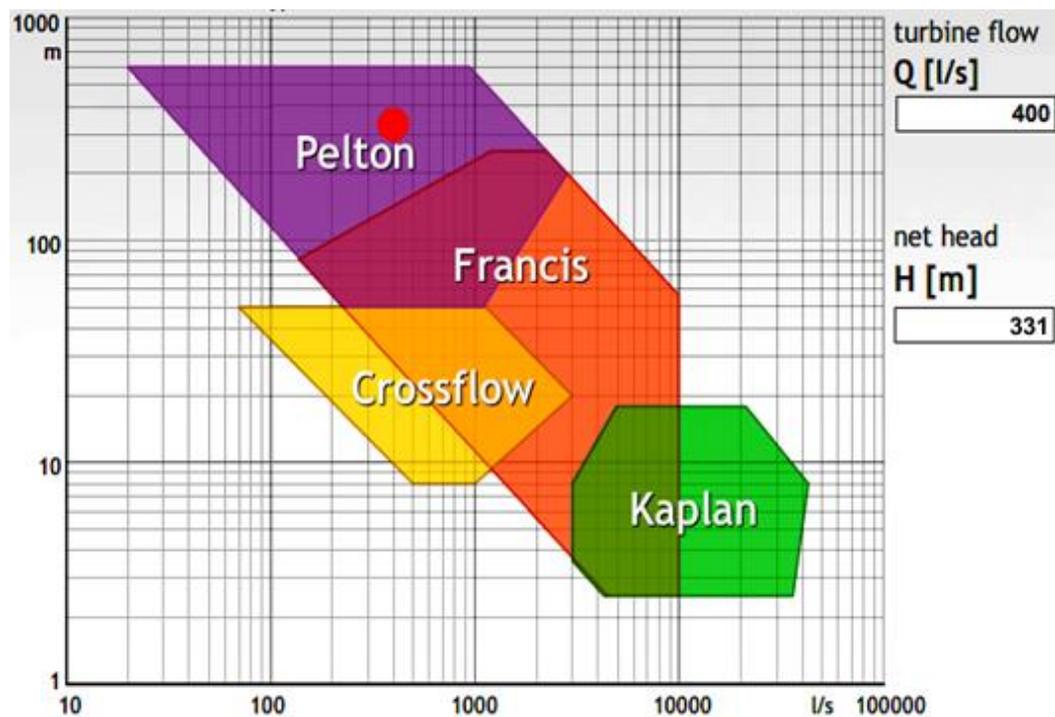


Figura 2.2. Abaco para la selección del tipo de turbina.

Fuente: Wiegert y Bähr, 2012.

Sangal, Garg y Kumar (2013: 425), con respecto a la selección de la turbina hidráulica, especifican:

La selección de la turbina que mejor se adapta a las condiciones del aprovechamiento y su dimensionamiento, depende de la velocidad específica  $N_s$ , que es el número de revoluciones que gira una turbina prototipo, que entrega una potencia de un kW, al instalarse en un salto de un metro de altura; viene dada por:

$$n_s = \frac{n \cdot \sqrt{1.358 \cdot P/i}}{H_{net}^{5/4}} \quad (2.13)$$

Donde:

$n_s$ : número específico de revoluciones; rpm.

$n$ : número de revoluciones de la turbina; rpm.

$P$ : potencia útil de la turbina; kW.

$i$ : para turbinas Pelton es el número de inyectoros, para otras turbinas  $i = 1$ ; adimensional.

En la Tabla 2.1 se muestran las características principales de varias turbinas hidráulicas, en las cuales se basará la selección del tipo adecuado de turbina para las condiciones específicas del proyecto objeto de investigación.

Tabla 2.1. Características principales de varias turbinas hidráulicas.

TIPO DE TURBINA	$n_s$ (rpm)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H (m)	P (kW)	$\eta_{m\acute{a}x}$ (%)
PELTON 1 CHORRO	< 30	0,05-50	30-1 800	2-300 000	91
PELTON 2 CHORROS	20-50				
PELTON 4 CHORROS	30-50				
PELTON 6 CHORROS	50-70				
MITCHELL - BANKI	40-160	0,025-5	1-50(200)	1-750	82
FRANCIS LENTA	60-150	1-500	2-750	2-750 000	92
FRANCIS NORMAL	150-250				
FRANCIS RÁPIDA	250-400				

Fuente: Morales, Corredor, Paba y Pacheco, 2013.

La velocidad de embalamiento representa el caso más desfavorable que se puede producir en la turbina y es la máxima velocidad adquirida por el eje cuando desaparece súbitamente la carga exterior, bien sea por corte del interruptor o por fallo en la excitación del alternador. La turbina aumenta su velocidad rápidamente hasta alcanzar la velocidad de embalamiento. Esta velocidad varía con el tipo de turbina, el ángulo de apertura del distribuidor y el salto neto (Armand y Schleiss, 2006: 189).

La tabla 2.2 muestra la relación entre la velocidad de embalamiento y la velocidad normal de rotación.

Tabla 2.2. Velocidad de embalamiento con respecto a la velocidad nominal.

TIPO DE TURBINA	VELOCIDAD DE EMBALAMIENTO ( $n_{max}/n$ )
Pelton	1,8-1,9
Mitchell-Banki	1,7-1,8
Turgo	1,7-1,8
Bombas usadas como turbinas	1,2-1,4
Francis lenta	1,7
Francis normal y rápida	1,8-2,2
Kaplan	2,0-2,6

Fuente: Armand y Schleiss, 2006.

Las dimensiones principales de la turbina Pelton son las mostradas en la figura 2.3:

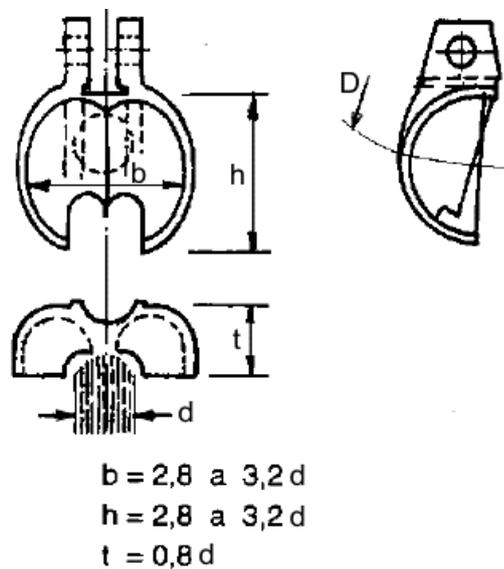


Figura 2.3. Dimensiones básicas de la turbina Pelton

Fuente: Husain, Abdullah y Alimuddin, 2008.

Con el fin de determinar las dimensiones principales de una turbina hidráulica, Sánchez y Ramírez (1995: 143-144), establecen:

En una turbina de acción donde el salto neto se convierte en energía cinética, la velocidad real del chorro a la salida del inyector se obtiene en base a la ecuación de Torricelli:

$$C = 0,97 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{net}} \quad (2.14)$$

Donde:

$C$ : velocidad del chorro a la salida del inyector; m/s.

El diámetro del chorro de la turbina se mide en la vena contracta y viene dado por la ecuación:

$$d = 0,55 \cdot \left( \frac{Q/i}{\sqrt{H_{net}}} \right)^{1/2} \quad (2.15)$$

Donde:

$d$ : diámetro del chorro del inyector; m.

El diámetro Pelton corresponde a la circunferencia media de las cucharas, tangente a la línea media del chorro y se obtiene de la ecuación:

$$D = (37 \text{ a } 39) \cdot \left( \frac{\sqrt{H_{net}}}{n} \right) \quad (2.16)$$

Donde:

$D$ : diámetro de la circunferencia media de las cucharas; m.

Para el cálculo del número de cucharas se aplica la ecuación:

$$Z = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{D}{d} \right) + (14 \text{ a } 16) \quad (2.17)$$

Donde:

$Z$ : número de cucharas de la rueda Pelton; adimensional.

La altura de montaje mínima aceptada para la turbina se obtiene a partir de la ecuación:

$$H_m = 10 \cdot d + \frac{H_{net}}{2000} \quad (2.18)$$

Donde:

$H_m$ : altura mínima requerida para el montaje de la turbina; m.

En las ecuaciones anteriores los valores bajos se emplean cuando la máxima eficiencia se desea para cargas parciales y los valores altos se emplean cuando se desea que la máxima eficiencia ocurra a plena carga.

### **2.3. Fundamentación legal**

Para establecer el marco legal de las energías renovables en el Ecuador es necesario mencionar la política nacional bajo la cual se desarrollan estas fuentes de energía, la misma que tiene como origen la aprobación de la nueva Constitución de la República en el 2008 y entre sus articulados considera la promoción y uso de las energías renovables. Los artículos que tienen relación con el presente estudio se transcriben a continuación:

“Artículo 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua.”

“Artículo 313.- El Estado se reserva el derecho de administrar, regular, controlar y gestionar los sectores estratégicos, de conformidad con los principios de sostenibilidad ambiental, precaución, prevención y eficiencia.”

“Artículo 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua”.

“Artículo 415.- El Estado Central y los Gobiernos Autónomos descentralizados adoptarán políticas integrales y participativas de ordenamiento territorial urbano de uso del suelo... Los gobiernos autónomos descentralizados desarrollarán programas de uso racional de agua y de reducción, reciclaje y tratamiento adecuado de desechos sólidos y líquidos.”

También es necesario destacar que el Plan Nacional de Desarrollo del Gobierno Nacional, denominado: “Plan Nacional del Buen Vivir 2009-2013”, establece algunos objetivos y políticas sobre el desarrollo de las energías renovables, como:

“Política 4.3: Diversificar la matriz energética nacional, promoviendo la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles”.

Adicionalmente, el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable en el año 2008 elaboró el documento denominado “Políticas Energéticas del Ecuador 2008 - 2020”, donde se destacan las siguientes políticas de Estado para el desarrollo sustentable del sector energético, relacionadas con las energías renovables:

c) impulsar un modelo de desarrollo energético con tecnologías ambientalmente amigables;

f) promover el desarrollo sustentable de los recursos energéticos e impulsar proyectos con fuentes de generación renovable (hidroeléctrica, geotérmica, solar y eólica) y de nueva generación eléctrica eficiente, incluyendo la nuclear, excluyendo la generación con base en el uso del diésel;

Finalmente, la Regulación del CONELEC 004/11, sobre el tratamiento para la energía producida con tecnologías basadas en recursos energéticos renovables no convencionales: eólica, biomasa, biogás, fotovoltaica, geotermia y centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW de capacidad instalada, establece que los precios preferentes a reconocerse por la energía medida en el punto de entrega para las centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW son los indicados en las Tabla 2.3. Los precios establecidos en esta Regulación se garantizarán y estarán vigentes por un período de 15 años a partir de la fecha de suscripción del Título Habilitante.

Tabla 2.3. Precios preferentes para centrales hidroeléctricas de hasta 50 MW (¢USD/kWh).

<b>CENTRALES</b>	<b>PRECIO</b> (¢USD/kWh)
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS HASTA 10 MW	7,17
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS MAYORES A 10 MW HASTA 30 MW	6,88
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS MAYORES A 30 MW HASTA 50 MW	6,21

Fuente: CONELEC, 2011.

## 2.4. Definición de términos básicos

Para un mejor entendimiento del trabajo de investigación es necesario definir algunos términos y palabras claves que permitirán al lector comprender la necesidad de investigación, el estudio realizado y la prospectiva que se espera alcanzar:

**Caudal:** Volumen de agua que fluye a través de una sección de un curso de agua por unidad de tiempo.

**Altura del salto de agua:** Es la diferencia de nivel entre la lámina de agua en la toma y en el punto donde se restituye a su cauce el caudal ya turbinado.

**Salto neto:** Se define como la altura de columna de agua que queda al restarle las pérdidas totales al salto bruto. El salto neto será el aprovechado por la turbina para generar potencia

**Central hidroeléctrica:** Instalación donde la energía potencial gravitatoria del agua es transformada primero en energía mecánica y después en eléctrica. Para las centrales hidroeléctricas, se considera como insumo, la energía del caudal de agua que ingresa a la turbina y como producto la electricidad generada.

**Casa de máquinas:** Es una estructura civil que contiene la mayor parte del equipo electromecánico, en los que se transforma la energía cinética del agua en energía mecánica y posteriormente en eléctrica.

**Energía.-** Es la capacidad que tiene un cuerpo en un determinado instante para realizar un trabajo.

**Energía renovable.-** Se considera energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se cuentan la eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar y biomasa.

**Energías alternativas:** Se considera energías alternativas aquellas que pueden sustituir a las energías convencionales como son los combustibles fósiles o las grandes centrales hidroeléctricas. Las fuentes de energías alternativas no producen

grandes impactos negativos al medio ambiente. Son consideradas como alternativas entre otras la energía solar, eólica, biomasa y las pequeñas centrales hidroeléctricas.

**Energía limpia:** Una energía se considera limpia cuando su utilización no tiene riesgos potenciales añadidos, y suponen un nulo o escaso impacto ambiental. Las energías limpias, son renovables y compatibles con sociedades sustentables.

**Potencial energético:** Cantidad total de energía presente en la naturaleza, independiente de cuál sea la fuente energética, posible de ser aprovechada mediante el uso de tecnología.

**Potencial hidroeléctrico:** Cantidad total de energía eléctrica de una cuenca hidrográfica, posible de ser aprovechada mediante tecnología.

**Generadores eléctricos:** Máquinas rotativas que transforman energía mecánica en energía eléctrica.

**Turbina hidráulica:** Son turbomáquinas que convierten la energía mecánica libre disponible de los ríos en trabajo mecánico útil, por lo general mediante un eje rotatorio.

**Potencia nominal:** Potencia máxima, en régimen continuo, para la cual fue prevista y dimensionada la instalación.

## **2.5. Conclusiones del capítulo**

A partir del análisis de la bibliografía consultada se establecieron los fundamentos teóricos para evaluar de forma eficiente el potencial energético de las líneas de alimentación para agua potable, considerados pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Además, se demostró la importancia de las energías renovables no convencionales en el Ecuador y específicamente de las centrales hidroeléctricas con capacidad instalada menor a 50 MW, las mismas que el gobierno nacional fomenta su desarrollo mediante leyes y regulaciones

La metodología de cálculo establecida y la secuencia lógica a seguir para alcanzar los objetivos de la investigación, permiten evaluar el potencial energético de la línea de conducción y dimensionar de forma preliminar el sistema para el aprovechamiento de la energía hidráulica disponible.

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

Si bien no existe una única metodología para el estudio de la energía hidráulica, en el presente capítulo se selecciona el enfoque que tendrá la investigación, se establece su modalidad y tipo, se especifica la población y la muestra, y se determinan los materiales y métodos, que mejor se adaptan al fenómeno en estudio, con la finalidad de garantizar la fiabilidad y calidad de los resultados.

### 3.1. Diseño de la investigación

La investigación es aplicada y tiene un enfoque cuantitativo debido a que se usa la recolección secuencial de datos para probar la hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, a fin de establecer patrones de comportamiento. Es del tipo experimental ya que se manipula intencionalmente las variables independientes para luego medir sus efectos sobre las variables dependientes.

Con el propósito de cumplir con los objetivos del estudio, el diseño concebido para la investigación es el mostrado en la siguiente figura:

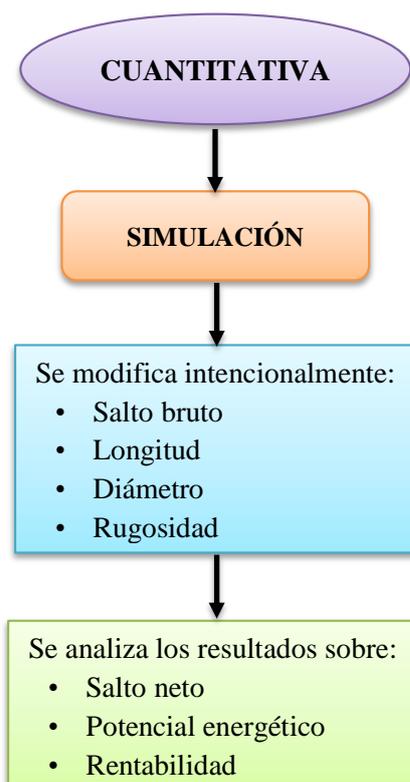


Figura 3.1. Diseño de la investigación.

## **3.2. Modalidad de la investigación**

Este trabajo se realiza bajo la modalidad de investigación documental y de campo, con carácter exploratorio y nivel descriptivo, debido a que para su desarrollo fue necesaria la medición de las variables *in situ*, la utilización de mapas y sistemas de posicionamiento global; así como, la recopilación de información de diversas fuentes bibliográficas, con el fin de evaluar el potencial energético de la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, para finalmente proponer un sistema de generación que aprovecha estos recursos energéticos renovables no convencionales y se adapta a las regulaciones vigentes de instituciones como: CONELEC, CENACE, CNEL, Secretaría del Agua y Transelectric.

### **3.2.1. Investigación documental**

Se aplica la investigación de carácter documental para recopilar, organizar y evaluar la información existente sobre estudios, definiciones y teorías, referentes a evaluar el potencial energético con fines de generación eléctrica a partir de recursos hídricos renovables, con el propósito de obtener un conocimiento completo de toda la información existente susceptible de ser utilizada en la presente investigación y así sustentar y fundamentar teóricamente el problema de investigación.

Como se describe en la sección 3.7, las fuentes bibliográficas consultadas, además de la indicada en la bibliografía, fueron: textos, artículos técnicos, páginas de internet relacionadas con el objeto de estudio y memorias técnicas de estudios realizados por la EP-EMAPA-A en el área de estudio.

### **3.2.2. Investigación de campo**

También se aplica la investigación de campo, como se describe en la sección 3.7, se realizaron observaciones y mediciones *in situ* de: caudales, cotas de elevación, coordenadas UTM, litología, composición del suelo y capacidad portante de terreno, a fin de evaluar los recursos hídricos disponibles y las características topográficas y geológicas del área de estudio, para luego comparar los datos

obtenidos con los estudios existentes en EP-EMAPA-A, y establecer causas y efectos, de tal manera que se pueda determinar de forma precisa el potencial energético de la línea de conducción y así plantear una alternativa confiable y eficiente de aprovechamiento de la energía hidráulica disponible.

### **3.3. Tipo de investigación**

Por la naturaleza de los datos se llegó al nivel descriptivo cuantitativo, ya que el objeto de estudio es externo al sujeto a investigar, tratando de lograr la máxima objetividad.

#### **3.3.1. Investigación experimental**

Se desarrolla una investigación prospectiva porque la dirección que sigue el investigador es de la variable independiente a la variable dependiente, es decir, se conoce o se manipula una variable independiente y se miden cambios o consecuencias en una variable dependiente. En el caso específico de la presente investigación se parte de la manipulación de las variables como: caudal y salto bruto disponibles, longitud, diámetro y rugosidad de la tubería; y se determinan los resultados que esto produce en el salto neto, el potencial energético y la energía anual posible de ser generada en la línea de conducción, permitiendo finalmente proponer el diseño de una central hidroeléctrica eficiente, que no comprometa el suministro de agua hacia la planta de tratamiento.

#### **3.3.2. Investigación descriptiva**

Se realiza una investigación descriptiva debido a que se recolecta información relacionada con el caudal y el salto disponible; la longitud, diámetro y rugosidad de la tubería (material); se clasifica y analiza esta información; y finalmente se identifica y describe la relación que existe entre estas variables y el potencial energético de la línea de conducción de agua potable, demostrando su causa - efecto.

### **3.4. Unidad de estudio (población y muestra)**

Al respecto Hernández (2010: 174), plantea: “La población es un conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones, pertenece a una misma clase, con la diferencia que se refiere a un conjunto limitado por el ámbito del estudio a realizar”. Hernández (2007: 211) expresa: “Las poblaciones deben situarse claramente en torno a sus características de contenido, de lugar y en el tiempo, y la delimitación de las características de la población no sólo depende de los objetivos del estudio, sino de otras razones prácticas”.

También, Hernández (2010: 176) establece: “La muestra es un subgrupo de la población de interés (sobre el cual se recolectarán datos, y que tiene que definirse o delimitarse de antemano con precisión), éste deberá ser representativo de la población”. Sobre la selección de la muestra, Hernández (2007: 214) manifiesta: “Para seleccionar una muestra, lo primero que hay que hacer es definir la unidad de análisis (personas, organizaciones, comunidades, situaciones, objetos y eventos). El sobre qué o quiénes van a ser medidos depende del planteamiento del problema a investigar y de los alcances del estudio”

Estas definiciones facilitan definir la población, la misma que para la presente investigación representa todos los datos de las mediciones realizadas durante el desarrollo de los estudios hidrológicos, topográficos y geológicos, a lo largo de los 31,85 km de longitud de la tubería de conducción; mientras que la muestra constituyen los datos de las mediciones de dichos estudios en las zonas cercanas al área de influencia del objeto de estudio de la investigación; es decir, en las zonas de implantación de: la represa Chiquihurco, la planta de tratamiento Apatug y la central hidroeléctrica.

### 3.5. Operacionalización de variables

Tabla 3.1. Variable Independiente: Línea de conducción de agua.

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADORES	ÍTEM	TÉCNICAS	INSTRUMENTO
Tubería que permite el transporte del agua desde el punto de captación hasta la planta potabilizadora, cuyas características permite calcular su capacidad para generar energía.	Portadores energéticos (caudal, salto)	Caudal disponible	m <sup>3</sup> /s	Medición	Flujómetro
		Salto de agua	m	Medición	Estación total Mapas Planos
	Características de la tubería	Longitud	m	Medición Cálculos	Estación total Mapas Planos Ecuaciones
		Diámetro	mm	Cálculos Simulaciones	Ecuaciones <i>Software Pipe Flow Expert</i>
		Rugosidad	µm	Cálculos Simulaciones	Ecuaciones <i>Software SolidWorks Simulation</i> Tablas

Tabla 3.2. Variable Dependiente: Potencial energético.

CONCEPTO	CATEGORÍA	INDICADORES	ÍTEM	TÉCNICAS	INSTRUMENTO
Cantidad neta de energía presente en un sistema, independiente de cuál sea la fuente energética primaria, posible de ser aprovechada mediante el uso de tecnología.	Salto neto	Pérdidas hidráulicas	m col H <sub>2</sub> O	Cálculos Simulaciones	Ecuaciones <i>Software Pipe Flow Expert</i>
		Pérdidas mecánicas	m col H <sub>2</sub> O	Cálculos Simulaciones	Ecuaciones <i>Software SolidWorks Simulation</i>
	Eficiencia energética	Energía eléctrica neta aprovechada	kWh	Cálculos	Ecuaciones
	Pre factibilidad	Costo de implementación	USD	Cálculos	Ecuaciones
	Rentabilidad	TIR, VAN, B/C	%	Cálculos	Ecuaciones

### **3.6. Modelo de la investigación**

A fin de cumplir con los objetivos planteados, en el desarrollo del presente trabajo de investigación se aplicó el siguiente procedimiento metodológico:

- ETAPA I: Recopilación de la información.
- ETAPA II: Análisis de la información.
- ETAPA III: Análisis de resultados.
- ETAPA IV: Diseño de la propuesta.

Las etapas I y II se aplican en el presente capítulo para determinar y analizar cada una de las variables independientes (Capítulo 3), mientras que la etapa III permite determinar cómo estas influyen en las variables dependientes (Capítulo 4); y la etapa IV se aplica para el desarrollo de la propuesta (Capítulo 5).

Los métodos, procedimientos e instrumentos utilizados para el desarrollo de cada etapa de la investigación se describen a continuación.

### **3.7. Recopilación y análisis de la información**

En este acápite se detallan los métodos, procedimientos e instrumentos aplicados para determinar las diferentes variables independientes de la investigación.

#### **3.7.1. Delimitación de la zona de estudio**

A fin de delimitar la zona de estudio se realiza la recopilación y análisis de la información necesaria para ubicar geográficamente el proyecto en base a una investigación documental de varias fuentes primarias relacionadas con el objeto de estudio:

##### **Documentos disponibles en EP-EMAPA-A:**

- Especificaciones técnicas del proyecto “Estudios y Diseños Definitivos de la Captación y Conducción del Sistema de Agua Potable Chiquihurco”. Ing. Carlos Lara. Ambato. 2011.

- Memoria de cálculo del Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato - Conducción. Ing. Carlos Lara. Ambato. 2011.

### **Planos y mapas**

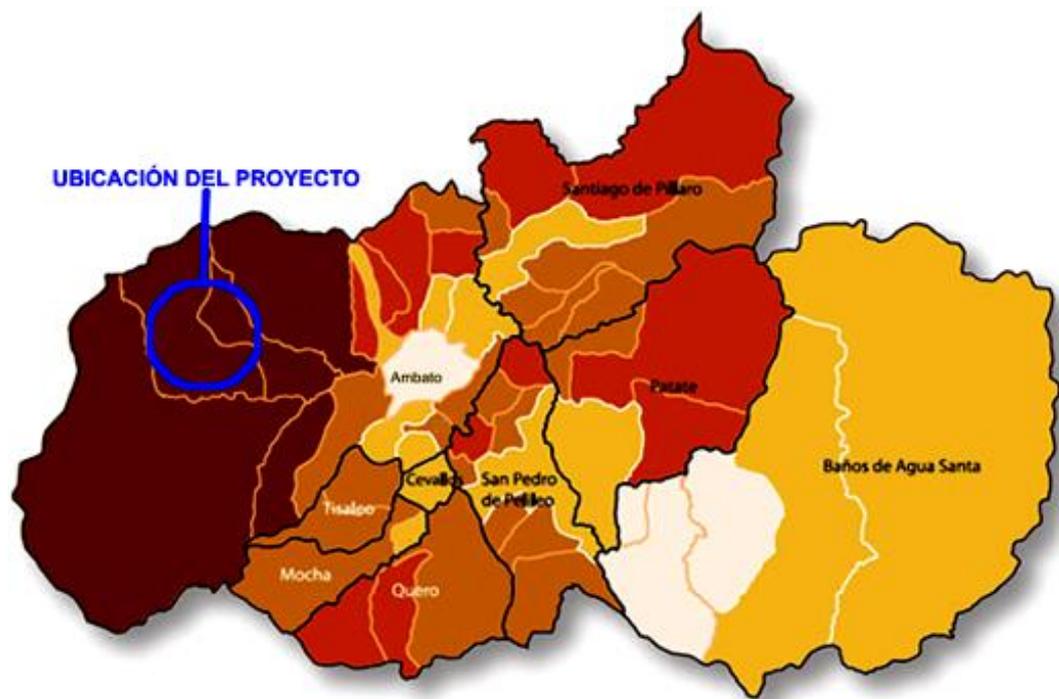
- Planimetría total del proyecto “Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato”. EP-EMAPA-A. Ambato, 2012 (Anexo 1).
- Fotogramétrica digital 3D de la provincia de Tungurahua. Google Earth. Digital Globe. 2012. (Anexo 2)
- Mapa político de la provincia de Tungurahua. Consejo Provincial de Tungurahua. Ambato. 2011.

Mediante la revisión de estos documentos y el uso de diferentes herramientas como resúmenes y fichas nemotécnicas, se extrae la información necesaria para establecer la ubicación geográfica del proyecto:

- Embalse de la Presa Chiquihurco ubicada en las estribaciones de la cordillera Occidental de los Andes, a 30 km de la ciudad de Ambato en las coordenadas UTM N 9 866 125,12 y E 743 600,70 con una cota de 3 705,78 msnm.
- Planta de Tratamiento ubicada en el sector de Apatug en la parroquia Juan Benigno Vela en las coordenadas UTM N 8 855 017,34 y E 757 337,66 con una cota de 3 258,64 msnm.
- Punto más bajo de la línea de conducción ubicada en el sector de Aguajan en las coordenadas UTM N 9 859 055,00 y E 754 500,00 en la cota 2 812,82 msnm.

A partir de esta información y con la ayuda del programa Google Earth, se ubica en un mapa fotogramétrico 3D, tanto la Presa Chiquihurco como la Planta de Tratamiento (Anexo 2).

En base a la información geográfica proporcionada por el Google Earth se establece que la zona de influencia del estudio se encuentra en el sitio mostrado en el mapa político de la provincia de Tungurahua en la figura 3.2.



**Figura 3.2. Ubicación geográfica del proyecto.**  
Fuente: Duarte, 2010.

### **3.7.2. Recurso hídrico disponible**

La recopilación de datos para determinar el recurso hídrico disponible en la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, se realiza mediante las siguientes actividades:

#### **Revisión bibliográfica**

Considerando que la única fuente que suministra agua a la tubería de conducción es la presa Chiquihurco, a fin de evaluar el recurso hídrico disponible, se recopiló y revisó la información hidrológica disponible en el Consejo Provincial de Tungurahua, en las fuentes que se detalla a continuación:

- Memoria técnica del proyecto: “Estudios de prefactibilidad, factibilidad y diseños definitivos de la alternativa seleccionada de la presa Chiquihurco sobre el río Calamaca. CAMINOSCA. 2011.
- Estudios hidrológicos del proyecto: “Vasos de Regulación de la Cuenca Alta del Río Ambato (Segunda Etapa)”. CAMINOSCA. 2011.

Luego de la revisión de estos documentos se extrae la información relacionada con las características principales de la presa Chiquihurco (figura 3.3) y los recursos hídricos disponibles en la represa. Estos datos se presentan en forma sintetizada en la tabla 3.3 y son analizados en el capítulo IV.

Tabla 3.3. Características principales de la presa Chiquihurco.

DESCRIPCIÓN	VALOR
Altura máxima sobre la cota del cauce actual	35,00 m
Altura máxima sobre la cota de cimentación	41,20 m
Nivel máximo extraordinario	3 739,00 msnm
Nivel máximo normal de operación	3 738,50 msnm
Nivel mínimo normal de operación	3 715,00 msnm
Volumen total hasta la cota máxima normal	2 545 000 m <sup>3</sup>
Volumen útil hasta la cota máxima normal de operación	2 480 000 m <sup>3</sup>
Precipitación media anual	837,7 mm
Caudales mensuales máximos disponibles	7,20 m <sup>3</sup> /s
Caudales mensuales mínimos disponibles	0,73 m <sup>3</sup> /s
Caudal concedido a EP-EMAPA-A para la potabilización	0,40 m <sup>3</sup> /s
Caudal ecológico	0,10 m <sup>3</sup> /s

Fuente: Rodríguez, 2010.



Figura 3.3. Represa Chiquihurco.

Fuente: Rodríguez, 2010.

### Mediciones del caudal *in situ*

Debido a que el caudal de agua concedido a EP-EMAPA-A es llevado a la tubería de conducción a través de un canal abierto en la captación a la salida de la Presa Chiquihurco (figura 3.4) y este caudal es regulado mediante una válvula de compuerta, se realizaron mediciones del flujo de agua en dicho canal con el fin de determinar el caudal de diseño disponible.



**Figura 3.4. Canal de captación a la salida de la Presa Chiquihurco.**

Fuente: Rodríguez, 2010.

Las mediciones se realizan aplicando las normas ISO 6416:2005 (Hydrometry - Measurement of discharge by the ultrasonic method) y EN ISO 748:2000 (Measurement of liquid flow in open channels - Velocity-area methods), las mismas que establecen el método de medición, calibración, instalación y el muestreo que se debe aplicar para determinar el flujo de agua.

El equipo utilizado es un flujómetro portátil ultrasónico para canales abiertos Nivus OCM Pro (figura 3.5) con descarga de datos mediante vía USB, utiliza el efecto Doppler para la medición de caudal, mediante un sistema de tratamiento de haces ultrasónicos que divide el flujo de caudal en 16 capas horizontales, escanea cada una individualmente, traza un perfil real de velocidades dentro de cada capa y finalmente calcula en tiempo real el flujo total y el instantáneo.

Como se muestra en la figura 3.5, el flujómetro se instaló en el canal de captación a la salida de Presa Chiquihurco, luego con el equipo ya instalado se abrió la compuerta de descarga para permitir la circulación de agua y proceder con las mediciones.



**Figura 3.5. Medición del flujo de agua con flujómetro ultrasónico.**

Aplicando las técnicas de muestreo para mediciones de caudal en canales abiertos y siguiendo el procedimiento indicado en las normas ISO 6416:2005 y EN ISO 748:2000, se tomaron 50 mediciones con un tiempo de duración de cada medición de 3 minutos, durante un periodo total de medición de 2,5 horas, en una jornada de 5 horas.

Una vez finalizadas las mediciones los datos se descargaron al computador personal donde fueron procesados para luego transferir a la matriz mostrada en la tabla 3.4 los valores de los caudales totales obtenidos en cada una de las mediciones.

Tabla 3.4. Caudales medidos en la captación de la tubería de conducción.

ORDEN	CAUDAL (l/s)								
1	398,5	11	392,4	21	402,3	31	400,8	41	398,5
2	396,1	12	398,7	22	405,1	32	406,4	42	403,2
3	389,0	13	401,5	23	402,2	33	398,5	43	402,6
4	400,6	14	402,8	24	399,2	34	403,6	44	401,4
5	398,7	15	397,7	25	398,3	35	403,2	45	397,9
6	401,2	16	399,2	26	399,7	36	402,1	46	405,5
7	404,3	17	401,1	27	399,5	37	400,6	47	403,0
8	400,9	18	398,3	28	397,9	38	400,0	48	403,3
9	399,4	19	399,9	29	397,4	39	402,1	49	401,5
10	396,3	20	396,6	30	402,4	40	399,2	50	399,6

Estos datos se procesan cuantitativamente aplicando una secuencia de métodos de estadística descriptiva para así obtener la distribución de frecuencia de las mediciones de caudal mostrados en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Distribución de frecuencia de las mediciones de caudal.

GRUPO	CLASE	MARCA DE CLASE	FRECUENCIA	PORCENTAJE (%)	FRECUENCIA ACUMULADA
1	389 - 391,9	390,5	1	2,0	1
2	392 - 394,9	393,5	1	2,0	2
3	395 - 397,9	396,5	7	14,0	9
4	398 - 400,9	399,5	20	40,0	29
5	401 - 403,9	402,5	17	34,0	46
6	404 - 406,9	405,5	4	8,0	50

### 3.7.3. Salto bruto disponible

Con el objeto de determinar el salto bruto total de agua entre la captación de agua a la salida de la presa Chiquihurco y la descarga en la planta de tratamiento Apatug, se realizó una investigación documental de las fuentes que se describen a continuación:

#### Documentos disponibles en EP-EMAPA-A:

- Memoria técnica del proyecto “Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta De Ambato”. Ing. Leo Max Rodríguez. Quito, 2011.

- Informe final del proyecto “Levantamiento Topográficos Lineal: Desde Represa Chiquihurco hasta la Planta de Tratamiento Apatug”. Arq. Iván Acurio. Ambato. 2010.

#### **Planos**

- Planimetría total del proyecto “Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato”. EP-EMAPA-A. Ambato, 2012 (Anexo 1).
- Planimetrías parciales del proyecto “Levantamiento Topográficos Lineal: Desde Represa Chiquihurco hasta la Planta de Tratamiento Apatug”. Arq. Iván Acurio. Ambato. 2010
- Perfil total del proyecto “Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato”. EP-EMAPA-A. Ambato, 2012 (Anexo 3).

#### **3.7.4. Longitud de la tubería de conducción**

La longitud total de la tubería de conducción se determina mediante una investigación documental de las mismas fuentes primarias utilizadas para encontrar el salto bruto.

La información que se extrae directamente de los documentos revisados es:

- Longitud de tubería desde la Presa al punto más bajo: 21 488,0 m
- Longitud total de la conducción Presa – Planta de Tratamiento: 31 850,6 m

#### **3.7.5. Diámetro de la tubería de conducción**

Para determinar el diámetro más adecuado de la tubería de conducción se realizan simulaciones en el Programa *Pipe Flow Expert* V5.12 a partir de los datos determinados en las secciones anteriores y se determinan las pérdidas totales que generan cada diámetro de tubo estándar hasta encontrar el más adecuado.

#### **Programa *Pipe Flow Expert***

El programa *Pipe Flow Expert* es una potente herramienta computacional diseñada para ayudar a analizar y resolver una amplia gama de problemas en los que se

determinan el flujo y pérdidas de presión en tuberías. El *Pipe Flow Expert* permite dibujar complejos sistemas de tuberías y analizar las características del sistema cuando se está produciendo el flujo bajo diferentes condiciones de operación.

Los resultados que genera el programa incluyen:

- Tasas de flujo para cada tubería
- Velocidades de fluido para cada tubería
- Números de Reynolds
- Factores de fricción
- Pérdidas de presión por fricción en la tubería
- Pérdidas de presión en accesorios
- Presiones en cada nodo

### **Simulaciones con *Pipe Flow Expert***

Las simulaciones tienen por objeto encontrar las pérdidas por fricción que se producen para diferentes diámetros, para comparar éstas pérdidas con el salto bruto total disponible y así determinar el diámetro de tubería que produce pérdidas por fricción no muy elevadas

Las pérdidas por fricción no mayores al 20 % del salto bruto es un valor generalmente aceptable (Crowe y Elger, 2009).

Para realizar las simulaciones se modela un sistema simplificado de la línea de conducción, como se muestra en la figura 3.6, y mediante el programa se calculan las pérdidas por fricción para diferentes diámetros de tubería estándar (sección 3.7.6).

Los datos que se mantienen constante en todas las simulaciones son:

- Longitud total de la tubería = 31 850,6 m
- Caudal medio de agua = 400 l/s

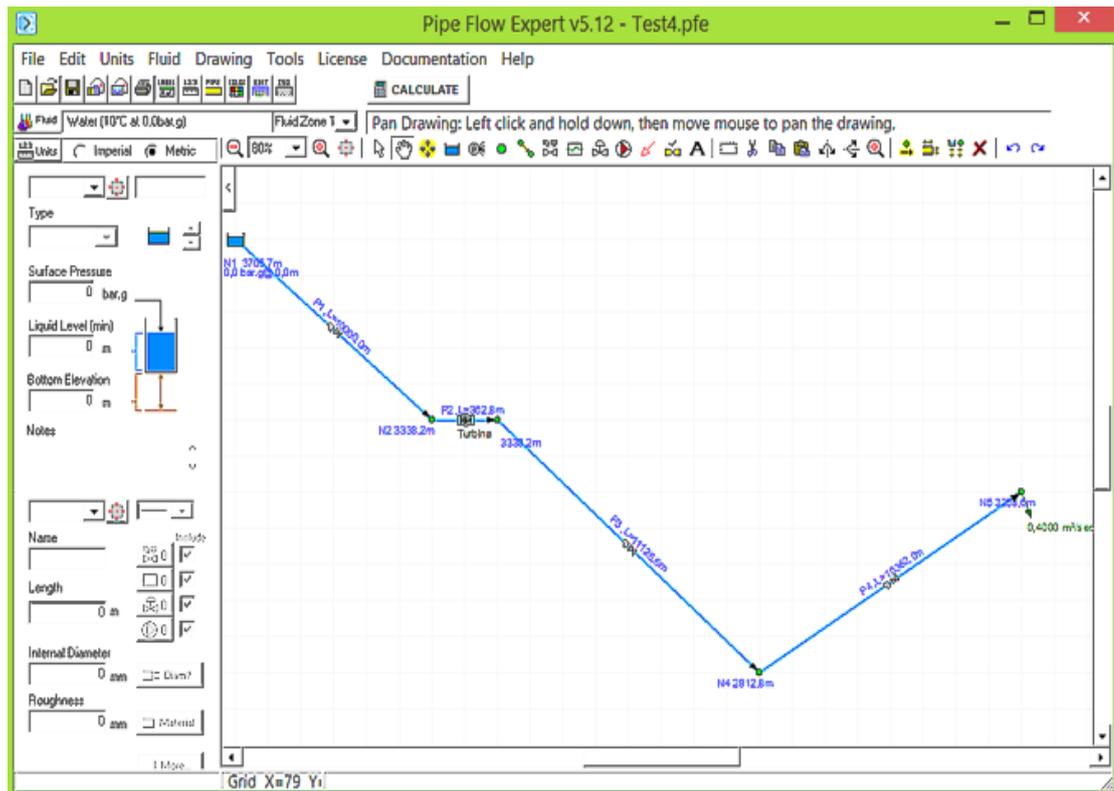


Figura 3.6. Simulación de la conducción en el programa *Pipe Flow Expert*.

### 3.7.6. Material de la tubería de conducción

El material con el que se fabrica la tubería de conducción determina su rugosidad y de esta depende la magnitud de las pérdidas por fricción.

El criterio para la selección del material de la tubería se sustenta en la comparación de distintos materiales disponibles en el mercado que prestan un servicio equivalente, es decir; que resistan los esfuerzos a los que estarán sometidos, tomando en cuenta para su selección parámetros tales como: resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, costo de instalación y facilidad de instalación.

Debido a la altura piezométrica, los esfuerzos máximos a los que está sometido la tubería se producen en el punto más bajo del perfil de la línea de conducción, en la cota de 2 812,82 msnm.

La máxima presión estática que soporta la tubería se obtiene de la diferencia de cotas entre la Represa Chiquihurco y el punto más bajo de la tubería de conducción:

$$p_{est} = (3705,78 - 2812,82) \text{ m}$$

$$p_{est} = 892,96 \text{ m col } H_2O = 8,756 \text{ MPa}$$

Entonces, la carga debido al peso del agua en tubos de 600 mm de diámetro y 12 m de longitud, viene dado por:

$$W_a = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,6^2 \text{m}^2 \cdot 12 \text{ m}$$

$$W_a = 3392,92 \text{ kg} = 33284,55 \text{ N}$$

Para determinar los esfuerzos que producen estas cargas en la tubería se utiliza el programa *SolidWorks Simulation*. Mediante este programa se realiza un análisis de tensiones y deformaciones utilizando distintos materiales de tubería existentes en el mercado nacional, hasta determinar el material más adecuado que resiste dichas cargas con un factor de seguridad mínimo de 1,5.

### ***Programa SolidWorks Simulation***

El *SolidWorks Simulation* es un programa de Análisis por Elementos Finitos que calcula de forma rápida y precisa esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad de un sistema mecánico en función de los materiales, cargas y restricciones asignadas.

*SolidWorks Simulation* ofrece soluciones de simulación para análisis estáticos lineales y no lineales, de frecuencia, de pandeo, térmicos, de fatiga, de recipiente a presión, de impacto, dinámicos lineales y no lineales.

El *software* utiliza el Método de Elemento Finito (MEF) que es una técnica numérica para analizar diseños de ingeniería. El MEF está aceptado como el método de análisis estándar debido a su generalidad y compatibilidad para ser implementado en computadoras. El MEF divide el modelo en numerosas piezas pequeñas de formas simples llamadas "elementos", que reemplazan eficazmente un problema complejo por muchos problemas simples que deben ser resueltos de manera simultánea.

Las simulaciones mediante *SolidWorks Simulation* se realizan en los siguientes materiales para tuberías:

Tabla 3.6. Materiales para tuberías de presión.

MATERIAL	PRESIÓN DE TRABAJO (MPa)
Fundición	2,0 - 3,0
Acero	6,0 - 10,0
Policloruro de vinilo (PVC)	0,25 - 2,5
Polietileno (PE)	0,5 - 1,0

Fuente: Tzatchkov y Caldiño, 2007.

### 3.7.7. Cota de implantación del proyecto

Al momento de analizar el aprovechamiento hidroeléctrico de un río se estudian diferentes tramos del mismo para determinar cuál de ellos es el más adecuado para situar las diferentes obras requeridas (captación, tubería de presión y casa de máquinas), tomando en cuenta dos parámetros fundamentales: el salto que existe (más pendiente en menos recorrido) y el caudal disponible. Una vez determinados estos tramos se realiza una comparación entre los mismos poniendo principal atención a parámetros tales como: los costos, la energía producida y el impacto ambiental.

Sin embargo, en esta investigación, debido a que el propósito del proyecto es generar energía mediante el aprovechamiento del trazado de la tubería de conducción del proyecto “Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato” y del caudal de agua cruda concedido por el Consejo Provincial de Tungurahua a la EP-EMAPA-A, la metodología para la selección de la ubicación del proyecto se reduce a encontrar el sitio que cumpla con las diferentes exigencias técnicas, económicas y ambientales requeridas para este tipo de proyecto:

- No afectar el objetivo primordial del proyecto de conducir el agua por gravedad hacia la planta de tratamiento.
- Generar la mayor cantidad de energía posible.
- Provocar las menores modificaciones en el trazado original de la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug.

- Causar el menor impacto ambiental.
- Incurrir en los menores costos de construcción.
- Obtener la mayor relación beneficio/costo.

En esta etapa del proyecto, es necesario determinar la cota mínima de implantación del sistema de aprovechamiento hidroeléctrico en función de las pérdidas de presión totales en la tubería y a este valor incrementarle al menos 20 m de altura para otorgarle un rango de seguridad que permita compensar cualquier imprecisión en el montaje de la tubería, así como el aumento de su rugosidad debido al uso a lo largo de los años de vida útil.

### **3.7.8. Salto neto**

Según se definió en la sección 2.2.5, el salto neto es el resultado de restar al salto bruto todas las pérdidas de presión generadas en la tubería de conducción, y su magnitud viene dado por la ecuación 2.6.

### **3.7.9. Potencial energético**

De acuerdo con lo establecido en la sección 2.2.8, para la evaluación del potencial energético del aprovechamiento hidroeléctrico se aplica el método directo, que se basa en las informaciones de hidrología y topografía disponible.

Por lo tanto, el potencial energético o también denominado potencia útil nominal del aprovechamiento hidroeléctrico puede ser obtenida a partir de la ecuación 2.11 y como primera aproximación se toma el producto de todos los rendimientos igual a 0,85.

## **3.8. Metodología de análisis económico**

Para determinar la viabilidad de un proyecto de inversión es necesario realizar el análisis económico del mismo. Un proyecto de inversión en un aprovechamiento

hidroeléctrico exige unos pagos, extendidos a lo largo de su ciclo de vida, y proporciona unos ingresos también distribuidos en el mismo periodo de tiempo. Los pagos incluyen el costo inicial de inversión, unas cantidades anuales para seguros e impuestos, gastos de operación y mantenimiento; mientras que los ingresos corresponden a las ventas de la electricidad generada. El análisis económico tiene como objetivo comparar ingresos y gastos para la posible alternativa a fin de decidir si es conveniente continuar con los estudios o si hay que renunciar definitivamente al proyecto.

El primer paso para evaluar económicamente un proyecto es el de estimar con la mayor precisión posible el costo de la inversión. En una primera aproximación, se realiza una investigación documental de varias fuentes bibliográficas a fin de utilizar datos económicos correspondientes a instalaciones similares.

### **3.8.1. Requerimiento de obras y equipamiento**

Las fuentes consultadas para determinar las obras y equipos requeridos en este tipo de aprovechamientos son:

- Energy recovery in existing infrastructures with small hydropower plants - Multipurpose schemes - Overview and examples. European Directorate for Transport and Energy. 2010.
- Integration of small hydro turbines into existing water infrastructures. Aline Choulot, Vincent Denis y Petras Punys. 2012.

De la revisión bibliográfica se determina que debido a las condiciones particulares de este tipo de proyecto, se utilizarán varias de las estructuras desarrolladas para el “Proyecto de Agua Potable Chiquihurco – Zona Alta de Ambato”, por lo que las obras y equipamientos requeridos y que no forman parte del proyecto de agua potable son:

1. Vías de acceso.
2. Casa de Máquinas.
3. Equipos electromecánicos (turbina, puente grúa y válvulas).

4. Equipo de comunicación y control.
5. Subestación.
6. Línea de transmisión.

### **3.8.2. Consideraciones básicas**

No hay duda de que íntimamente ligado a los factores funcionales se encuentran los factores económicos, ya que no puede producirse energía si el coste de generación de la misma es excesivo.

Por tal motivo y en función de la información relacionada con el presupuesto de inversión inicial, los gastos e ingresos relacionados con la operación del proyecto y su proyección del flujo de caja, se evalúan varios indicadores económicos para determinar la rentabilidad del proyecto como el VAN, TIR, relación Beneficio/Costo y periodo de recuperación de la inversión (Sapag, 2009).

Para el desarrollo del análisis económico se considera un Período de Estudio de 30 años (período menor al tiempo esperado de vida útil de la Central Hidroeléctrica) y una Tasa de Interés Activa de 10,21 % (tomada de la tabla de Tasas de interés referenciales del Banco Central del Ecuador en octubre 2013). Los principales parámetros a ser tomados en consideración en el análisis económico son:

- Presupuesto de Inversiones.
- Costos y Gastos.
- Depreciación.
- Ingresos.
- Flujo de Caja.
- Indicadores Económicos.

Como primera aproximación en esta etapa de la investigación, los datos de costos para el análisis económico se extraen de los siguientes documentos:

- Costos indicativos de generación eléctrica en Colombia. Unidad de Planeación Minero-Energética. 2005.

- Análisis técnico - comercial de las centrales hidroeléctricas Recuperadora y El Carmen de la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable Quito. Juan Pablo Peña y Jesús Ibarra. 2011.

### Presupuesto de inversiones

Como primera aproximación en esta etapa de la investigación, los datos para el presupuesto de inversiones se basan en los valores recomendados para generación hidroeléctrica en centrales con potencias de 1 a 5 MW.

El presupuesto de inversiones se agrupó dividido por frentes de trabajo, que han sido considerados para los fines del caso, los mismos que se presenta su resumen en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Presupuesto de inversiones.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO TOTAL (USD)
A1	Estudios e Ingeniería	USD	1 519 794,0	3,0 %	45 593,82
A2	Predios	ha	0,5	25 000,0	12 500,00
A3	Vías de acceso	km	1,0	50 000,0	50 000,00
A4	Tubería de Presión	m	0,0	NA	0,00
A5	Casa de Máquinas	kW	1 102,5	120,0	132 294,00
A6	Equipo Electromecánico	global	1,0	735 000,0	735 000,00
A7	Subestación	global	1,0	350 000,0	350 000,00
A8	Línea de Transmisión	km	12,0	20 000,0	240 000,00
A9	Fiscalización	USD	1 519 794,0	4,0 %	60 791,76
A10	Imprevistos Generales	USD	1 519 794,0	10,0 %	151 979,40
<b>COSTO TOTAL DEL PROYECTO</b>					<b>1 778 158,98</b>

### Costos y gastos

La proyección de costos y gastos está referida a los egresos de dinero que se harán por la utilización de bienes y servicios que tengan relación con la generación de hidroelectricidad. En este caso estos costos incluyen cuatro cuentas, las cuales

abarcan en forma integral las salidas de efectivo que conlleva la operación de la central hidroeléctrica como se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Gastos anuales de mantenimiento y operación.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	GASTO ANUAL (USD)
B1	Operación de la Central Hidroeléctrica	kW	1 102,45	15,0	16 536,75
B2	Mantenimiento de los Equipos	USD	735 000,00	3,0 %	22 050,00
	Mantenimiento de Obras Civiles	USD	532 294,00	2,0 %	10 645,88
	Mantenimiento de la Tubería de Conducción	USD	0,00	1,0 %	0,00
	Mantenimiento de las Líneas de Transmisión Eléctricas	USD	240 000,00	2,0 %	4 800,00
B3	Seguros	USD	1 519 794,00	0,5 %	7 598,97
B4	Plan de Manejo Ambiental	USD	772 294,00	5,0 %	38 614,70
<b>GASTO TOTAL ANUAL</b>					<b>100 246,30</b>

### Depreciación de obras y equipos

Los costos de depreciación se asumen lineales previendo una vida útil de 30 años para las obras civiles y tubería (depreciación de 3,33 % anual), y de 15 años para los equipos (depreciación de 6,67 % anual).

Tabla 3.9. Resumen de depreciación de obras y equipos.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	GASTO ANUAL (USD)
C1	Depreciación de Obras	USD	772 294,00	3,3 %	25 717,39
C2	Depreciación de Equipos	USD	735 000,00	6,7 %	49 024,50
<b>DEPRECIACIÓN ANUAL</b>					<b>74 741,89</b>

### Ingresos

De acuerdo con la REGULACIÓN No. CONELEC – 004/11, la remuneración por venta a un precio especial para energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales, es de 7,17 cUSD/kWh para generadoras

hidroeléctricas con capacidad instalada entre 1 y 10 MW. En base a este precio los ingresos medios anuales se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Ingresos anuales por venta de energía.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD/kWh)	VENTA ANUAL (USD)
D1	Energía media anual generada	kWh/año	8 070 000,00	0,0717	578 612,12
<b>INGRESO TOTAL ANUAL</b>					<b>578 612,12</b>

### Evaluación económica

Para realizar la evaluación económica del proyecto se aplican métodos dinámicos que tienen en cuenta todos los ingresos y gastos a lo largo de la vida del proyecto y el momento en que estos tienen lugar.

**Método del valor actual neto (VAN).** La diferencia entre los ingresos y los gastos, descontados ambos al año cero en que el comienza la inversión, se conoce como VAN. La ecuación para el cálculo de VAN es:

$$VAN = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{R_i - (I_i + O_i + M_i)}{(1 + r)^i} + V_r \quad (3.1)$$

Donde:

$R_i$ : ingresos en el año  $i$ ; USD.

$I_i$ : inversión en el año  $i$ ; USD.

$O_i$ : costos de operación en el año  $i$ ; USD.

$M_i$ : costos de mantenimiento en el año  $i$ ; USD.

$r$ : tasa anual de descuento; %.

$n$ : número de años de vida del proyecto, adimensional.

$V_r$ : valor residual de la inversión; USD.

**Relación Beneficio/Costo.** El método del costo/beneficio compara el valor actual de los beneficios previstos con el de los costos actualizados, de acuerdo con la ecuación:

$$R_{b/c} = \frac{\sum_0^n \frac{R_i}{(1+r)^i}}{\sum_0^n \frac{(I_i+O_i+M_i)}{(1+r)^i}} \quad (3.2)$$

Donde:

$R_{b/c}$ : relación beneficio – costo; adimensional.

Los parámetros tienen el mismo significado que en la ecuación (3.1). Los proyectos con una relación menor que uno son automáticamente rechazados

**Tasa Interna de rentabilidad (TIR).** Es la tasa de descuento  $r$ , para la que el VAN es cero. El TIR generalmente se calcula por un proceso iterativo hasta llegar a un valor  $r$  que de un VAN cero. El proyecto más rentable es el que ofrece un TIR más elevado.

Para calcular los indicadores económicos se utilizan hojas electrónicas de Microsoft Excel ya que estas realizan el proceso iterativo de forma automática.

### **Flujo de caja**

La proyección de flujos de caja constituye uno de los instrumentos financieros analíticos de mayor importancia para establecer el óptimo funcionamiento de las operaciones económicas de un proyecto hidroeléctrico, debido a que el flujo de caja permite estimar la rentabilidad del proyecto en base a los ingresos y egresos que tendrá durante su vida útil (Sapag, 2009).

Es necesario mencionar que para el desarrollo de la proyección de los flujos de caja mostrados en la tabla 3.11, se considera que toda la inversión para el desarrollo de la propuesta se realiza en el año 0, la tasa de descuento anual es de 10,21 % y no se prevé valor residual alguno.

Tabla 3.11. Proyección del flujo de caja del aprovechamiento hidroeléctrico.

AÑO	INVERSIÓN INICIAL (USD)	INGRESOS ANUALES (USD)	GASTOS ANUALES (USD)	DEPREC. ANUAL (USD)	UTILIDAD NETA (USD)	FLUJO DE CAJA (USD)	FLUJO DE CAJA ACUMULADO (USD)
0	1.778.158,98 <sup>-</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00	1.778.158,98 <sup>-</sup>	-1.778.158,98
1		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	-1.299.793,16
2		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	-821.427,35
3		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	-343.061,53
4		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	135.304,29
5		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	613.670,10
6		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	1.092.035,92
7		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	1.570.401,74
8		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	2.048.767,55
9		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	2.527.133,37
10		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	3.005.499,19
11		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	3.483.865,00
12		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	3.962.230,82
13		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	4.440.596,64
14		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	4.918.962,46
15		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	5.397.328,27
16		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	5.875.694,09
17		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	6.354.059,91
18		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	6.832.425,72
19		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	7.310.791,54
20		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	7.789.157,36
21		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	8.267.523,17
22		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	8.745.888,99
23		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	9.224.254,81
24		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	9.702.620,62
25		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	10.180.986,44
26		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	10.659.352,26
27		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	11.137.718,07
28		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	11.616.083,89
29		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	12.094.449,71
30		578.612,12	100.246,30	74.741,89	403.623,93	478.365,82	12.572.815,52

En la Tabla 3.11 se observa que el flujo de caja acumulado es negativo (en rojo) durante los primeros tres años de operación de central hidroeléctrica. A partir del cuarto año el flujo de caja se vuelve positivo, indicando que se ha recuperado la

inversión y se comienza a obtener ganancias por la venta de energía. La utilidad total debida a la operación de la central hidroeléctrica durante los 30 años de vida útil se estima en 12 572 815,52 USD.

### **3.9. Conclusiones del capítulo**

Para alcanzar los objetivos del estudio la investigación tiene un enfoque cuantitativo, es del tipo descriptiva y se desarrolla bajo la modalidad documental y de campo.

A partir de la metodología aplicada se estableció un conjunto secuencial de técnicas y procesos que permiten determinar el caudal y salto neto disponible en el sistema, para así tener la información suficiente para evaluar el potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug en la Provincia de Tungurahua.

Para determinar la factibilidad técnica de aprovechar el potencial hidráulico disponible, se realizaron mediciones siguiendo los procedimientos que establecen las normas respectivas y se analizaron los estudios topográficos y geológicos existentes de la zona, mientras que, para determinar la factibilidad económica se estableció una metodología adecuada para evaluar sus indicadores económicos.

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Mediante la aplicación de la metodología establecida en el capítulo anterior se obtienen los resultados de los diferentes parámetros que influyen en el fenómeno en estudio, por lo tanto, en el presente capítulo se analizan e interpretan dichos resultados con el propósito de valorar de forma precisa el potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, para determinar la factibilidad técnica y económica de aprovechar dicho potencial mediante la implantación de un sistema de generación hidroeléctrica.

### 4.1. Resultados para el caudal de diseño

En base a los datos obtenidos sobre los recursos hídricos disponibles en la Presa Chiquihurco y las mediciones realizadas se obtienen los siguientes resultados:

Del análisis de estos datos y de varios recorridos de reconocimientos realizados a la Presa Chiquihurco se determina que la represa cuenta con un volumen normal de operación de 2 480 000 m<sup>3</sup> de agua y dispone de caudales mensuales máximos de 7,20 m<sup>3</sup>/s y mínimos de 0,73 m<sup>3</sup>/s, lo que garantiza, aún en las temporadas de estiaje, los 0,40 m<sup>3</sup>/s (400 l/s) concedidos a EP-EMAPA-A para ser potabilizados en la planta de tratamiento.

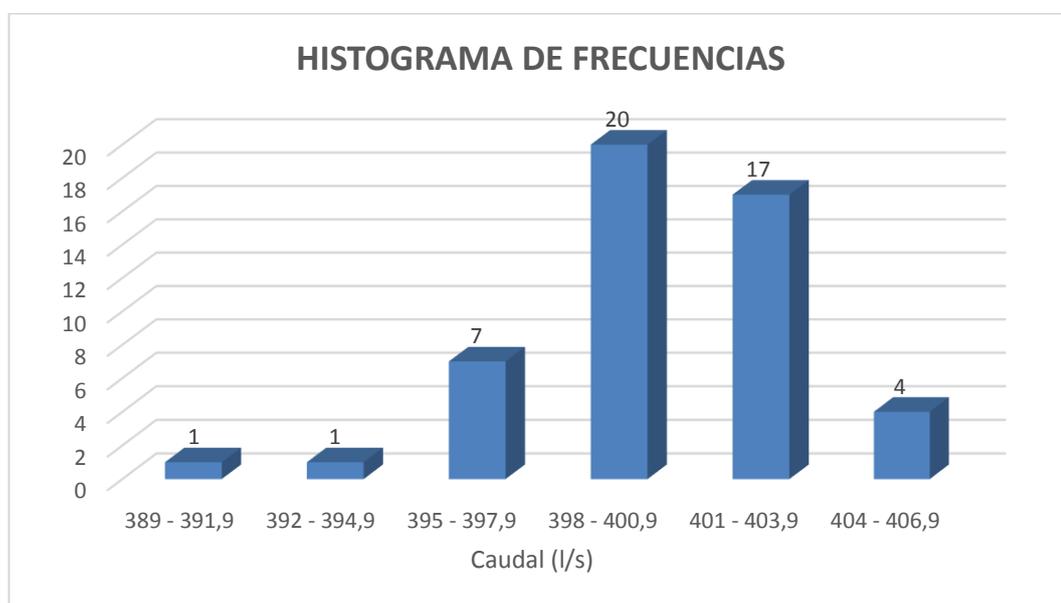


Figura 4.1. Histograma de caudales en la captación de la línea de conducción.

Los datos de las distribuciones de frecuencia de las mediciones de caudal de la tabla 3.4, se representan mediante un histograma de frecuencias (figura 4.1), con el objeto de realizar un análisis gráfico de los mismos.

Del análisis del histograma de frecuencias se determina que el 40,0 % de los datos (20 mediciones) se concentran en el rango de caudales de 398,0 l/s a 400,9 l/s, que es un resultado adecuado, debido a que dentro de este rango se encuentra el caudal de 400 l/s concedido a EP-EMAPA-A.

Con la ayuda del programa Microsoft Excel se calculan las medidas de tendencia central para determinar los valores medios de los caudales medidos. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Medidas de tendencia central de caudales.

<b>CAUDAL MÁXIMO (l/s)</b>	406,40
<b>CAUDAL MÍNIMO (l/s)</b>	389,70
<b>RANGO (l/s)</b>	16,70
<b>MEDIANA (l/s)</b>	400,60
<b>MEDIA (l/s)</b>	400,22
<b>DESVIACIÓN ESTÁNDAR (l/s)</b>	3,07

Al analizar las medidas de tendencia central se concluye que las mediciones del flujo arrojan una desviación estándar de 3,07, este valor indica que las mediciones obtenidas no están muy dispersas. El caudal medio disponible es de 400,22 l/s, valor que es ligeramente mayor al caudal requerido de 400 l/s.

De acuerdo a los análisis anteriores se determina que el caudal de diseño del proyecto es:

$$Q_D = 400 \text{ l/s} = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}$$

## 4.2. Resultados para el salto bruto

A partir de la información presentada en la sección 3.7.1, se determinan las cotas de la Presa Chiquihurco y de la planta de tratamiento:

- Elevación del tanque de captación a la salida de la Presa  $H_{PC}$ : 3 705,78 msnm
- Elevación de la planta de tratamiento en Apatug  $H_{PT}$ : 3 258,64 msnm

El salto bruto total en la línea de conducción viene dado por la diferencia de nivel entre la presa Chiquihurco y la planta de tratamiento en Apatug:

$$H_{brut} = H_{PC} - H_{PT}$$

$$H_{brut} = 3\,705,78 - 3\,258,64 = 447,14\,m$$

#### 4.3. Resultados para la longitud de la tubería

Del análisis de los datos obtenidos en la sección 3.7.4 se determina que la longitud total de la tubería de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug es:

$$L_{tub} = 31\,850,6\,m$$

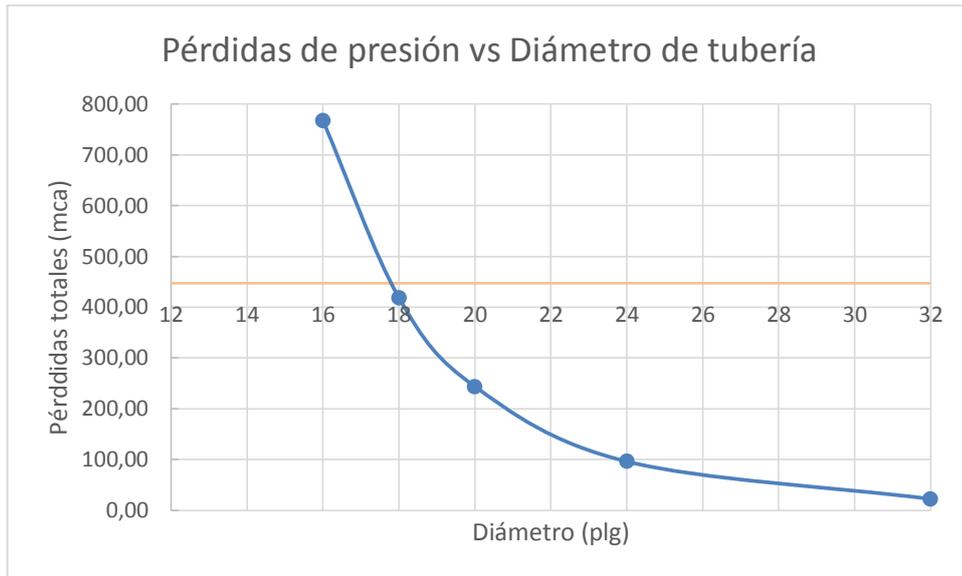
#### 4.4. Resultados para el diámetro de tubería

De las simulaciones realizadas en el programa *Pipe Flow Expert* se obtienen los resultados de velocidad, presión y pérdidas de energía para diferentes diámetros estándar de tubería. Estos resultados se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Resultados de las simulaciones en el programa *Pipe Flow Expert*.

Tamaño (plg)	Velocidad (m/s)	Presión salida (mca)	Perdidas por fricción $\Delta h_f$ (mca)	Pérdidas en accesorios $h_L$ (mca)	Pérdidas totales $\Delta h_T$ (mca)	Pérdidas de energía (kW)	% de pérdidas
16	3,183	-319,81	746,33	20,62	766,95	3007,51	171,52
18	2,515	28,74	405,53	12,87	418,40	1639,29	93,57
20	2,037	203,38	235,32	8,45	243,76	955,49	54,52
24	1,415	350,97	92,09	4,07	96,17	376,45	21,51
32	0,976	424,66	21,19	1,29	22,48	86,14	5,03

A partir de estos resultados se obtiene la figura 4.2, que presenta la curva de pérdidas de presión en función del diámetro de tubería y sobre esta curva se grafica una línea horizontal que representa el salto bruto disponible.



**Figura 4.2. Pérdidas de presión en función del diámetro de tubería.**

Del análisis de los datos de la figura 4.2 se determina que tuberías con diámetros igual o menor que 400 mm (16 plg) no se pueden utilizar debido a que las pérdidas son mayores que el salto bruto. Las tuberías 450 mm (18 plg) y 500 mm (20 plg) generan también pérdidas muy altas con porcentajes de 93,57 % y 54,52 % del salto bruto. La tubería de 800 mm (32 plg), si bien genera pérdidas pequeñas, la velocidad del fluido es menor que la recomendada y su tamaño es muy grande, lo que resulta en costos de fabricación y montaje muy elevados.

Por tanto, se concluye que el diámetro de tubería más adecuado para la línea de conducción es de 600 mm (24 plg), ya que ésta genera pérdidas totales con un valor de 96,17 m col H<sub>2</sub>O, que representa el 21,51 % del salto bruto con una pérdida de energía de 376,45 kW.

#### **4.5. Resultados para la rugosidad de la tubería**

Luego de realizar el análisis de esfuerzos con tuberías de diferentes materiales se determinó que el acero al carbono ASTM A-572 Grado 50 (equivalente a la especificación API X-52) es el que mejor cumple las solicitaciones de diseño. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes figuras 4.3, 4.4, 4.5.

## Esfuerzos combinados

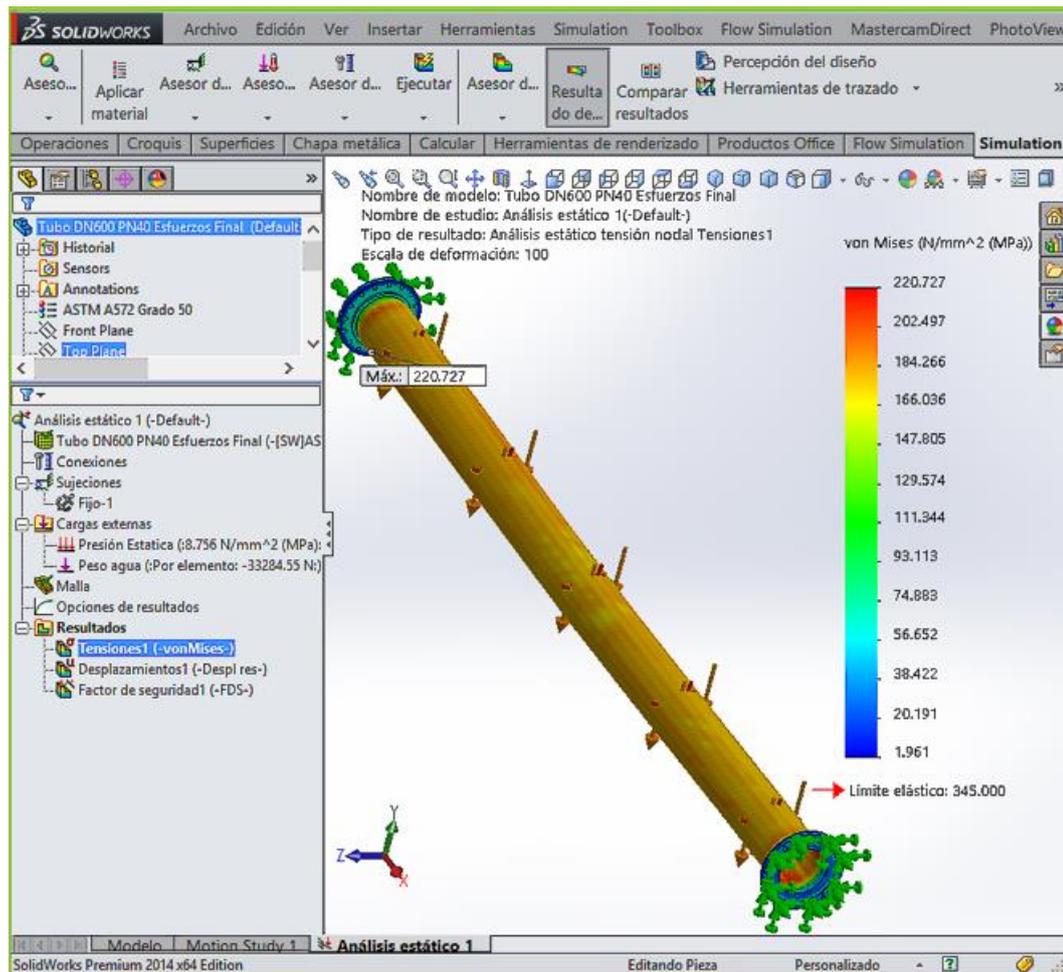


Figura 4.3. Tensiones de Von Mises en la tubería de conducción.

En la figura 4.3 se determina que en el tubo el valor máximo de la tensión de Von Mises es de 220,727 MPa y se produce en los extremos del tubo que se sueldan a las bridas, sin embargo esta tensión es menor que el límite de fluencia del acero ASTM A-572 Grado 50, por lo tanto el tubo puede resistir la tensión máxima a la que está sometido sin fallar.

## Desplazamientos resultantes

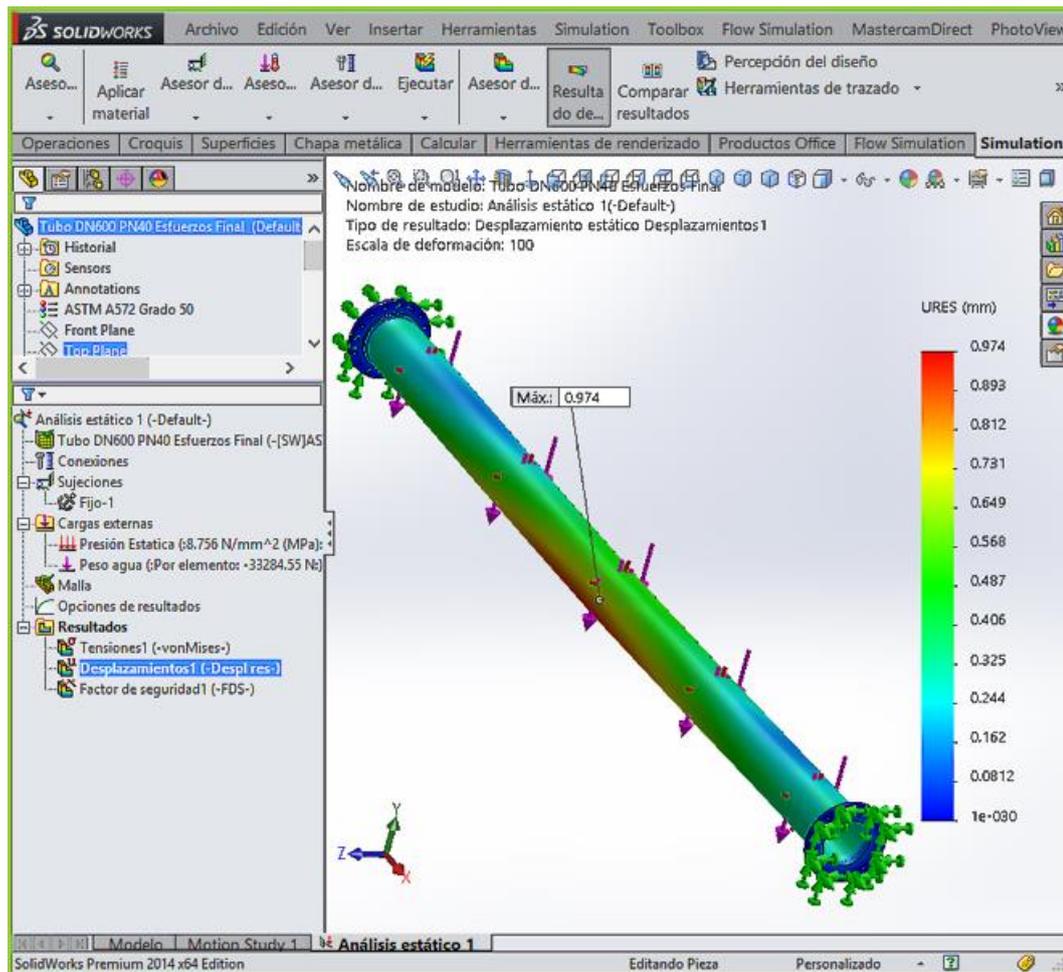


Figura 4.4. Desplazamientos resultantes en la tubería de conducción.

Al analizar la figura 4.4 se observa que el desplazamiento máximo se produce en la zona central del tubo y su valor es de 0,974 mm, pero el ser éste desplazamiento un valor relativamente bajo, se considera que no afecta al funcionamiento normal de la línea de conducción.

## Factor de seguridad

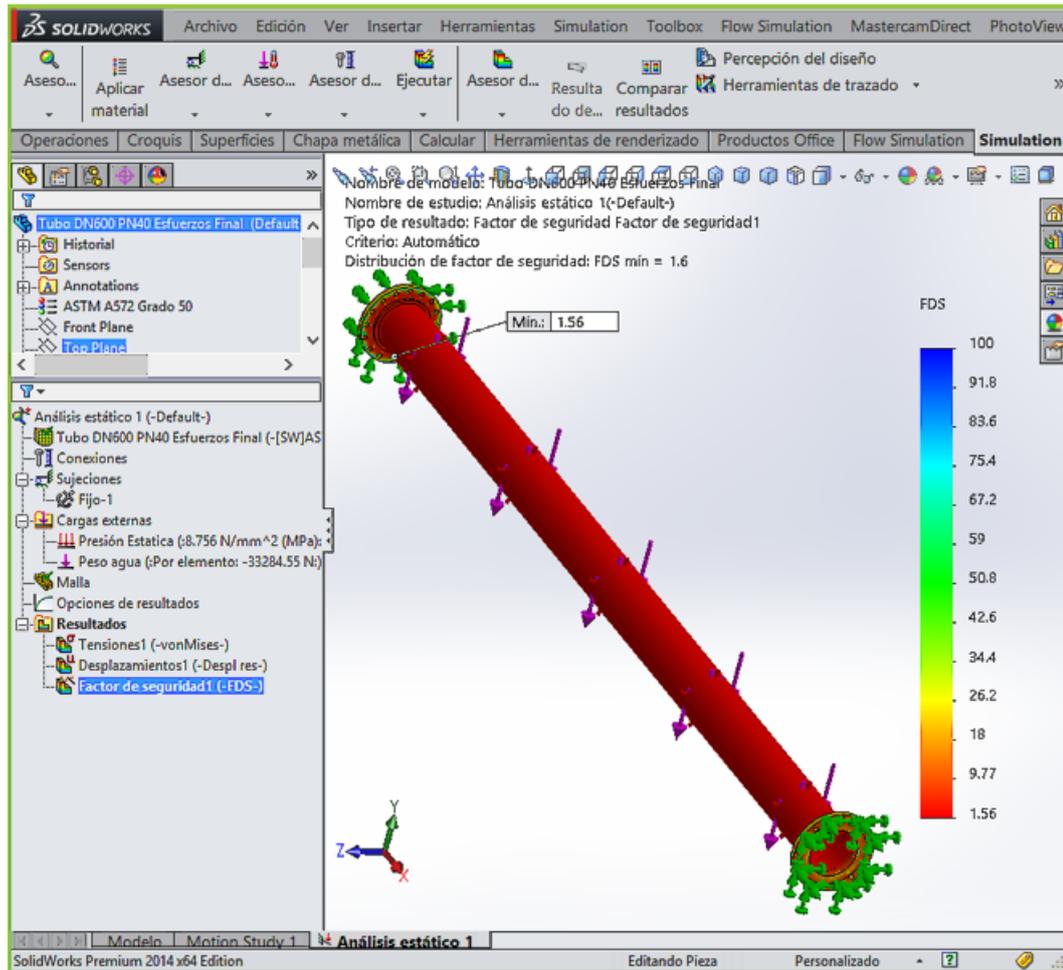


Figura 4.5. Distribución del factor de seguridad en la tubería de conducción.

Con respecto al factor de seguridad, en la figura 4.5 se muestra su distribución y se observa que las partes críticas son en los extremos del tubo que se sueldan a las bridas, y su valor mínimo es de 1,56; sin embargo, al ser éste valor mayor que el mínimo recomendado, se concluye que el diseño es seguro.

Por tanto, se determina que el acero al carbono ASTM A-572 Grado 50 cumple con los requerimientos de diseño y tiene las siguientes propiedades (Mott, 2006):

- Resistencia mínima a la tensión ( $R_t$ ): 448 MPa
- Esfuerzo mínimo de fluencia ( $S_y$ ): 345 MPa
- Rugosidad media absoluta ( $\epsilon$ ): 0,046 mm

#### 4.6. Resultado para la cota de implantación del proyecto

Para esta etapa del proyecto, la mínima elevación de implantación del sistema de aprovechamiento de la energía hidráulica debe tener una cota igual a la suma de la cota de la planta de tratamiento en Apatug más las pérdidas de presión totales generadas a lo largo de los 31 850,6 m de longitud de la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, la misma que para la tubería de acero de 600 mm de diámetro son (sección 4.4):

$$\Delta h_{fT} = 96,17 \text{ m col } H_2O$$

La cota mínima de implantación del sistema de aprovechamiento de la energía hidráulica es:

$$H_{CMmin} = H_{PT} + \Delta h_{fT}$$

$$H_{CMmin} = 3\,258,64 + 96,17 = 3\,354,81 \text{ msnm}$$

Como se muestra en la figura 4.6, considerando una altura de 10 m como rango de seguridad para garantizar la llegada del agua por gravedad a la planta de tratamiento, se tiene que la posible cota de implantación del sistema de aprovechamiento hidroeléctrico es:

$$H_{CM} = 3\,364,81 \text{ msnm}$$

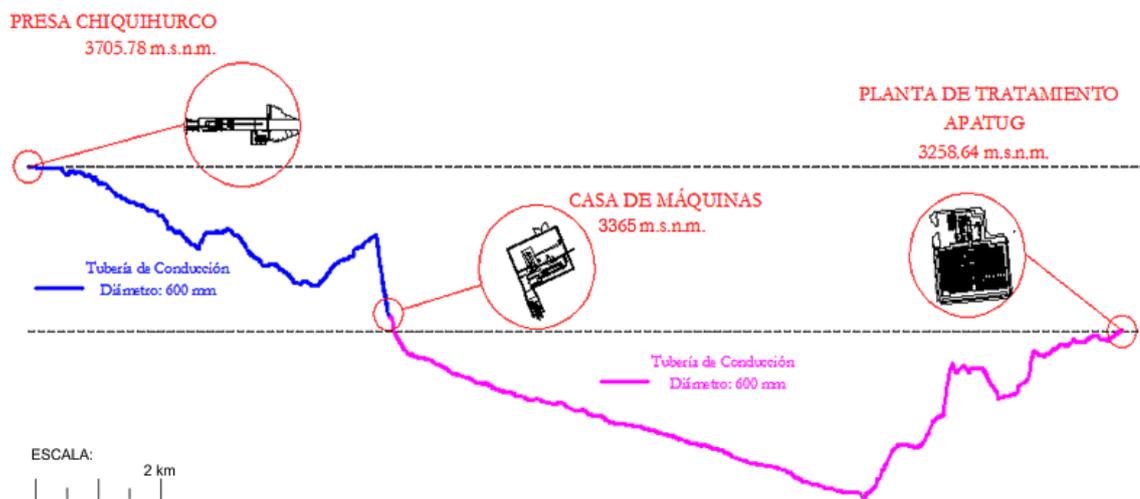


Figura 4.6. Posible cota de implantación del sistema de generación de hidroeléctrica.

#### 4.7. Resultado para el salto neto

El salto neto disponible en la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, viene dado por la diferencia de nivel entre la captación en la Presa Chiquihurco y la implantación del sistema de aprovechamiento hidroeléctrico:

$$H_{net} = H_{PT} - H_{CM}$$

$$H_{net} = (3\,705,78 - 3\,374,81) \text{ m}$$

$$H_{net} = 330,97 \text{ m}$$

#### 4.8. Resultado para el potencial energético

La potencia total disponible para la turbina hidráulica se obtiene de la ecuación 2.10:

$$P_H = 9\,810 \cdot 0,4 \cdot 330,97 \cdot 10^{-3}$$

$$P_H = 1\,298,73 \text{ kW}$$

El potencial energético o potencia útil nominal disponible en en la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug se obtiene de la ecuación 2.11. Como se indicó en la sección 2.2.7, se considera para el rendimiento total un valor igual a 0,85.

$$P_{inst} = 1\,298,73 \cdot 0,85$$

$$P_{inst} = 1\,102,45 \text{ kW}$$

Considerando en el escenario con un factor de carga de 0,84 la energía media anual que podrá generar el sistema de aprovechamiento hidroeléctrico es:

$$E_{anual\ 1} = 0,84 \cdot 8\,760h \cdot P_{net}$$

$$E_{anual\ 1} = 8,07 \cdot 10^6 \text{ kWh/año} = 8070 \text{ MWh/año}$$

De los resultados obtenidos se concluye que el potencial energético de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug

permitirá el desarrollo de una Central Hidroeléctrica con una potencia útil máxima de 1,10 MW, la misma que podrá generar hasta 8 070 MWh de energía al año.

#### 4.9. Rentabilidad del proyecto hidroeléctrico

En la tabla 4.3 se muestran los resultados de los indicadores económicos (VAN, TIR, B/C y PR) obtenidos luego de aplicar la metodología para el análisis económico del proyecto descrita en la sección 3.8. Estos resultados permiten evaluar la conveniencia y rentabilidad del proyecto, para con esta información sustentar la decisión de continuar con el diseño de la propuesta.

Tabla 4.3. Resultados de los indicadores económicos.

ÍTEM	INDICADOR	RESULTADOS
F1	Valor Actual Neto (VAN) en USD	2 653 534,80
F2	Tasa Interna de Retorno (TIR)	26,88 %
F3	Relación Beneficio Costo (B/C)	1,98
F4	Periodo de Recuperación (PR) en años	3,72

Del análisis de los resultados obtenidos, se determina que los indicadores presentan valores favorables, por lo que se concluye que el proyecto hidroeléctrico permite recuperar la inversión en un periodo de 3,72 años.

#### 4.10. Conclusiones del capítulo.

De los resultados obtenidos se determinó que la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug cuenta con un caudal constante de 0,4 m<sup>3</sup>/s, la cota mínima requerida para la implantación de la casa de máquinas es de 3 354,81 msnm y el salto neto disponible es de 330,97 m.

Estos valores permiten el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica con una potencia útil de 1 102,45 kW, que tendrá la capacidad de generar 8 070 MWh de energía al año, lo que permite recuperar la inversión en un periodo de 3,72 años, con una relación costo beneficio de 1,98 y una tasa interna de retorno de 26,88 %, lo que motiva a que se proceda con el diseño de la propuesta.

## **CAPÍTULO V: LA PROPUESTA**

Debido a los resultados favorables obtenidos respecto al potencial energético disponible en la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, en el presente capítulo se propone el diseño de un sistema de generación hidroeléctrica que garantiza la máxima generación posible y que el agua fluya por gravedad hacia la planta de tratamiento, causando el menor impacto ambiental.

### **5.1. Título**

Diseño de un sistema de generación hidroeléctrica para el aprovechamiento de la energía hidráulica de la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug.

### **5.2. Justificación**

Las actuales condiciones de la oferta y demanda eléctrica del Ecuador y sus perspectivas de gran crecimiento, así como el aprovechamiento óptimo de los recursos naturales disponibles en nuestro país, determinan la necesidad de disponer de proyectos que suministren energía eléctrica renovable y segura, de costos menores al valor medio ofertado en el mercado y de menor impacto ambiental.

La línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, fue identificada como un potencial aprovechamiento para la generación de energía eléctrica renovable, mediante la utilización de una parte de las aguas de la represa Chiquihurco que fueron concedidas a la EP-EMAPA-A para ser procesadas en la planta de potabilización.

Evaluada los diferentes resultados obtenidos respecto al caudal de diseño y la diferencia de nivel disponible, se determinó que el sistema de aprovechamiento de la energía hidráulica podrá generar una potencia neta máxima de 1,10 MW, produciendo al año un total de 8 070,0 MW/h.

En consecuencia, la Central Hidroeléctrica le añade un valor agregado a la finalidad operativa del Sistema de Agua Potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato, al

generar energía eléctrica, mientras que desde el punto de vista hidráulico, constituye un mecanismo para atenuar la presión que el agua adquiere al descender por las tuberías del sistema de conducción en su paso hacia la planta de tratamiento. Con esto, se puede advertir que la generación de energía eléctrica no es la razón ni la prioridad del proyecto de agua potable, sin embargo, además de generar ingresos económicos, no requiere la construcción de los tanques rompe presiones.

Los ingresos obtenidos de la venta de esta energía a precios preferentes según lo dispone la Regulación No. CONELEC – 004/1, junto con los bajos costos de inversión requeridos para el desarrollo del proyecto, debido a que la cantidad de obras requeridas son menores que las correspondientes a otros proyectos hidroeléctricos, ya que aprovecharán varias de las obras ya desarrolladas para el Sistema de Agua Potable, sustentan la iniciativa de continuar con el diseño de la propuesta.

### **5.3. Objetivo de la propuesta**

Proveer una alternativa viable de generación hidroeléctrica para el aprovechamiento de la energía disponible en la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, que permita la máxima generación posible de energía y garantice la llegada del agua por gravedad a la Planta de Tratamiento.

### **5.4. Estructura de la propuesta**

La propuesta se estructura en seis partes fundamentales:

1. Descripción detallada del proyecto.
2. Desarrollo hidroeléctrico.
3. Dimensionamiento hidráulico del sistema de generación.
4. Dimensionamiento de los equipos electromecánicos.
5. Evaluación económica.
6. Estudio del impacto ambiental de la propuesta.

## 5.5. Diseño de la propuesta

### 5.5.1. Selección del sitio de implantación de la casa de máquinas

De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo IV el sistema para el aprovechamiento de la energía hidráulica debe ubicarse en un punto lo suficientemente alto que permita que el agua turbinada llegue por gravedad a la planta de tratamiento en Apatug, por lo tanto, la elevación a la que se ubicará la casa de máquinas está restringida por la cota de la planta de tratamiento y por las pérdidas de presión en la tubería de conducción.

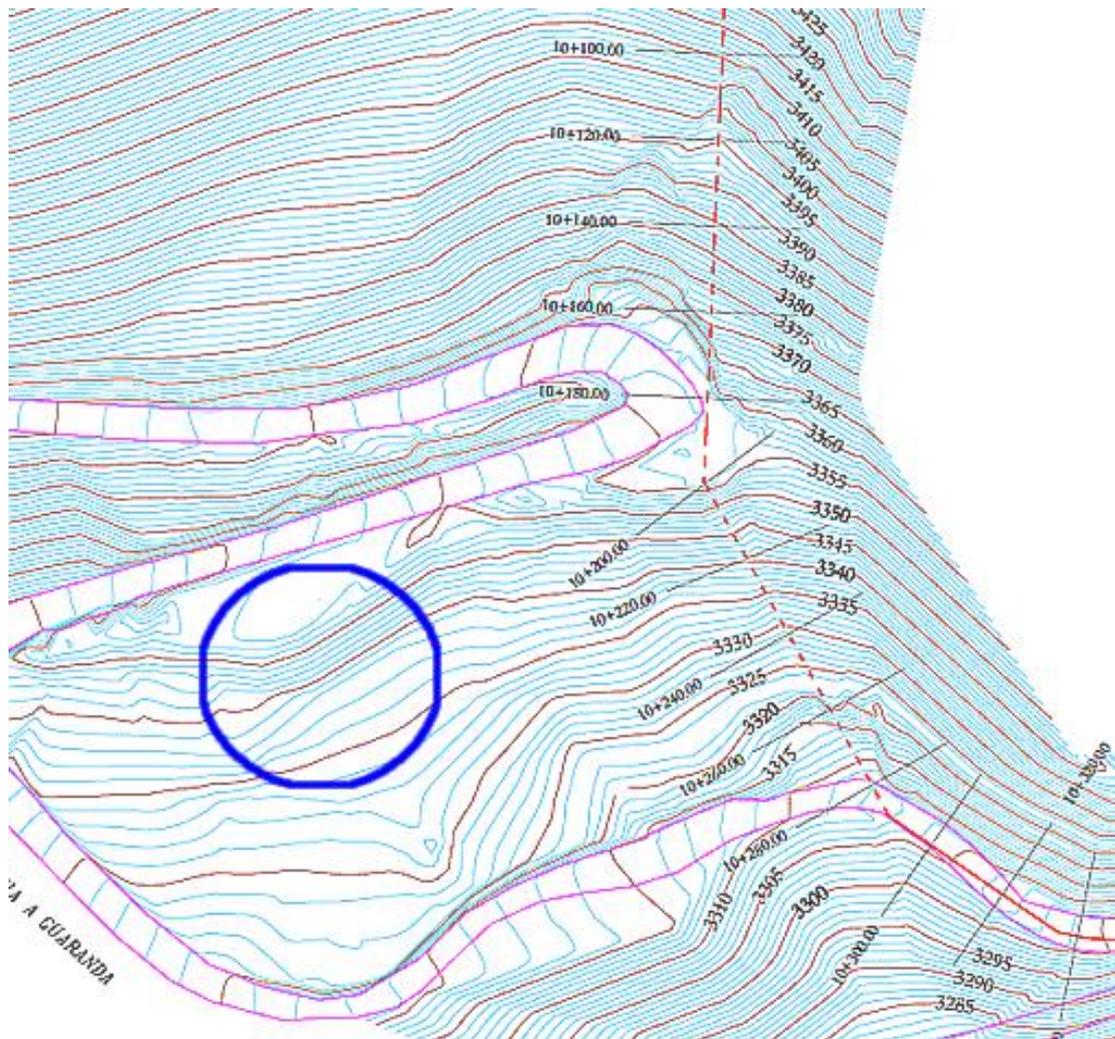


Figura 5.1. Sitio de implantación del sistema de generación de energía.

Para determinar la posible ubicación de la central hidroeléctrica fue necesario un análisis minucioso del levantamiento topográfico del trazado de la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug y del perfil de dicha línea (Anexo 1 y 3) en las zonas con curvas de nivel cercanas a los 3 354,81 msnm, a fin de encontrar los sitios más adecuados.

Luego de varias visitas de reconocimiento en el campo con el objeto de determinar facilidades y dificultades constructivas de la posibles alternativa de ubicación de la Central Hidroeléctrica, se determinó que el lugar que mejores condiciones topográficas presenta para la implantación de la casa de máquinas se encuentra a una elevación de 3 345,50 msnm en la abscisa 10+300,00 (área marcada con azul en la figura 5.1), en una zona ubicada aproximadamente a 1,0 km del desvío hacia Calamaca en la Carretera Ambato–Pasa, con coordenadas UTM N 9 858 495,90 y E 743 102,00.

En las figuras 5.2 y 5.3 se presentan una fotografía y una imagen satelital del sitio seleccionado.



**Figura 5.2. Fotografía del sitio de implantación de la central hidroeléctrica.**



Figura 5.3. Imagen satelital del sitio de posible ubicación de la central hidroeléctrica.

### 5.5.2. Descripción detallada de la zona de ubicación del proyecto

En esta sección se describen los diferentes parámetros que definen completamente la propuesta para el desarrollo del sistema del aprovechamiento hidroeléctrico de la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento en Apatug.

#### A.- Ubicación del área del proyecto

Lo que se busca al seleccionar el sitio más adecuado para la implantación de las diferentes obras del sistema de generación hidroeléctrica es encontrar aquella localización que maximice la rentabilidad del proyecto. En consecuencia, el requerimiento más importante que influye en la selección del sitio del proyecto es el hecho de generar la mayor cantidad de energía posible, pero garantizando la llegada del agua por gravedad a la planta de tratamiento y siempre procurando el menor impacto ambiental. Sin embargo, para alcanzar de forma integral todos los objetivos del proyecto, el sitio mostrado en la figura 5.4 además de cumplir con el requerimiento anterior cumple con los siguientes parámetros:

- Zonas con terrenos estables.
- Zonas con buenas características de cimentación.
- Zonas que permiten una posible ampliación

- Facilidad de acceso
- Facilidad de adquirir terrenos.

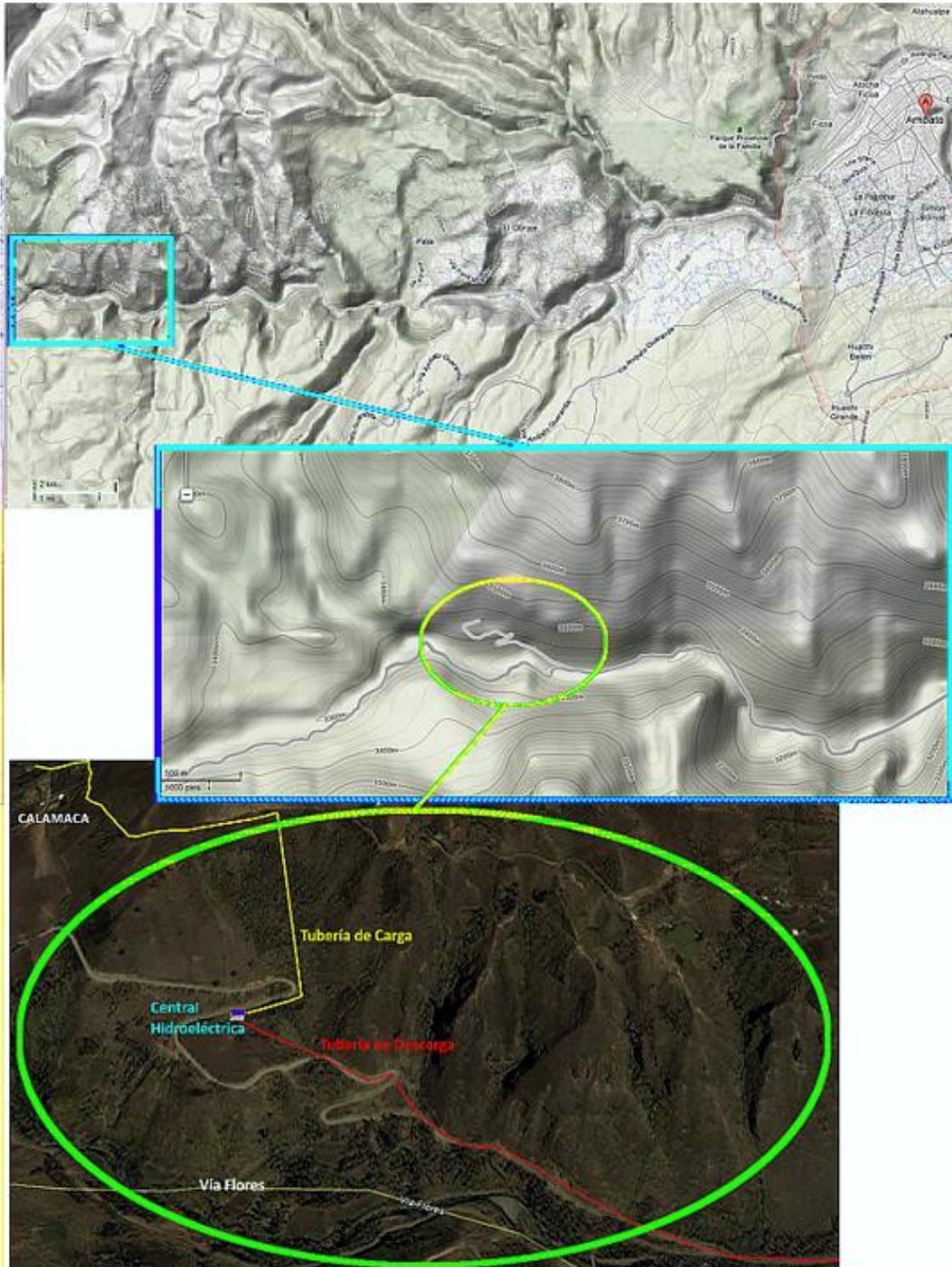


Figura 5.4. Localización del proyecto de generación hidroeléctrica.

## B.- Características topográficas del sector

Debido a que en el trazado original de la línea de conducción, la tubería llega al sitio de implantación de la casa de máquinas, con varios cambios de dirección y sin la suficiente pendiente para que el agua adquiriera una velocidad y energía adecuada para la generación hidroeléctrica; el recorrido del tramo anterior a la casa de máquinas será modificado de tal manera que la tubería entre en forma horizontal a la casa de máquinas luego de descender por un terreno con una pendiente de  $32,5^\circ$  (figuras 5.5) y un salto vertical de 170 m (de 3 515,8 msnm a 3 345,5 msnm), para luego acoplarse a la turbina.



Figura 5.5. Terreno por donde cruza el tramo final de la tubería de carga.

De acuerdo con la modificación realizada, el trazado final de la línea de conducción antes de entrar a la casa de máquinas se muestra en la figura 5.6

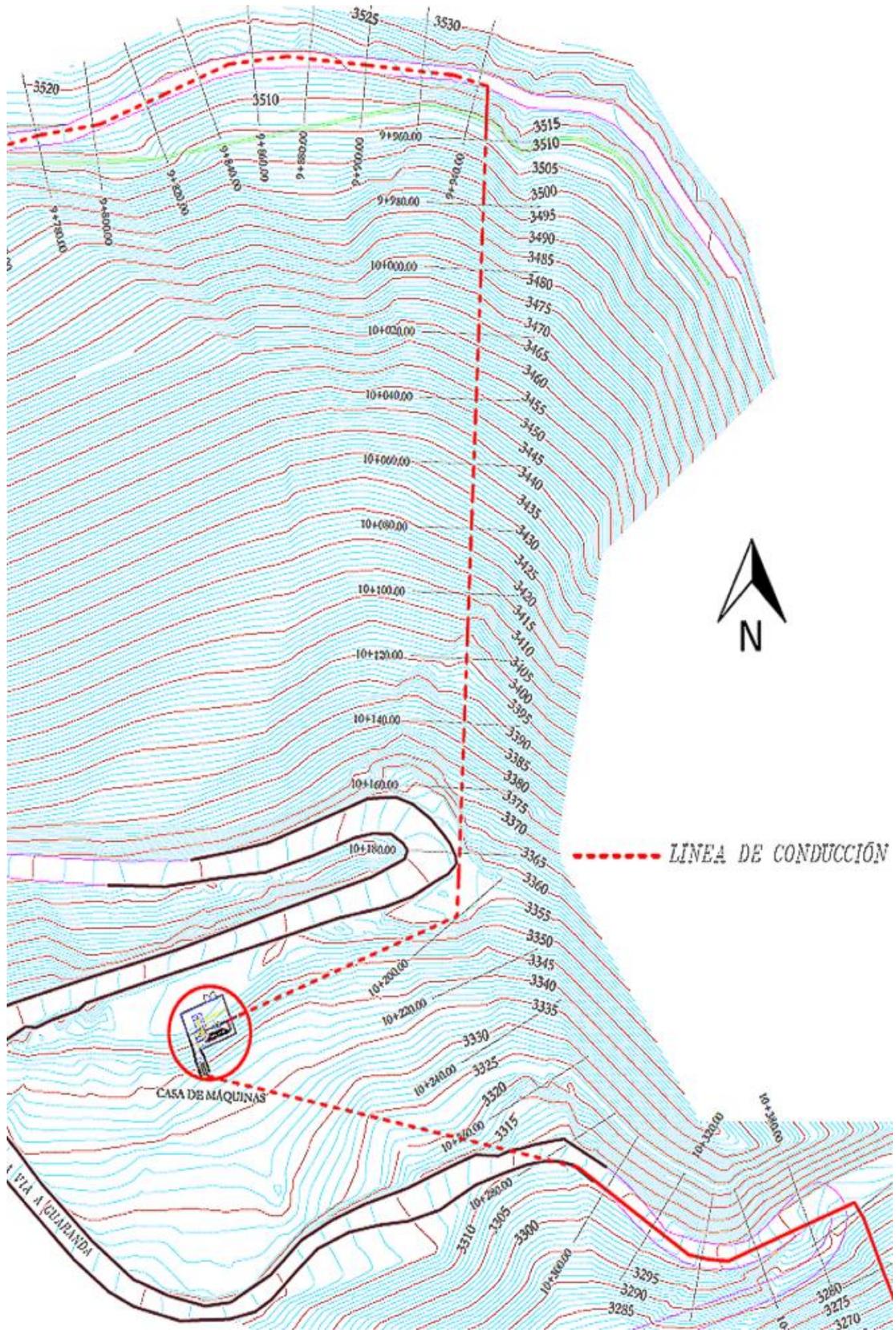


Figura 5.6. Trazado final de la línea de conducción antes de la casa de máquinas.

### **C.- Características geológicas del sector**

De acuerdo con los datos obtenidos de los informes de los estudios de geología, geotecnia y mecánica de suelos del proyecto de agua potable Chiquihurco Zona Alta de Ambato, realizado a lo largo de la línea de conducción, se determina que el terreno donde se ubicará la Central Hidroeléctrica presenta los siguientes rasgos geológicos:

#### **Geomorfología**

La zona del Proyecto corresponde a las estribaciones del flanco oriental de la Cordillera Occidental de los Andes, por lo que se caracteriza por la existencia de un relieve muy irregular.

El sistema de drenaje es el principal rasgo geomorfológico de la zona y en general gobierna el relieve del sitio del proyecto. El sistema de drenaje puede clasificarse como sistema paralelo y subparalelo, con presencia de valles profundos con taludes muy pronunciados.

#### **Litología**

Los depósitos aluviales y de terraza, están relacionados con la actividad del Río Ambato, que geomorfológicamente ha formado planicies, donde se han desarrollado áreas agrícolas con sistemas de riego.

Los materiales correspondientes a este tipo de depósitos de terraza, están compuestos por capas de gravas y arenas, intercaladas por depósitos de cenizas. En general todos los depósitos presentes en el área del proyecto se presentan competentes y estables.

#### **Condiciones de Cimentación**

Los suelos encontrados bajo la capa vegetal son heterogéneos, de coloración café blanquecina; compuesta de limos arenosos de baja plasticidad, limos de alta plasticidad, arenas limosas y arcillas arenosas, conformando la matriz del aglomerado que incluye gravas y boleos subangulares. Sus características se muestran en la siguiente figura:

<b>PROYECTO:</b> Agua Potable de Chiquiurcu	Fecha: nov-10
<b>Ubicación:</b> Via a Calamaca	
<b>Calicata:</b> PCA - 9	
<b>Profundidad:</b> 2,00 metros	

Golpes	Cápsula	PC+SH	PC+PS	PC	Humedad
#	#	grs.	grs	grs	%

### HUMEDAD NATURAL

	525	63,36	52,28	20,21	34,55
	529	77,15	64,07	20,73	30,18
	670	68,25	57,47	20,38	29,06

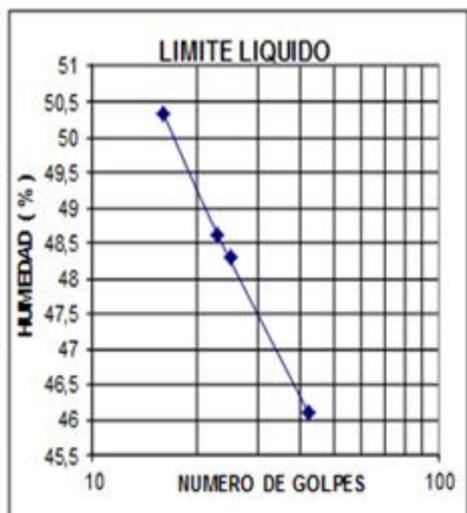
### LÍMITE LÍQUIDO

42	700	35,16	30,54	20,52	46,11
23	387	36,19	30,93	20,11	48,61
16	488	36,44	31,17	20,70	50,33

### LÍMITE PLÁSTICO

	2	10,74	8,85	1,89	27,16
	3	11,20	9,21	1,88	27,15
	5	11,52	9,44	1,90	27,59

RESUMEN	
Límite Líquido	48,30%
Límite Plástico	27,30%
Índice Plasticidad	21,00%
Humedad Natural	31,26%
<b>Clasificación SUCS</b>	<b>SM</b>



GRANULOMETRÍA				
Tamiz #	Retenido			Pasa
	Parcial	Total	%	%
2 <sup>mm</sup>	0,0	0,0	0,0	100,0
1 <sup>mm</sup>	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4 <sup>mm</sup>	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2 <sup>mm</sup>	0,0	0,0	0,0	100,0
3/8 <sup>mm</sup>	0,0	0,00	0,0	100,0
#4	6,5	6,47	7,0	92,97
# 10	7,95	14,42	15,66	84,34
# 40	13,29	27,71	30,10	69,90
#100	13,71	41,42	44,99	55,01
#200	6,70	48,12	52,27	47,73
TOTAL				120,84
Total Seco				92,06
PORCENTAJE DE GRAVA			7,03 %	
PORCENTAJE DE ARENA			45,24 %	
PORCENTAJE DE FINOS			47,73 %	

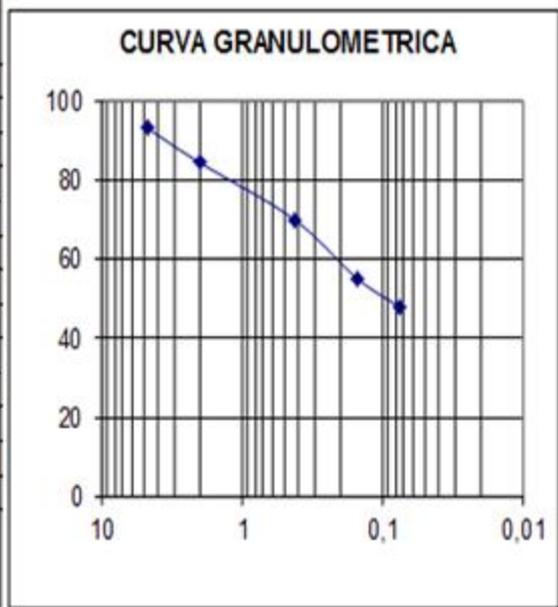


Figura 5.7.- Características geológicas del suelo en el sitio del proyecto.

De los resultados de la figura 5.7 se determina que el sitio seleccionado no presenta fallas geológicas de importancia ni evidencias de peligro sísmico que pudieran afectar la seguridad de las obras requeridas para el proyecto hidroeléctrico.

Por lo tanto, se puede afirmar que las condiciones geológicas en las zonas del proyecto muestran características constructivas favorables ya que no fueron identificados factores geológicos desfavorables que dificulten la ejecución de las obras.

#### **D.- Accesos al área del proyecto**

El acceso al área del Proyecto se realiza por la carretera pavimentada Vía Flores que une Ambato con El Arenal, hasta llegar al desvío hacia la Comunidad de Calamaca (figura 5.8), a partir de este punto se recorre 1,0 kilómetro por el camino empedrado que conduce hacia la Comunidad de Calamaca hasta llegar a la zona del Proyecto.



**Figura 5.8. Acceso al área del proyecto.**

Las distancias hasta la zona de las obras del proyecto son las siguientes:

- Ambato – Desvío hacia Calamaca: 21,0 km
- Desvío hacia Calamaca – Zona del Proyecto: 1,0 km
- Zona del Proyecto – Comunidad de Calamaca: 1,0 km

### 5.5.3. Diseño hidráulico

Esta sección contiene un resumen de los procedimientos utilizados para el diseño hidráulico de la central hidroeléctrica, siguiendo la misma metodología descrita en el capítulo III, pero tomando en cuenta que para el diseño de la propuesta la casa de máquinas se encuentra a 3 345,5 msnm y el tramo de tubería a la entrada de la casa de máquinas tiene un diámetro nominal de 500 mm.

Los principales parámetros que influyen de forma directa en el diseño hidráulico de la propuesta se describen a continuación:

Caudal de diseño:	0,4 m <sup>3</sup> /s
Nivel del agua en el tanque de carga en la Presa Chiquihurco $H_{PC}$ :	3 705,68 msnm
Cota del eje de la turbina de acción $H_{CM}$ :	3 345,50 msnm
Cota de la planta de tratamiento en Apatug $H_{PT}$ :	3 258,64 msnm
Longitud del tramo de tubería de 600 mm de diámetro desde la captación hasta la transición de diámetro en la abscisa 9+940,00:	9 955,88 m
Cota de la transición de diámetro en la abscisa 9+940,00 $H_{TD}$ :	3 515,80 msnm
Longitud del tramo de tubería de 500 mm de diámetro desde la abscisa 9+940,00 hasta la bifurcación antes de la turbina:	406,92 m

A partir de la diferencia de elevación entre el nivel de la lámina de agua en el tanque de captación en la Presa Chiquihurco y el eje de la turbina en la casa de máquinas, se determina el salto bruto disponible para el aprovechamiento hidroeléctrico en la línea de conducción:

$$H_{brut} = H_{PC} - H_{CM}$$

$$H_{brut} = 3 705,78 - 3 345,50$$

$$H_{brut} = 360,28 \text{ m}$$

En los siguientes ítems de la presente sección se muestra una síntesis de los resultados obtenidos en el diseño hidráulico de las diferentes obras del proyecto, mientras que en el Anexo 4, se muestran los planos de las obras hidráulicas.

### **Pérdidas por fricción**

A fin de determinar el salto neto real disponible para la generación de energía, se calculan las pérdidas por fricción a lo largo de la línea de conducción desde la Presa Chiquihurco hasta la casa de máquinas. Para tal efecto se analizan ambos tramos de tubería.

El primer tramo va desde el tanque de carga en la abscisa 0+00,00 hasta la transición de diámetro en la abscisa 9+940,00, tiene una longitud total de 9 955,88 m de tubería enterrada de hierro dúctil de 600 mm de diámetro interior.

El segundo tramo que va desde la transición de diámetro en la abscisa 9+940,00 hasta la bifurcación antes de la turbina en la casa de máquinas en la abscisa 10+300,00, tiene una longitud total de 406,92 m de tubería de acero de 495,30 mm de diámetro interior (norma ANSI 20" cédula 10).

Aplicando la metodología descrita en la sección 2.2.4 y con la ayuda del *software Microsoft Excel*, se calculan las pérdidas que se generan en cada tramo de la tubería de conducción y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.1.

### **Pérdidas localizadas**

Debido a que estas representan las pérdidas menores en la conducción, se ha considerado adecuado estimar estas pérdidas como un 5 % del valor de las pérdidas por la fricción.

De los resultados obtenidos en la Tabla 5.1 se determina que las pérdidas totales acumuladas, desde el tanque de carga en la represa hasta la casa de máquinas, alcanzan un valor de 29,20 m.

$$\Delta H_{Acumulada} = 29,20 \text{ m}$$

El proceso completo para determinar todas las pérdidas de carga que se generan en cada tramo de la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, se presenta en el Anexo 5.

Tabla 5.1. Pérdidas de carga desde la represa hasta la casa de máquinas.

Descripción	Abscisa (m)	Cota Terreno (m.s.n.m.)	Longitud acumulada tubería (m)	Velocidad (m/s)	$\Delta h_f$ Parcial (m)	$\Delta h_l$ Parcial (m)	$\Delta H$ Acumulada (m)
Captación	+0,00	3705,78	0,00	1,41	0,00	0,00	0,00
Tramo 1	+500,00	3703,81	500,02	1,41	1,25	0,06	1,31
	1+000,00	3691,21	1000,08	1,41	1,25	0,06	2,62
	1+500,00	3688,38	1500,09	1,41	1,25	0,06	3,93
	2+000,00	3661,46	2000,83	1,41	1,25	0,06	5,24
	2+500,00	3629,19	2501,88	1,41	1,25	0,06	6,56
	3+000,00	3607,34	3002,35	1,41	1,25	0,06	7,87
	3+500,00	3587,76	3502,73	1,41	1,25	0,06	9,18
	4+000,00	3533,83	4005,09	1,41	1,25	0,06	10,49
	4+500,00	3510,91	4505,91	1,41	1,25	0,06	11,81
	5+000,00	3512,24	5005,91	1,41	1,25	0,06	13,12
	5+500,00	3526,78	5506,12	1,41	1,25	0,06	14,43
	6+000,00	3515,46	6006,25	1,41	1,25	0,06	15,74
	6+500,00	3458,07	6509,52	1,41	1,26	0,06	17,06
	7+000,00	3442,42	7009,77	1,41	1,25	0,06	18,37
	7+500,00	3404,89	7511,19	1,41	1,25	0,06	19,68
	8+000,00	3391,45	8011,36	1,41	1,25	0,06	20,99
	8+500,00	3408,58	8511,65	1,41	1,25	0,06	22,30
9+000,00	3453,53	9013,69	1,41	1,25	0,06	23,62	
9+500,00	3488,29	9514,89	1,41	1,25	0,06	24,93	
Cambio de Diámetro	9+940,00	3518,30	9955,88	1,41	1,10	0,06	26,09
					24,85	1,24	26,09
Cambio de Diámetro	9+940,00	3518,30	0,00	2,08	0,00	0,00	26,09
Tramo 2	9+960,00	3505,46	23,90	2,08	0,17	0,01	26,27
	9+980,00	3491,32	48,14	2,08	0,18	0,01	26,46
	10+000,00	3475,96	73,44	2,08	0,18	0,01	26,65
	10+020,08	3462,29	97,77	2,08	0,18	0,01	26,84
	10+040,00	3448,30	122,00	2,08	0,18	0,01	27,02
	10+060,00	3435,29	145,91	2,08	0,17	0,01	27,20
	10+080,00	3423,89	169,02	2,08	0,17	0,01	27,38
	10+100,00	3410,62	192,92	2,08	0,17	0,01	27,56
	10+120,00	3395,60	217,99	2,08	0,18	0,01	27,76
	10+140,00	3384,36	240,90	2,08	0,17	0,01	27,93
10+160,00	3371,54	264,69	2,08	0,17	0,01	28,11	
Casa de Máquinas	10+300,00	3356,90	406,68	2,08	1,03	0,05	29,20

#### 5.5.4. Desarrollo hidroeléctrico

La capacidad de generación de energía del proyecto hidroeléctrico se determina teniendo como base los parámetros que se consignan a continuación (Anexo 6):

- Caudal de diseño: 0,40 m<sup>3</sup>/s
- Salto bruto disponible: 360,28 m
- Pérdidas de carga totales: 29,20 m

### A.- Salto neto

El salto neto disponible en el proyecto para la generación de energía eléctrica se calcula a partir de la ecuación 2.6:

$$H_{net} = H_{brut} - \Delta H_{Acumulada}$$

$$H_{net} = (360,28 - 29,20)m$$

$$H_{net} = 331,08 m$$

### B.- Potencia útil

La potencia hidráulica a disposición de la turbina viene dado por la ecuación 2.10:

$$P_H = 9\,810 \cdot 0,4 \cdot 331,08 \cdot 10^{-3}$$

$$P_H = 1\,299,16 kW$$

La capacidad de producción de la Central Hidroeléctrica está dada en función del caudal y salto neto disponibles y depende de la eficiencia del grupo turbina - generador.

En base a los datos del fabricante de los equipos electromecánicos se determina que para el caso específico de la presente propuesta, el rendimiento de la turbina es de 89 %, la del generador de 95 % y la del transformador de 98 %. Entonces, aplicando la ecuación 2.12, se calcula el rendimiento total del sistema.

$$\eta_T = 0,89 \cdot 0,95 \cdot 0,98$$

$$\eta_T = 0,829$$

Se aprecia que el rendimiento total del sistema es menor que el valor asumido en la sección 4.8, esto se debe a que ahora se utilizan los valores reales de rendimiento proporcionados por los fabricantes de los equipos electromecánicos.

La potencia útil entregada a la salida del generador eléctrico se obtiene a de la ecuación 2.11:

$$P = 1299,16 \cdot 0,829$$

$$P = 1\,076,5 kW$$

### C.- Energía generada

Es necesario determinar con la mayor exactitud posible la energía anual generada, ya que esto permitirá conocer con mayor precisión la rentabilidad de la inversión en el proyecto hidroeléctrico.

La energía anual producida por el proyecto hidroeléctrico se obtiene del producto de la potencia generada por el número de horas en las que el generador trabaja a esa potencia.

Debido a que el caudal de diseño de 0,4 m<sup>3</sup>/s es constante durante todo el año, el generador siempre trabajará a la potencia calculada.

Considerando que por razones de mantenimientos programados o por imprevistos la turbina dejará de operar, en el peor de los casos un máximo de 60 días (2 meses) al año, el factor de carga ( $f_c$ ) de la central hidroeléctrica es:

$$f_c = \frac{(365 - 60)}{365}$$

$$f_c = 0,84$$

Por lo tanto, la energía generada anualmente por la central hidroeléctrica se obtiene multiplicando la potencia neta por el número de horas que tiene un año (8 760 h) y por el factor de carga.

$$E_{anual} = 0,84 \cdot 8\,760h \cdot P$$

$$E_{anual} = 7,921 \cdot 10^6 \text{ kWh/año} = 7\,921 \text{ MWh/año}$$

La cantidad de energía anual que puede generar la central hidroeléctrica propuesta, es menor que la calcula en la sección 4.8, debido a que en este capítulo no se utilizan los valores recomendados en la bibliografía investigada, sino se trabaja con los datos reales de los fabricantes.

### 5.5.5. Dimensionamiento de las estructuras hidráulicas

#### A.- Dimensionamiento del canal de descarga

Para evitar problemas de desgaste o erosión en las paredes del canal de descarga, los 0,4 m<sup>3</sup>/s de agua que pasa por la turbina o por el sistema de bypass, será conducida hacia el tanque de restitución a una velocidad no mayor a 0,80 m/s, por medio de un canal de descarga con dos ramales de sección rectangular constante de 1,5 m de ancho por 0,9 m de alto, que al final convergen en un solo canal recolector de 2,0 m de ancho por 0,9 m de alto, con pendiente de 0,1 % y coeficiente de Manning igual a 0,015.

En la siguiente tabla se presenta los datos de diseño del canal de descarga:

Tabla 5.2. Datos de diseño del canal de descarga.

DETALLE	VALOR	UNIDAD
Caudal máximo de funcionamiento	0,40	m <sup>3</sup> /s
Ancho de cada ramal de descarga	1,5	m
Alto de cada ramal de descarga	0,9	m
Ancho del canal recolector	2,0	m
Alto del canal recolector	0,9	m
Cota del agua en el nivel normal de operación	3 341,94	msnm
Cota del fondo del cauce del canal	3 341,60	msnm
Cota del nivel máximo de operación	3 342,50	msnm

En el anexo 4 se presenta el plano con el dimensionamiento completo del canal de descarga donde se observa que con el objetivo de aquietar las aguas el canal cuenta aguas abajo con una transición horizontal con ángulo de 12,5° que le permite aumentar el ancho de su sección de 2,0 m a 3,0 m para finalmente mediante un escalón de 2,0 m de alto, depositar el flujo en el tanque de carga que lo restituye hacia la planta de tratamiento.

#### B.- Dimensionamiento del tanque de carga y restitución

El tanque de carga es la estructura hidráulica que se conecta con el canal recolector y tiene la finalidad de impedir la entrada de aire en la tubería cuando el agua es

restituida nuevamente en la línea de conducción Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug.

Otra función importante del tanque de carga es mantener un volumen útil de agua que permita compensar los desfases entre el caudal turbinado y el caudal que ingresa a la tubería de conducción.

Con el objetivo de cumplir con las funciones indicadas, el tanque de carga está constituido por una estructura totalmente enterrada formada por dos cámaras (anexo 4).

La cámara húmeda es la que permite restituir el agua en la línea de conducción hacia Apatug, mide 1,56 m de longitud, por 3,00 m de ancho y 2,90 m de profundidad y cumple la función recibir el flujo, disipar la energía y regular el calado a fin de impedir al máximo la turbulencia y entrada de burbujas de aire en la tubería.

La cámara seca mide 3,00 m de longitud, por 3,00 m de ancho y 2,90 m de profundidad, y tiene la función de alojar una válvula reguladora y medidora de caudal.

EL agua será restituida a la tubería de conducción a una cota de 3 340,38 msnm. Los datos de diseño del tanque de carga se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.3. Datos de diseño del tanque de carga.

DETALLE	VALOR	UNIDAD
Caudal máximo de funcionamiento	0,42	m <sup>3</sup> /s
Nivel máximo de operación	3 342,50	msnm
Nivel normal de operación	3 341,80	msnm
Nivel mínimo de operación	3 341,41	msnm
Longitud total del tanque de carga	4,91	m
Ancho total del tanque de carga	3,00	m
Profundidad del tanque de carga	2,90	m
Cota del fondo del cauce del tanque de carga	3 339,60	msnm

### 5.5.6. Dimensionamiento de equipos electromecánicos

Los equipos electromecánicos (Anexo 7) constituyen los elementos que intervienen en la transformación energética de la energía potencial y cinética del agua en energía eléctrica, así como también por los dispositivos de control necesarios, tanto mecánicos como hidráulicos y eléctricos.

Los equipos electromecánicos requeridos para el adecuado funcionamiento de la Central Hidroeléctrica son los siguientes:

- Turbina hidráulica.
- Generador eléctrico.
- Válvulas.

El tamaño, dimensiones, geometría y capacidad de los diferentes equipos electromecánicos están condicionados por una serie de parámetros de diseño que se señalan a continuación:

- Caudal de diseño: 0,4 m<sup>3</sup>/s
- Salto bruto máximo: 360,18 m
- Salto neto disponible: 331,08 m
- Potencia útil generada: 1 076,50 kW

En los siguientes ítems de esta sección se presenta una síntesis del dimensionamiento de los diferentes equipos electromecánicos del proyecto.

#### A.- Turbina hidráulica

Para seleccionar el tipo de turbina se analiza la posibilidad de elegir una turbina tipo Michel – Banki, una Pelton de uno o más inyectores, y una Francis. A fin de evitar el uso de un multiplicador de velocidad se considera que la turbina gira a 1200 rpm (valor recomendado por el fabricante).

Los rendimientos totales con turbinas Michel - Banki y Francis se estiman considerando para el generador y el transformador los mismos valores de la sección 5.5.4 y para la turbina los valores recomendados en la Tabla 2.1.

- Michell – Banki  $\eta_T = 0,82 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,763$
- Pelton  $\eta_T = 0,89 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,829$
- Francis  $\eta_T = 0,92 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,856$

Aplicando el método de selección rápida, de la figura 2.2 se determina que en función del salto neto y caudal, la turbina adecuada es la Pelton.

La velocidad específica permite un criterio más adecuado para la selección del tipo de turbina hidráulica, por lo tanto, continuando con el proceso de selección, se procede a calcular el número específico de revoluciones mediante la ecuación 2.13.

$$n_s = \frac{1\,200 \cdot \sqrt{1,358 \cdot P/i}}{331,08^{5/4}} = 0,85 \cdot \sqrt{1,358 \cdot P/i}$$

Considerando que:

$$P = P_H \cdot \eta_T$$

Se obtiene los resultados mostrados en la tabla 5.4:

Tabla 5.4. Parámetros para la selección de la turbina hidráulica.

Turbina	$\eta$	P	n <sub>s</sub>			
		(kW)	1	2	4	6
Michell -Banki	0,763	991,26	31,18	-	-	-
Pelton	0,829	1 076,50	32,51	22,99	16,25	13,27
Francis	0,856	1 112,08	33,03	-	-	-

De los resultados de la Tabla 5.4 la turbina Pelton con dos inyectores es la solución idónea ya que la velocidad específica calculada bajo las condiciones específicas del proyecto se encuentra dentro del rango de valores recomendados (20 a 50) en la Tabla 2.1, lo que ratifica el resultado obtenido en la figura 2.2.

En cuanto a las turbinas Michell - Banki y Francis los valores de 31,18 y 33,03, se encuentran por debajo del rango recomendado (40 a 160) y (60 a 150) respectivamente.

A partir de los valores mostrados en la Tabla 2.2 se determina que la velocidad de embalamiento aceptada para la turbina Pelton seleccionada está dentro del rango:

$$N_{emb} = (1,8 \text{ a } 1,9) \cdot 1200$$

$$N_{emb} = (2\ 160 \text{ a } 2\ 280) \text{ rpm}$$

La velocidad del chorro a la salida del inyector se determina a partir de la ecuación 2.14.

$$C = 0,97 \cdot \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 331,08}$$

$$C = 78,18 \text{ m/s}$$

En base a los valores de la figura 2.3 y aplicando las ecuaciones 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18, se calculan las dimensiones básicas de la turbina Pelton, las misma que se detallan en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Dimensiones de la Turbina Pelton.

<b><i>h:</i></b>	161,5	mm
	184,5	mm
<b><i>b:</i></b>	161,5	mm
	184,5	mm
<b><i>t:</i></b>	46,1	mm
<b><i>d:</i></b>	57,7	mm
<b><i>D:</i></b>	561,0	mm
	591,4	mm
<b><i>Z:</i></b>	18,86 ≈ 19	
	21,13 ≈ 22	
<b><i>H<sub>m</sub>:</i></b>	742,2	mm

Como se desea que la máxima eficiencia ocurra a plena carga, debido a que la turbina operará siempre con el caudal máximo de 400 l/s, se utilizan las dimensiones mayores de los resultados mostrados en la Tabla 5.5.

## B.- Generador eléctrico

El generador tiene como misión transformar en energía eléctrica la energía mecánica suministrada por la turbina. Actualmente, salvo algunas excepciones, solo se utilizan alternadores trifásicos de corriente alterna.

Con el propósito de simplificar el diseño y reducir los costos de inversión, evitando la necesidad de un multiplicador de velocidad, el generador adoptará la misma configuración de la turbina y girará a la misma velocidad que ésta, por lo que se acoplará directamente al eje de la turbina.

La selección de las características del generador se realiza considerando:

- Velocidad de giro del generador.- Lo más recomendable es realizar un acople directo entre el eje de la turbina y el eje del generador, con ello se evitan las pérdidas que se ocasionan en las transmisiones.
- Tipo de excitación.- El más utilizado en las nuevas instalaciones es el sistema sin escobillas (*Brushless*).
- Voltaje de generación.

El generador sincrónico es el de uso prioritario en unidades de generación y el más difundido es el trifásico; debido a que es el método más simple y económico de producir energía eléctrica, por ser más eficiente que el monofásico equivalente, menos pesado y por su amplia difusión comercial.

Ya que la frecuencia del sistema eléctrico en el Ecuador se encuentra normalizada en 60 Hz y que la velocidad del generador tiene que ser la misma que la turbina, el número de pares de polos que debe tener el generador viene dada por:

$$n = \frac{120 \cdot f}{P}$$

Donde:

$f$ : frecuencia; Hz.

$P$ : número de polos; adimensional.

Despejando  $P$  se tiene:

$$P = \frac{120 \cdot 60}{1200} = 6 \text{ polos}$$

En base a los parámetros mencionados, el generador seleccionado tiene las siguientes características:

Tabla 5.6. Características principales del generador eléctrico.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Tipo de generador	Trifásico sincrónico de eje horizontal
Número de generadores	1
Número de pares de polos	6
Velocidad sincrónica (rpm)	1 200
Velocidad de embalamiento (rpm)	2 325,0
Tipo de excitación	Brushless
Potencia nominal de salida (kW)	1 080
Potencia de diseño (kVA)	1 140
Frecuencia de operación (Hz)	60
Eficiencia del generador mayor o igual a	95 %
Cota de instalación (msnm)	3 344,0

### C.- Válvulas

Como elementos de cierre y seguridad para el adecuado mantenimiento y operación de los equipos e instalaciones de la central hidroeléctrica, en la casa de máquinas se instalará una válvula en la entrada a la turbina y una válvula en la entrada de la tubería de restitución hacia la Planta de Tratamiento en Apatug.

Las consideraciones básicas que se tomaron en cuenta para seleccionar las válvulas a implementarse en la casa de máquinas son:

- Se requiere que las válvulas puedan ser controladas y monitoreadas desde el cuarto de control de la estación, para realizar los ajustes de caudal de acuerdo a los demás parámetros de la estación.
- La lógica de control y el monitoreo de los equipos se realizará a través de un controlador lógico programable.
- La válvula en la tubería de restitución debe resistir una presión mínima de 10 bares y debe contar con un sensor electromagnético de caudal, y un actuador automático para regular el mismo. Estos dispositivos se ubicarán dentro de las cámaras.

- Los diámetros las tuberías son de 500 mm para la tubería antes de la entrada a la turbina y de 600 mm para la tubería de restitución hacia la planta de tratamiento.
- La válvula en la entrada a la turbina debe ser capaz de resistir una presión mayor al salto neto disponible de 326,05 m col H<sub>2</sub>O (32 bares).
- Se requiere la señal instantánea de caudal y el valor de un totalizador de caudal. Estos valores deben observarse en una interfaz gráfica en el cuarto de control.
- Los actuadores automáticos de las dos válvulas deben tener la capacidad de regular su posición remotamente a través de un protocolo de comunicación.

#### **5.5.7. Evaluación económica de la propuesta**

El objetivo del estudio económico es evaluar la viabilidad de la propuesta, y en consecuencia estudiar la rentabilidad de la inversión en el proyecto.

Para la evaluación económica de la propuesta se aplica la misma metodología utilizada en la sección 3.8.

Los resultados obtenidos en las Tablas 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12 difieren de los valores estimados en los capítulos III y IV, debido a que en el presente capítulo el análisis económico se realiza en base al costo unitario real de cada obra y equipo requerido para el desarrollo de la propuesta (Anexo 8), a la potencia útil real que puede entregar el generador eléctrico y a la cantidad de energía real que se puede vender al SNI; mientras que, en los capítulos III y IV, para el análisis económico se utilizan los valores promedio recomendados en la bibliografía investigada para centrales hidroeléctricas similares con potencias de 1 a 5 MW.

#### **A.- Presupuesto de inversión**

El primer paso para evaluar económicamente el proyecto es determinar con la mayor precisión posible los costos de inversión en las obras de infraestructura y en la adquisición e instalación de equipos.

Para determinar el Presupuesto de Inversiones se consideran todos los costos que involucra el desarrollo del proyecto:

- Costos Directos
- Costos Indirectos

El presupuesto de las obras civiles y la línea de distribución se determina en base a las cantidades de obra y precios unitarios directos referenciales de los rubros del proyecto, esto es: movimiento de tierras, hormigón y mano de obra.

El costo de los equipos electromecánicos, equipos eléctricos, equipos de automatización y comunicación se determina mediante proformas obtenidas de los fabricantes, incrementadas por un porcentaje de seguridad, los mismos que se comparan con precios de los equipos de proyectos similares.

A los Costos Directos de los diferentes rubros se incluye los porcentajes de Costos Indirectos correspondientes a: Ingeniería y Administración en Obra, Fiscalización, Imprevistos y Utilidades.

Los diferentes Costos Directos e Indirectos que involucra la construcción del sistema propuesto para el aprovechamiento de la energía hidráulica se muestra en resumen en la Tabla 5.7.

Tabla 5.7. Resumen del presupuesto de inversiones.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	COSTO TOTAL (USD)
A1	Casa de Máquinas	global	1,0	265 430,9	265 430,88
A2	Equipo Electromecánico	global	1,0	765 556,0	765 556,00
A3	Subestación	global	1,0	72 102,7	72 102,73
A4	Equipo Eléctrico	global	1,0	267 565,0	267 565,00
A5	Línea de Transmisión	global	1,0	249 220,0	249 220,00
A6	Fiscalización	USD	1 619 874,6	4,0 %	64 794,98
A7	Imprevistos Generales	USD	1 619 874,6	10,0 %	161 987,46
A8	Ingeniería y Administración General de Obra	USD	1 619 874,6	5,0 %	80 993,73
<b>COSTO TOTAL DEL PROYECTO</b>					<b>1 927 650,79</b>

Por lo tanto, para el desarrollo de la propuesta se requiere un monto de inversión total de 1 927 650, 79 USD.

## B.- Costos y gastos

La operación del sistema de generación hidroeléctrica conlleva la realización de gastos anuales a lo largo de todo su periodo de vida (considerado en 30 años). Los pagos consisten en unas cantidades anuales variables como son gastos de operación y mantenimiento, y unas cantidades anuales fijas que consisten en el pago de seguros y plan de manejo ambiental.

Tabla 5.8. Resumen de costos y gastos.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	GASTO ANUAL (USD)
B1	Operación de la Central Hidroeléctrica	kW	1 076,50	15,0	16 147,50
B2	Mantenimiento de los Equipos	USD	1 033 121,00	3,0%	30 993,63
	Mantenimiento de Obras Civiles	USD	337 533,61	2,0%	6 750,67
	Mantenimiento de las Líneas de Transmisión Eléctricas	USD	249 220,00	2,0%	4 984,40
B3	Seguros	USD	1 619 874,61	0,5%	8 099,37
B4	Plan de Manejo Ambiental	USD	586 753,61	5,0%	29 337,68
<b>GASTO TOTAL ANUAL</b>					<b>96 313,26</b>

La operación y mantenimiento de la central hidroeléctrica propuesta involucra un gasto anual de 96 313,26 USD.

## C.- Depreciación de obras y equipos

Como se muestra en la Tabla 5.9, los costos por depreciación de las obras y equipos requeridos para el sistema de generación hidroeléctrica propuesto alcanzan un valor de 88 448,07 USD.

Tabla 5.9. Depreciación anual de obras y equipos.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	GASTO ANUAL (USD)
C1	Depreciación de Obras	USD	586 753,61	3,3 %	19 538,90
C2	Depreciación de Equipos	USD	1 033 121,00	6,7 %	68 909,17
<b>DEPRECIACIÓN ANUAL</b>					<b>88 448,07</b>

#### D.- Ingresos

Los ingresos son el resultado de la operación de la Central Hidroeléctrica y corresponden a la venta de energía, es decir al ingreso proveniente de la potencia garantizada disponible en la central hidroeléctrica propuesta.

Tabla 5.10. Ingresos medios anuales por venta de energía.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD/kWh)	VENTA ANUAL (USD)
D1	Energía media anual generada	kWh/año	7 921 000,00	0,0717	567 935,70
<b>INGRESO PROMEDIO ANUAL</b>					<b>567 935,70</b>

De acuerdo con los resultados de la Tabla 5.10, por lo venta de energía eléctrica, se esperan ingresos anuales que asciende a 567 935,70 USD, valor que es menor al estimado en la Tabla 3.10, debido a que la cantidad real de energía generada es menor.

#### E.- Flujo de caja

Para calcular el flujo de caja no se prevé ningún valor residual para los equipos al término de su vida útil y se considera una tasa de descuento anual del 10,21 % de acuerdo con la tabla de Tasas de Interés Referenciales del Banco Central.

En la Tabla 5.11 se observa que para la central hidroeléctrica propuesta el flujo de caja acumulado es negativo (en rojo) durante los primeros cuatro años. A partir del quinto año de operación de central hidroeléctrica propuesta el flujo de caja se vuelve positivo, lo que indica que se ha recuperado la inversión y se comienza a obtener ganancias por la venta de energía al SNI. En el año dieciséis es necesario volver a invertir en la compra de los equipos electromecánicos, siendo la utilidad esperada durante los 30 años de vida útil de la central hidroeléctrica de 11 187 901,54 USD.

Tabla 5.11. Flujo de caja para la central hidroeléctrica propuesta.

AÑO	INVERSIÓN INICIAL (USD)	INGRESOS ANUALES (USD)	GASTOS ANUALES (USD)	DEPREC. ANUAL (USD)	UTILIDAD NETA (USD)	FLUJO DE CAJA (USD)	FLUJO DE CAJA ACUMULADO (USD)
0	-1.927.650,79	0,00	0,00	0,00	0,00	-1.927.650,79	-1.927.650,79
1		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	-1.456.028,34
2		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	-984.405,90
3		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	-512.783,45
4		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	-41.161,01
5		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	430.461,44
6		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	902.083,88
7		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	1.373.706,32
8		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	1.845.328,77
9		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	2.316.951,21
10		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	2.788.573,66
11		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	3.260.196,10
12		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	3.731.818,55
13		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	4.203.440,99
14		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	4.675.063,43
15		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	5.146.685,88
16	-1.033.121,00	567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	-561.498,56	4.585.187,32
17		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	5.056.809,77
18		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	5.528.432,21
19		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	6.000.054,65
20		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	6.471.677,10
21		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	6.943.299,54
22		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	7.414.921,99
23		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	7.886.544,43
24		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	8.358.166,88
25		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	8.829.789,32
26		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	9.301.411,76
27		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	9.773.034,21
28		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	10.244.656,65
29		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	10.716.279,10
30		567.935,70	96.313,26	88.448,07	383.174,38	471.622,44	11.187.901,54

## F.- Evaluación económica

Con el fin de determinar la factibilidad de la central hidroeléctrica en términos económicos, se calculan los diferentes indicadores económicos para conocer la rentabilidad de la propuesta.

Tabla 5.12. Indicadores económicos del proyecto

ÍTEM	INDICADOR	VALOR
F1	Valor Actual Neto (VAN) en USD	2 223 491,15
F2	Tasa Interna de Retorno (TIR)	24,02%
F3	Relación Beneficio Costo (B/C)	1,87
F4	Periodo de Recuperación (PR) en años	4,09
F5	Costo promedio del kW instalado en USD	1 790,66

Los indicadores económicos obtenidos en base a gastos e ingresos obtenidos con datos reales para la central hidroeléctrica propuesta presentan resultados favorables que permiten recuperar la inversión en un periodo de 4,09 años.

## 5.6. Impacto medio ambiental

A la hora de evaluar y de comparar las distintas fuentes energéticas que pueden ser utilizadas para la producción de electricidad, cada vez cobran mayor importancia las consideraciones referidas a su impacto ambiental. Estas consideraciones son tan importantes que están afectando decisivamente la configuración del futuro energético de muchos países.

### 5.6.1. Evaluación del impacto ambiental

Basadas en los estudios realizados por grupos de expertos europeos que han llevado a cabo informes de Estudios de Impacto Ambiental (Daini y Daly, 2012), se elaboró las Tablas 5.13 y 5.14, en las que se describe la variedad de los posibles impactos ambientales que pueden ocurrir durante cada fase de desarrollo de la propuesta, señalando el receptor del impacto, el tipo de impacto y la importancia del mismo.

Tabla 5.13. Impactos durante la fase de construcción.

DESCRIPCIÓN	PERSONAS Y COSAS AFECTADAS	IMPACTO	IMPORTANCIA
Estudios geológicos.	Animales	Ruidos	Baja
Corte de vegetación existente.	Selvicultura	Alteración del hábitat	Media
Ampliación caminos.	Público general	Creación de oportunidades, alteración del hábitat	Media
Movimiento de tierras.	Geología local	Estabilidad de taludes	Baja
Acumulación temporal de Tierras.	Geología local	Estabilidad de taludes	Baja
Desplazamiento temporal de caminos, líneas eléctricas.	Publico general	Estabilidad de taludes	Insignificante
Uso de excavadoras, camiones, automóviles, maquinaria pesada.	Animales salvajes, público en general	Ruidos	Alta
Presencia humana durante las obras.	Animales salvajes, público en general	Ruidos	Baja

Tabla 5.14. Impactos durante la fase de generación.

DESCRIPCIÓN	PERSONAS Y COSAS AFECTADAS	IMPACTO	IMPORTANCIA
Producción de energía renovable	Público en general	Reducción de emisiones	Alta
Tuberías forzadas	Animales salvajes, público en general	Intrusión visual	Media
Nuevas líneas eléctricas	Animales salvajes, público en general	Intrusión visual	Baja
Protección de terraplenes con piedras planas	Animales salvajes, público en general	Modificación del hábitat, intrusión visual	Baja
Ruidos del equipo electromecánico	Público en general	Alteración de la calidad de vida	Baja

Identificar los impactos no es tarea difícil, pero decidir qué medidas de corrección deben aplicarse si lo es, porque esas decisiones se basan muchas veces en criterios subjetivos. Es por eso que solo un diálogo continuado entre instituciones y personas implicadas en el proyecto, permitirá acelerar la utilización de este recurso renovable.

## 5.6.2 Análisis comparativo con otras tecnologías de generación eléctrica

El propósito de este análisis es el de comparar de forma fundamentada los daños o impactos medioambientales y sociales provocados por las diversas tecnologías de generación de electricidad.

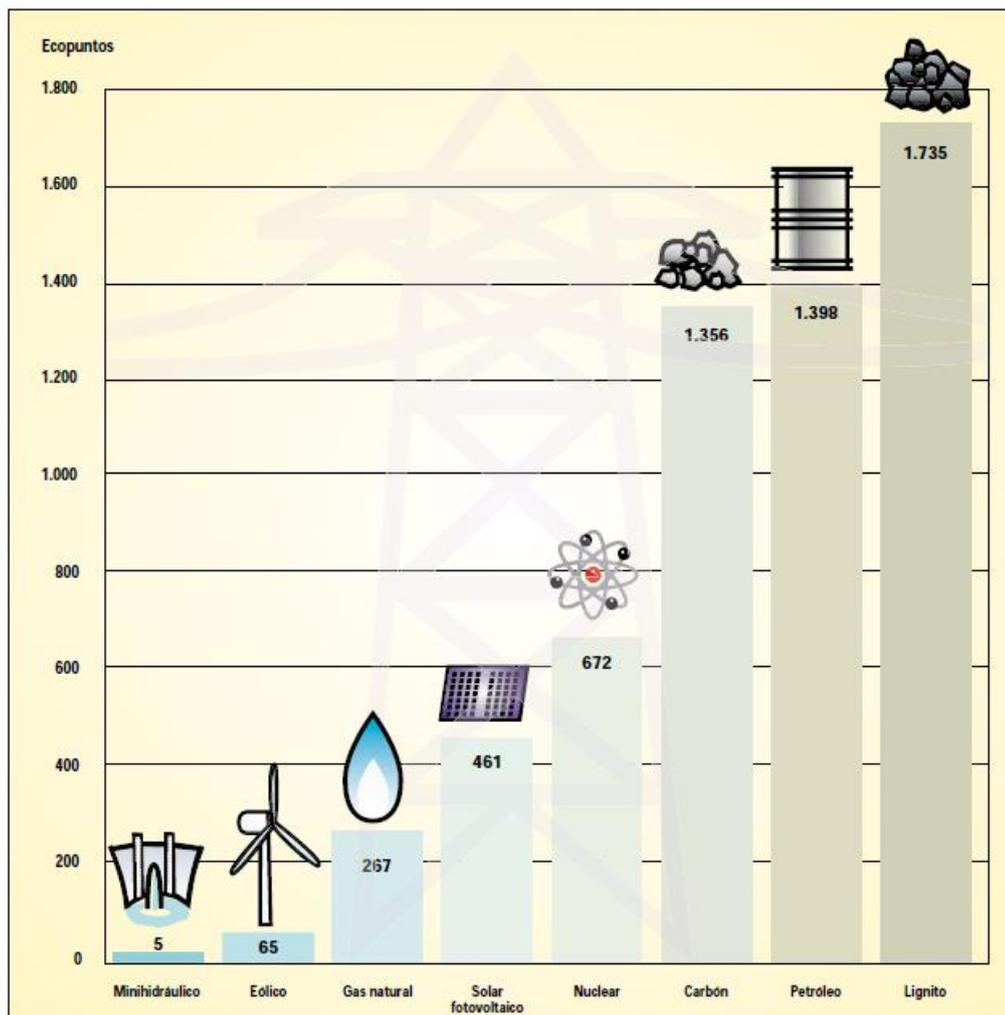
Debido a que no existe un estudio comparativo del impacto ambiental que producen las diferentes fuentes de energía utilizadas en nuestro país y el realizar un estudio de este tipo no es parte de la presente investigación, el análisis comparativo se basa en los resultados de los estudios realizados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), según la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que es una herramienta de gestión ambiental que permite identificar los impactos ambientales atribuibles al proceso analizado, a lo largo de todo su ciclo de vida.

<b>Sistemas energéticos</b>	Lignito	Petróleo	Carbón	Nuclear	Solar Foto-voltaico	Gas Natural	Eólico	Mini-hidráulica
<b>Impactos ambientales</b>								
Calentamiento Global	135,00	97,00	109,00	2,05	15,40	95,80	2,85	0,41
Disminución Capa de Ozono	0,32	53,10	1,95	4,12	3,66	0,86	1,61	0,05
Acidificación	920,00	261,00	265,00	3,33	97,00	30,50	3,49	0,46
Eutrofización	9,83	9,76	11,60	0,28	1,97	6,97	0,27	0,06
Metales pesados	62,90	244,00	728,00	25,00	167,00	46,60	40,70	2,58
Sustancias Cancerígenas	25,70	540,00	84,30	2,05	75,70	22,10	9,99	0,76
Niebla de Invierno	519,00	135,00	124,00	1,50	53,30	3,08	1,48	0,15
Niebla Fotoquímica	0,49	36,90	3,05	0,32	3,03	3,47	1,25	0,06
Radiaciones Ionizantes	0,02	0,02	0,05	2,19	0,12	0,00	0,01	0,00
Residuos Residuos	50,90	0,62	12,90	0,28	1,84	0,58	0,29	0,52
Radiactivos	5,28	7,11	10,60	565,00	34,90	1,34	1,83	0,32
Agotamiento Recursos Energéticos	5,71	13,60	5,47	65,70	7,06	55,80	0,91	0,07
<b>Total</b>	<b>1735,16</b>	<b>1398,11</b>	<b>1355,92</b>	<b>671,82</b>	<b>460,98</b>	<b>267,11</b>	<b>64,67</b>	<b>5,43</b>

Figura 5.9. Comparación de los impactos ambientales de ocho tecnologías de generación eléctrica.

Fuente: Laguna, Bernhard y Papetti, 2006.

El ACV para la generación eléctrica tiene por objetivo principal la evaluación de las externalidades ambientales asociadas a la generación de 1 kW/h, partiendo de la evaluación física de los impactos, su clasificación y comparación. Posteriormente, se reducen todos los valores obtenidos a unos supra-valores finales que determinarán lo que se denomina eco-puntos. Cuanto mejor es (desde el punto de vista ambiental) la fuente energética, menos eco-puntos debe tener. Los resultados del estudio se muestran en las figuras 5.9 y 5.10.



**Figura 5.10. Impactos ambientales de la generación eléctrica mediante ocho tecnologías**  
Fuente: Laguna, Bernhard y Papetti, 2006.

Del análisis de las figuras 5.9 y 5.10, y tomando en cuenta que en el Ecuador se utilizan en gran medida como fuentes de energía: el petróleo, la hidráulica, la eólica y la solar fotovoltaica, se determina que las tecnologías basadas en mini hidráulica son las que menos impacto ambiental producen.

## 5.7.- Validación de la hipótesis

De acuerdo con Hernández (2010: 97, 333) las hipótesis descriptivas de un dato o valor que se pronostica se utilizan en investigaciones descriptivas, para predecir un valor en una o más variables que se van a medir y estas hipótesis se validan mediante la media, mediana, desviación estándar y rango.

Mediante el programa Microsoft Excel se determina el desarrollo hidroeléctrico de la central propuesta, con cada uno de los caudales medidos en la tabla 3.4, con el objeto de calcular la potencia útil a generar con cada caudal. Los valores obtenidos se detallan en el anexo 9.

A partir de estos valores se calculan las medidas de tendencia central de la potencia útil generada, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5.15. Medidas de tendencia central de la potencia generada

<b>Potencia útil máxima:</b>	1144,50 kW
<b>Potencia útil mínima:</b>	1021,30 kW
<b>Rango:</b>	123,19 kW
<b>Mediana:</b>	1075,91 kW
<b>Media:</b>	1076,46 kW
<b>Desviación estándar:</b>	14,77 kW

Se observa que la potencia útil mínima a generar es de 1021,30 kW, la media y la mediana son 1076, 46 kW y 1075,91 kW respectivamente, con una desviación estándar de 14,77 kW.

Por lo tanto, se valida la hipótesis sobre que la línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug, permitirá el desarrollo de una central hidroeléctrica con una potencia útil superior a 1,0 MW.

Con respecto a que no se afectará el suministro de agua por gravedad hacia la planta de tratamiento, también es validada, debido a que de los cálculos realizados en el presente capítulo, se determina que el agua llega a la planta de tratamiento con una altura piezométrica de 21,50 m, lo que garantiza la conducción del agua por gravedad.

## **5.8.- Conclusiones del capítulo**

Mediante el análisis de los estudios topográficos y geológicos realizados en las zonas con cotas cercanas a los 3 354,81 msnm y luego de varias visitas de reconocimiento en el campo, se localizó el sitio que mejores condiciones presenta para la implantación de la casa de máquinas, el mismo que se encuentra en las coordenadas UTM N 9 858 495,90 y E 743 102,00 a una elevación de 3 345,50 msnm.

Del diseño hidráulico y del desarrollo hidroeléctrico de la propuesta se determinó que la potencia a disposición de la turbina es de 1 299,16 kW, de los cuales debido al rendimiento que tienen los equipos, según la información proporcionada por el fabricante, 1 076,5 kW pueden ser entregados por el generador como potencia útil.

El dimensionamiento de las diferentes obras requeridas para la central hidroeléctrica, detallados en el anexo 4, permito establecer su ubicación y tamaño adecuado de forma que facilita la adecuada operación y mantenimientos de las instalaciones y equipos

La turbina hidráulica más adecuada para el caudal y salto neto disponible, es una turbina Pelton con dos inyectores, 22 cucharas y 591,4 mm de diámetro del rodete.

Del análisis comparativo de los impactos ambientales de diferentes tecnologías de generación eléctrica se determinó que la mini hidráulica produce menos impacto ambiental que el petróleo, la eólica y la solar fotovoltaica.

## CONCLUSIONES GENERALES

- La cota de 3 345,50 msnm determinada para la implantación de la casa de máquinas, a la vez que maximiza la generación, permite que el agua llegue por gravedad a la planta de tratamiento con una altura piezométrica de 21,50 m, valor que proporciona un rango de seguridad que permite absorber las imprecisiones en el montaje de la tubería, así como el aumento de rugosidad por el uso, garantizando el funcionamiento tanto del proyecto hidroeléctrico como el de agua potable durante toda su vida útil.
- El sitio propuesto para implantar el sistema de generación hidroeléctrica no presenta problemas topográficos ni geológicos, lo que garantiza la estabilidad de las diferentes obras y el espacio suficiente para el desarrollo de las mismas. Además, cuenta con vías de acceso para el ingreso de materiales y equipos, así como de canteras y sitios cercanos para el desalojo de materiales y escombros.
- La metodología aplicada para la selección de los equipos electromecánicos fue la que corresponde a pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, con la consideración de que los equipos seleccionados que estarán en contacto con el agua, deben utilizar aceites, grasas y otras sustancias autorizadas expresamente para el uso en agua potable.
- Del dimensionamiento de los equipos requeridos para el adecuado funcionamiento de la pequeña central hidroeléctrica se determina que los mismos requieren de características técnicas que no dificultan su adquisición en el mercado nacional o por importación.
- La línea de conducción para agua potable Presa Chiquihurco – Planta de Tratamiento Apatug cuenta con un caudal constante durante todo el año de 0,4 m<sup>3</sup>/s y un salto neto disponible de 331,08 m, lo que permite el desarrollo de una Central Hidroeléctrica con una potencia útil de 1,077 MW, que podrá generar 7 921,0 MWh de energía al año.
- El costo de inversión calculado para el sistema de generación hidroeléctrica propuesto, tiene un valor promedio de 1 790,66 USD por kW instalado, que

constituye un costo conveniente para centrales de este tamaño, ya que normalmente tienen un costo de 3 500,0 USD el kW instalado.

- El potencial energético del proyecto y los precios preferenciales del kWh para la venta de energía, permiten recuperar la inversión en un periodo de 4,09 años (4 años 1 mes), arrojando una relación costo beneficio de 1,87 y una tasa interna de retorno de 24,02 %, valores que son adecuados para pequeñas centrales hidroeléctricas.
- Los aprovechamientos hidroeléctricos en líneas de alimentación para agua potable constituyen una alternativa viable para generar energía eléctrica en sectores rurales, a un costo aceptable y con poco impacto ambiental, proporcionándoles sostenibilidad y resiliencia energética a las comunidades donde se desarrollen este tipo de proyectos.

## **RECOMENDACIONES**

- Estudiar con mayor profundidad la metodología que se debe aplicar para dimensionar de forma precisa el grupo turbina – generador mediante la utilización de las curvas características de la turbina para diferentes parámetros de operación del sistema.
- Desarrollar una metodología adecuada para seleccionar un sistema de válvulas que permita disipar de forma controlada y segura toda la energía potencial del agua, en situaciones de paradas programadas o emergentes de la turbina hidráulica.
- Realizar estudios de prefactibilidad para aprovechar el potencial energético disponible en sistemas de conducción de agua existentes en comunidades aisladas que presenten condiciones topográficas favorables para la generación hidroeléctrica de hasta 10 MW, a fin de darles sostenibilidad y resiliencia en situaciones desfavorables.
- Buscar alternativas para generar energía eléctrica en líneas de conducción de agua de zonas rurales mediante la aplicación de micro generadores hidráulicos.

## BIBLIOGRAFÍA CITADA

1. Armand, F.; Schleiss, A. (2006). Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica, Segunda Edición. España: European Small Hydropower Association.
2. Can, I. (2005). Simplified Equations Calculates Head Losses in Commercial Pipes. *The Journal of American Science*, Vol 1, No.1, 11-13.
3. Castro, M. (2011). Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador, Primera Edición. Ecuador: CEDA.
4. Cengel, Y.; Cimbala, J. (2012). Mecánica de Fluidos – Fundamentos y Aplicaciones, Segunda Edición, Mexico: McGraw-Hill.
5. CONELEC. (2009) “Plan Maestro de Electrificación 2009 – 2020”, disponible en: <http://www.conelec.gob.ec/>
6. CONELEC. (2009). “Procedimiento de Aplicación de la Regulación n°. CONELEC – 009/08, Registro de Generadores Menores a 1 MW”, disponible en: <http://www.conelec.gob.ec/>
7. CONELEC. (2010) “Reglamento de despacho y operación del sistema nacional interconectado”; disponible en: <http://www.conelec.gob.ec/>
8. CONELEC. (2011) Tratamiento para la Energía Producida con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales, Regulación No. CONELEC – 004/11. Ecuador.
9. Crowe, C.; Elger, D.; Williams, B. (2009). Engineering Fluid Mechanics, Novena Edición, United States of America: John Wiley & Sons.
10. Daini, P.; Daly, E. (2000). Environmental impact assessment for hydroelectric power plants: Similarity and clustering of studies, sites and projects. *Impact Assessment and Project Appraisal EIA for Hydroelectric Plants*, Vol 18, No. 1, 43-60.

11. Finck, H.; Oelert, G. (1995). Guía para el Cálculo de Rentabilidad de Proyectos de Inversión para el Abastecimiento de Energía, Primera Edición. Alemania: GTZ.
12. Franco, D. (2007). La importancia de aprovechar la pequeña hidroenergía. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol 9, 21-23.
13. Ghidaoui, M.; Zhao, M. (2005). A Review of Water Hammer Theory and Practice. *Applied Mechanics Reviews*, Vol 58, 49-76.
14. Hernández, R.; Fernández, C.; Baptista, P. (2010). Metodología de la Investigación, Quinta Edición, Mexico: McGraw-Hill.
15. Hernández, R.; Fernández, C.; Baptista, P. (2007). Fundamentos de Metodología de la Investigación, Cuarta Edición, España: McGraw-Hill.
16. Husain, Z.; Abdullah, Z.; Alimuddin, Z. (2008). Basic Fluid Mechanics and Hydraulic Machines, Primera Edición, Hyderabad: BS Publications.
17. Korpela, S. (2011). Principles of turbomachinery, Primera Edición, New Jersey: John Wiley & Sons.
18. Laguna, M.; Bernhard, P.; Papetti, L. (2006). El impacto ambiental de las distintas fuentes energéticas de generación eléctrica. *Energía y Medio Ambiente*, Vol. 9, No. 4, 178-183.
19. Ledec, G.; Quintero, J. (2006). Method for Quantitatively Evaluating Sites for New Hydroelectric Projects. *HRW*, Vol 14, No. 3, 30-37.
20. Lior, N. (2010). Sustainable energy development: The present situation and possible paths to the future, Primera Edición, USA: Elsevier
21. Mataix, C. (1982). Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Segunda Edición, México: Alfaomega.
22. Menéndez G. (1995). Ingenios hidráulicos históricos molinos, batanes y perrerías. *Ingeniería del Agua*, Vol 2, No. 4, 25-42.

23. Morales, S.; Corredor, L.; Paba, J.; Pacheco, L. (2013). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación. *Dyna*, Vol 81, 178-185.
24. Morris, L. (2010). Small-scale hydro gets big: will regulatory changes allow developers to push out projects faster and more efficiently than before? *Power Engineering*, 116+.
25. Mott, R. (2006). Diseño de elementos de máquina, Cuarta Edición. México: Pearson Educación.
26. Sapag, N.; Sapag, R. (2009). Preparación y evaluación de proyectos, Quinta Edición. México: McGraw-Hill Interamericana.
27. Ortiz, R. (2011). Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Segunda Edición, Colombia: McGraw Hill.
28. Penche, C. (1998). Manual de Pequeña Hidráulica - Como llevar a buen fin un proyecto de minicentral hidroeléctrica, Primera Edición, Belgica: ESHA.
29. Peña, J.; Játiva J. (2010). Análisis técnico-comercial de las centrales hidroeléctricas Recuperadora y el Carmen de la empresa pública metropolitana de agua potable. *Nuevos Conceptos y Tecnologías*.
30. Pérez, F. (2007). La importancia de aprovechar la pequeña hidroenergía. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol 27, No. 2, 28-30.
31. Pritchard, P.; Leylegian, J. (2011). Fox and McDonalds Introduction to Fluid Mechanics, Octava Edición, United States of America: John Wiley & Sons.
32. RETSCREEN International. (2005). Clean Energy Project Analysis - Engineering & Cases Textbook, Tercera Edición, Canada: Canmet.
33. Rodríguez, L. (2010). Informe Técnico: *Sistema de Agua Potable Chiquiurcu Zona Alta de Ambato*, Ambato.
34. Rojas, O. (2006). Manual Básico para Medir Caudales, Primera Edición, Quito: FONAG.

35. Sánchez, T.; Ramírez G. (1995). Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas – Una Guía para el Desarrollo de Proyectos, Primera Edición, Perú: ITDG.
36. Sangal, S.; Garga, A.; Kumar, D. (2013). Review of Optimal Selection of Turbines for Hydroelectric Projects. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol 3, No. 3, 424-430.
37. Sierra, F.; Guerra, C. (2008) Pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. *Energías Renovables*. 73-85.
38. Smith, R.; Amisial, R. (1987). Estimación del Potencial Hidroeléctrico, CIDIAT (Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras), España: Mérida.
39. Tzatchkov, V.; Caldiño, I. (2007). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - Diseño, Selección e Instalación de Tuberías de Acero para Líneas de Conducción de Agua Potable, Primera Edición, México: CNA.
40. Vallero, D. (2008). Fundamentals of Air Pollution, Primera Edición, Burlington: Elsevier.
41. Villagómez, A.; León J. (2010). Gestión automática para un proyecto de agua potable y electricidad “Proyecto Mica – Quito Sur. *Nuevos Conceptos y Tecnologías*.
42. Young, D.; Munson, B.; Okiishi, T. (2005). Introducción a la Mecánica de Fluidos, Segunda Edición, México: Limusa Wiley.
43. Zoppetti, G. (1982). Centrales Hidroeléctricas – Su estudio, montaje, regulación y ensayo, Quinta Edición, México: Ediciones G Gill.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

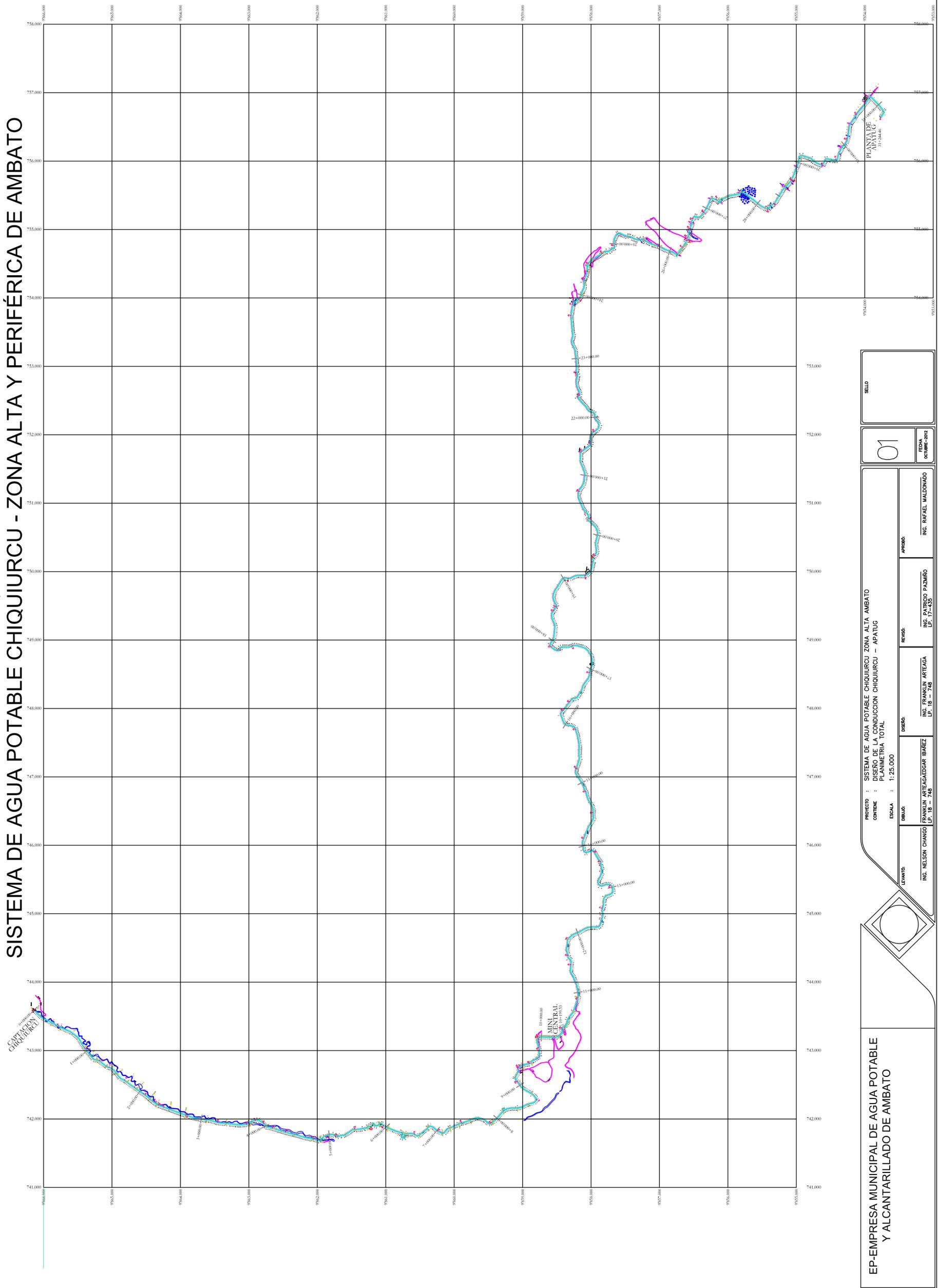
1. Adamkowski, A.; Castro, L.; Reggio, M. (2012). Experimental and numerical simulations predictions comparison of power and efficiency in hydraulic turbine. *Modelling and Simulation in Engineering*, Vol 7.
2. Álvarez, R.; Arce, A. (2009). Estudio de aprovechamiento de pequeñas centrales hidroeléctricas, Décimo tercer encuentro regional Iberoamericano de Cigré.
3. Arias, V. (2012). Los caudales ecológicos en el Ecuador: *Análisis institucional y legal*, CEDA, Vol 01, No. 24, 01-08.
4. Chiriboga, P. (2009). Evaluación de las energías renovables no convencionales factibles de desarrollarse en el ecuador. Escuela Politécnica Nacional EPN, Quito, Ecuador.
5. Greene, R. (2010). Válvulas: Selección, uso y mantenimiento, Primera Edición, México: McGraw-Hill.
6. Moser, A.; Folkman, S. (2008). Burried Pipe Design, Tercera Edición, New York: McGraw-Hill.
7. Noam, L. (2010). Sustainable energy development: *The present (2009) situation and possible paths to the future*, Vol 03, No. 35, 3976-3994.
8. Silowash, B. (2010). Piping Systems Manual, Primera Edición, New York: McGraw-Hill.

# ANEXOS

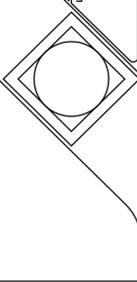
## **ANEXO 1**

**LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO A LO LARGO DEL TRAZADO DE LA  
LÍNEA DE CONDUCCIÓN PARA AGUA POTABLE PRESA CHIQUIHURCO  
– PLANTA DE TRATAMIENTO EN APATUG**

# PLANIMETRIA CHIQUIURCU - APATUG SISTEMA DE AGUA POTABLE CHIQUIURCU - ZONA ALTA Y PERIFÉRICA DE AMBATO



**EP-EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE  
Y ALCANTARILLADO DE AMBATO**

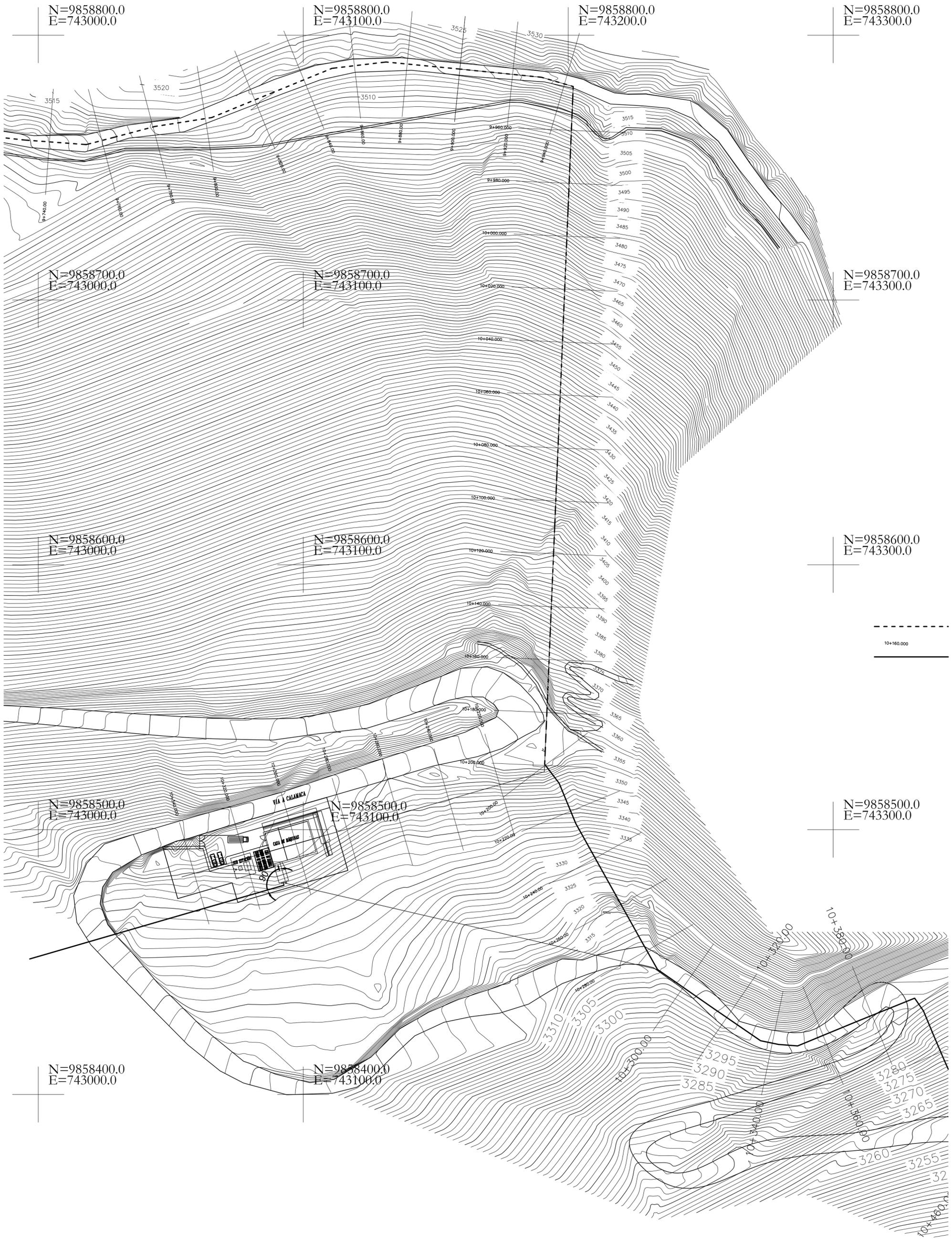


LEVANTO: ING. NELSON CHANGO E.P. 18 - 748	DISEÑO: ING. FRANCIS ARTAGA E.P. 18 - 748	REVISO: ING. PATRICKO PALMIRO E.P. 17 - 433	APROBÓ: ING. RAFAEL MALDONADO
---	---	---	----------------------------------

01

SELO

PLANTILLA  
311-344-6



N=9858800.0  
E=743000.0

N=9858800.0  
E=743100.0

N=9858800.0  
E=743200.0

N=9858800.0  
E=743300.0

N=9858700.0  
E=743000.0

N=9858700.0  
E=743100.0

N=9858700.0  
E=743300.0

N=9858600.0  
E=743000.0

N=9858600.0  
E=743100.0

N=9858600.0  
E=743300.0

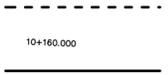
N=9858500.0  
E=743000.0

N=9858500.0  
E=743100.0

N=9858500.0  
E=743300.0

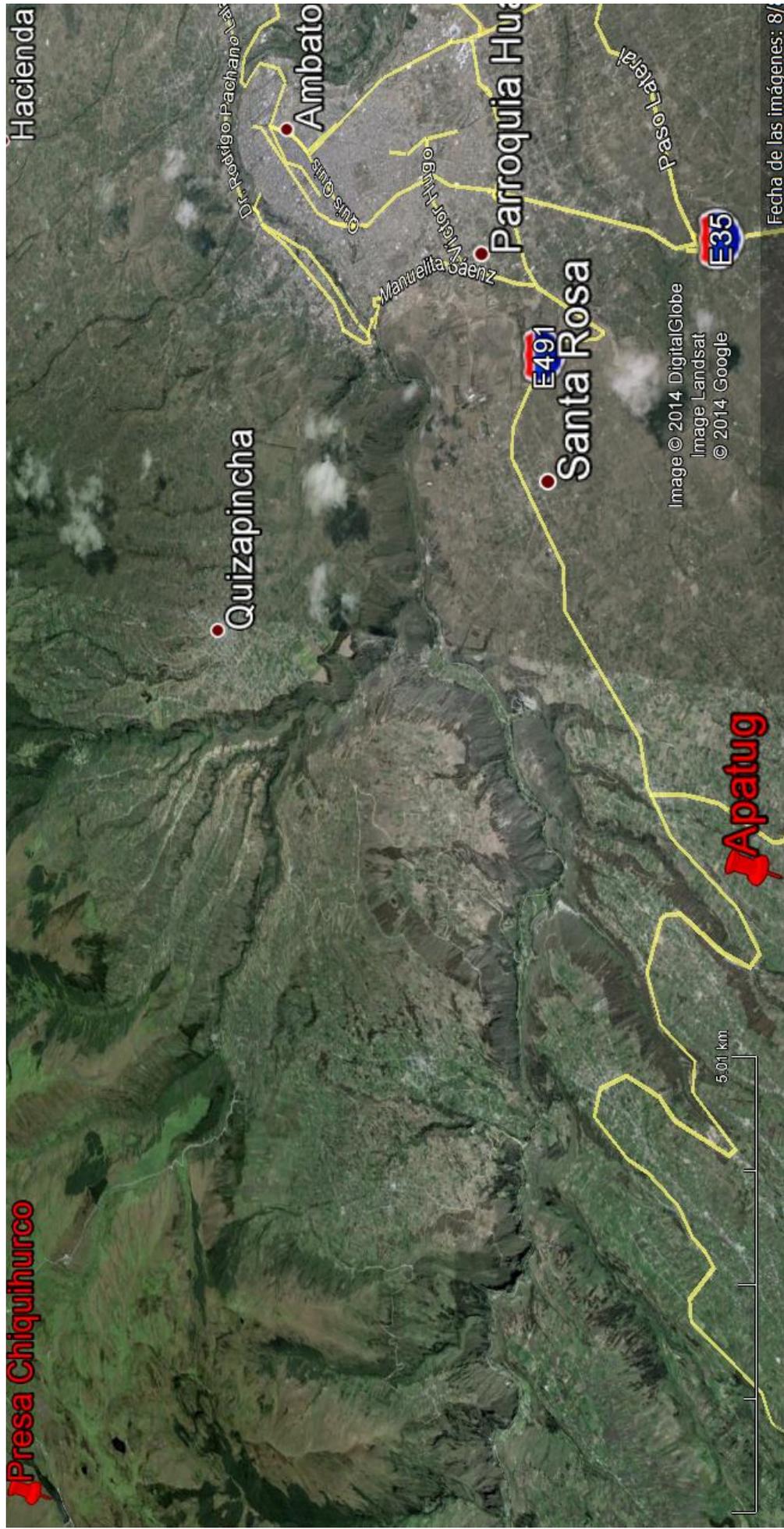
N=9858400.0  
E=743000.0

N=9858400.0  
E=743100.0



## **ANEXO 2**

### **MAPA FOTOGRAMÉTRICO 3D DE LA ZONA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO**



### **ANEXO 3**

**PERFIL DE LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN PARA AGUA POTABLE PRESA  
CHIQUIHURCO – PLANTA DE TRATAMIENTO EN APATUG**



## **ANEXO 4**

### **PLANOS HIDRÁULICOS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**



## **ANEXO 5**

### **HOJAS DE CÁLCULO DEL DISEÑO HIDRÁULICO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

**CALCULO DE FLUJO PERMANENTE**

**LINEA DE CONDUCCION - TRAMO 1 D = 600 mm - TRAMO 2 D = 500 mm**

**DATOS:**

Caudal de Diseño:	0,4	m <sup>3</sup> /s
Cota del Tanque de Carga:	3705,68	msnm
Temperatura ambiente:	15	°C
Viscosidad cinemática del agua (15°C) v:	1,14E-06	m <sup>2</sup> /s
Densidad del agua (15°C) ρ:	1000,3	kg/m <sup>3</sup>
Diámetro interior de la tubería Tramo 1:	600	mm
Diámetro interior de la tubería Tramo 2:	495,3	mm
Material 1 de la tubería:	Hierro Dcutil-Mortero Cemento	
Módulo de elasticidad material 1 - E <sub>hierro</sub> :	1.70E+11	MPa
Límite de fluencia de material 1 - Sy <sub>hierro</sub> :	270	MPa
Material 2 de la tubería:	Acero ASTM 572 - 50	
Módulo de elasticidad material 2 - E <sub>acero</sub> :	2,07E+11	MPa
Límite de fluencia de material 2 - Sy <sub>acero</sub> :	345	MPa

Descripción	Abscisa (m)	Cota Terreno (m.s.n.m.)	Cota Poryecto (m.s.n.m.)	Longitud parcial de tubería (m)	Longitud acumulada de tubería (m)	Gradiente (m/m)	Presión Estática		Velocidad (m/s)	Número de Reynolds Re	Δhf Parcial (m)	Δh Parcial (m)	ΔH Acumulada (m)	Altura Piezométrica (m)
							(m)	(MPa)						
Captación	+00	3705,78	3700,58	0,00	0,00	0,00	5,10	0,05	1,41	7,45E+05	0,00	0,00	0,00	5,10
	+500,00	3703,81	3696,36	500,02	500,02	-0,008	9,32	0,09	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	1,31	8,01
	1+000,00	3691,21	3688,22	500,07	1000,08	-0,016	17,46	0,17	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	2,62	14,84
	1+500,00	3688,38	3685,47	500,01	1500,09	-0,006	20,21	0,20	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	3,93	16,28
	2+000,00	3661,46	3658,37	500,73	2000,83	-0,054	47,32	0,46	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	5,24	42,07
	2+500,00	3629,19	3625,92	501,05	2501,88	-0,065	79,76	0,78	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	6,56	73,21
	3+000,00	3607,34	3604,16	500,47	3002,35	-0,044	101,53	1,00	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	7,87	93,66
	3+500,00	3587,76	3584,63	500,38	3502,73	-0,039	121,05	1,19	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	9,18	111,87
	4+000,00	3533,83	3536,00	502,36	4005,09	-0,097	169,68	1,66	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	10,49	159,19
	4+500,00	3510,91	3507,45	500,81	4505,91	-0,057	198,23	1,92	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	11,81	186,42
	5+000,00	3512,24	3510,04	500,01	5005,91	0,005	195,64	1,94	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	13,12	182,53
	5+500,00	3526,78	3524,46	500,21	5506,12	0,029	181,23	1,78	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	14,43	166,80
	6+000,00	3515,46	3513,22	500,13	6006,25	-0,022	192,46	1,89	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	15,74	176,72
	6+500,00	3458,07	3455,89	503,28	6509,52	-0,115	249,79	2,45	1,41	7,45E+05	1,26	0,06	17,06	232,73
	7+000,00	3442,42	3440,10	500,25	7009,77	-0,032	265,58	2,60	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	18,37	247,21
	7+500,00	3404,89	3402,39	501,42	7511,19	-0,075	303,29	2,97	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	19,68	283,61
	8+000,00	3391,45	3389,35	500,17	8011,36	-0,026	316,33	3,10	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	20,99	295,34
	8+500,00	3408,58	3406,47	500,29	8511,65	0,034	299,21	2,93	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	22,30	276,90
	9+000,00	3453,53	3451,66	502,04	9013,69	0,090	254,02	2,49	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	23,62	230,40
	9+500,00	3488,29	3486,33	501,20	9514,89	0,069	219,35	2,15	1,41	7,45E+05	1,25	0,06	24,93	194,42
Cambio de Diámetro	9+940,00	3518,30	3515,80	440,99	9955,88	0,068	189,88	1,86	1,41	7,45E+05	1,10	0,06	26,09	163,80

Cambio de Diámetro	9+940,00	3518,30	3515,80	0,00	0,00	0,067	189,88	1,86	2,08	9,02E+05	0,00	0,00	26,09	163,80
	9+960,00	3505,46	3502,71	23,90	23,90	-0,654	202,97	1,99	2,08	9,02E+05	0,17	0,01	26,27	176,70
	9+980,00	3491,32	3489,01	24,24	48,14	-0,685	216,67	2,12	2,08	9,02E+05	0,18	0,01	26,46	190,21
	10+000,00	3475,96	3473,52	25,50	73,44	-0,775	232,16	2,28	2,08	9,02E+05	0,18	0,01	26,65	205,51
	10+020,00	3462,29	3459,79	24,33	97,77	-0,684	245,89	2,41	2,08	9,02E+05	0,18	0,01	26,84	219,06
	10+040,00	3448,30	3446,00	24,23	122,00	-0,692	259,69	2,55	2,08	9,02E+05	0,18	0,01	27,02	232,66
	10+060,00	3435,29	3432,89	24,31	146,31	-0,655	272,79	2,68	2,08	9,02E+05	0,17	0,01	27,20	245,59
	10+080,00	3423,89	3421,30	23,11	169,02	-0,579	284,38	2,79	2,08	9,02E+05	0,17	0,01	27,38	257,00
	10+100,00	3410,62	3408,22	23,90	192,92	-0,654	297,46	2,92	2,08	9,02E+05	0,17	0,01	27,56	269,90
	10+120,00	3395,60	3393,10	25,07	217,99	-0,756	312,58	3,07	2,08	9,02E+05	0,18	0,01	27,76	284,83
	10+140,00	3384,36	3381,93	22,91	240,90	-0,559	323,76	3,17	2,08	9,02E+05	0,17	0,01	27,93	295,82
	10+160,00	3371,54	3369,04	23,79	264,69	-0,644	336,64	3,30	2,08	9,02E+05	0,17	0,01	28,11	308,53
Casa de Máquinas	10+300,00	3356,90	3345,40	141,98	406,68	-0,169	360,28	3,53	2,08	9,02E+05	1,03	0,05	29,20	331,08

## **ANEXO 6**

### **HOJAS DE CÁLCULO DEL DESARROLLO ENERGÉTICO DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

**DISEÑO A NIVEL DE PREFACTIBILIDAD  
DESARROLLO HIDROELECTRICO**

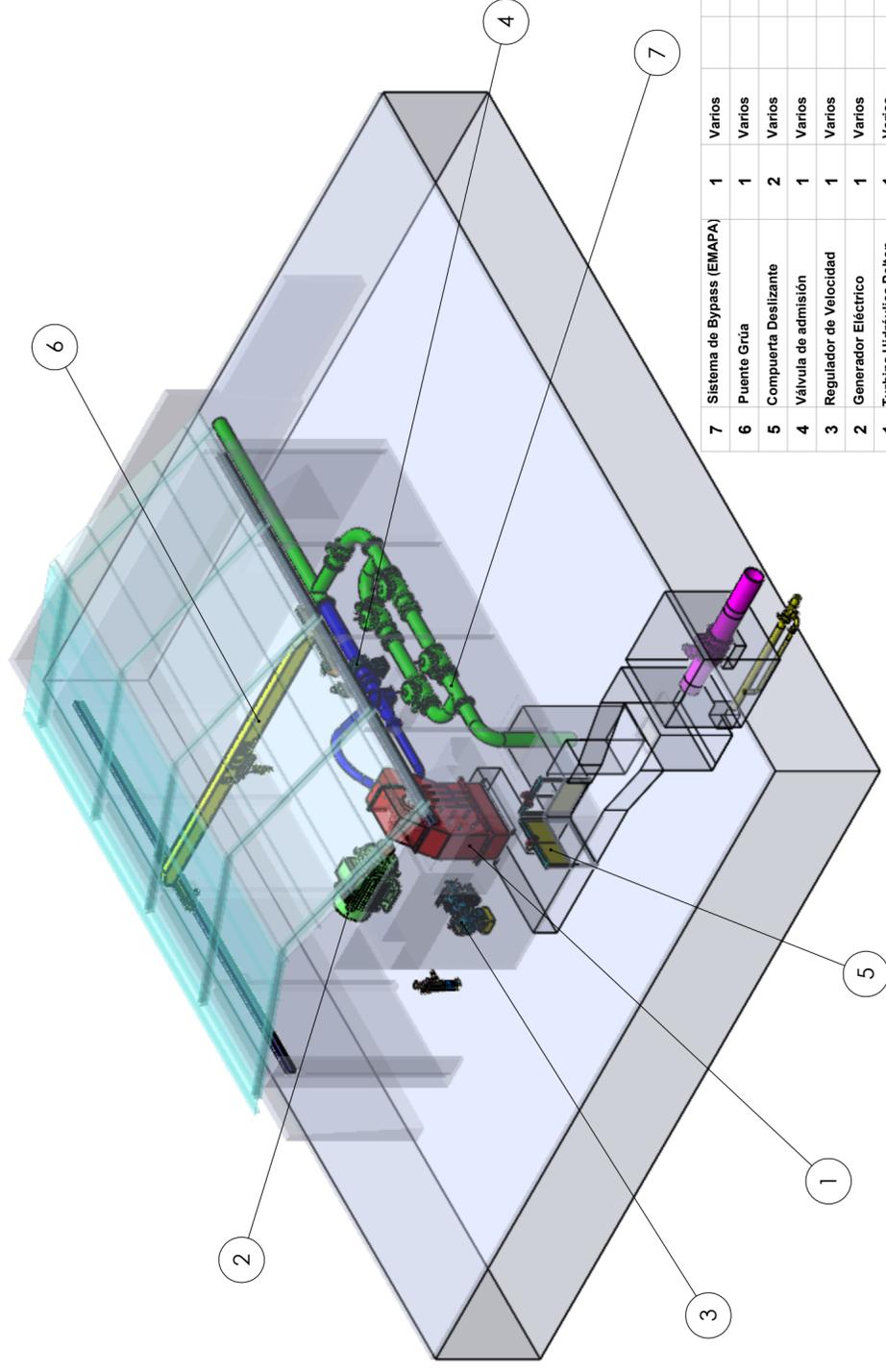
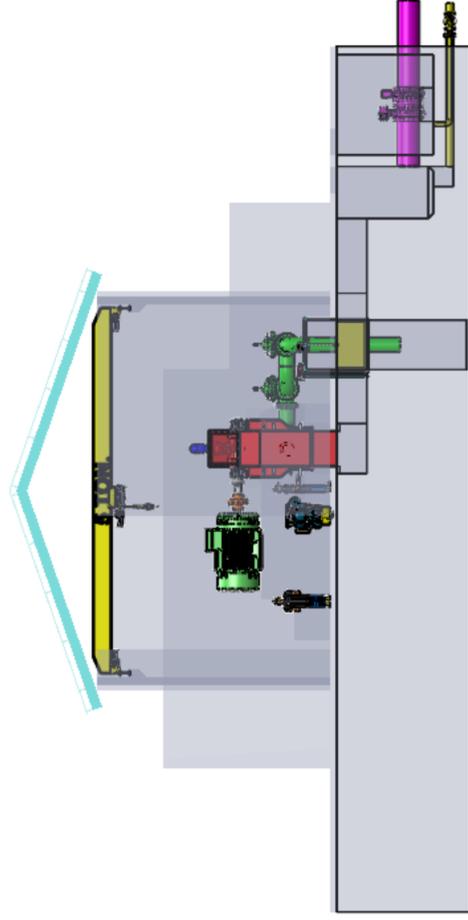
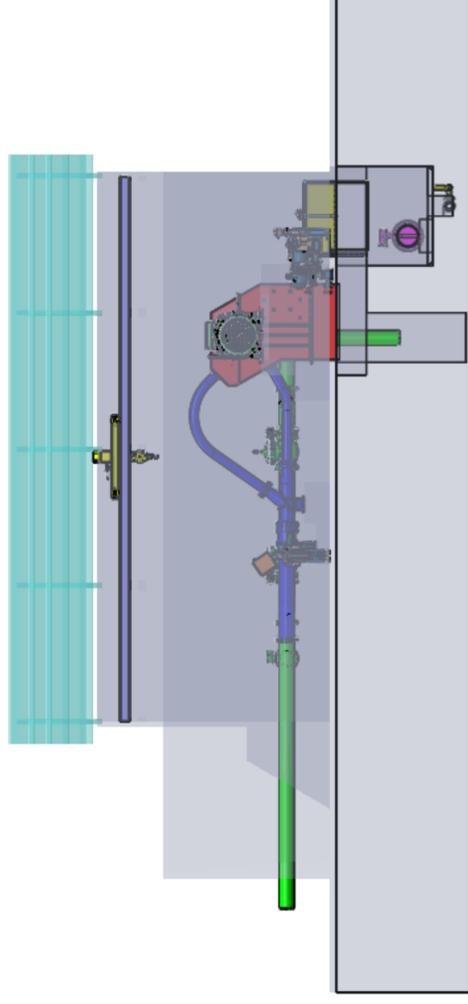
**DATOS GENERALES**

<b>Caudal de Diseño:</b>	0,4	m <sup>3</sup> /s
<b>Presión Estática:</b>	360,28	m
<b>Longitud total de Tubería:</b>	10362,55	m
<b>Rendimiento Total del Sistema:</b>	82,9	%
<b>Factor de Carga de la Central:</b>	0,84	

	Longitud de la tubería		Diámetro exterior de la tubería		Espesor t (mm)	Diámetro interior D (mm)	Área tubo A (m <sup>2</sup> )	Velocidad v (m/s)	Presión estática (m)		Pérdidas de presión ΔH (m)		Potencia (kw)		Energía Producida (MWh/año)
	Parcial (m)	Total (m)	(plg)	(mm)					Parcial	Total	Parcial	Total	Producida	Sin Producir	
<b>Tramo B-1</b>	995,88	10362,55	23,9	608,00	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	26,09	29,20	1075,91	94,98	7920,83	
<b>Tramo B-2</b>	406,68		19,8	502,30	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40	3,11					

## **ANEXO 7**

### **DISTRIBUCIÓN TRIDIMENSIONAL DEL EQUIPO ELECTROMECAÁNICO DENTRO DE LA CASA DE MÁQUINAS**



No. ORD.	DENOMINACION	CANTIDAD	MATERIAL	PESO (N)	OBSERVACION
7	Sistema de Bypass (EMAPA)	1	Varios		
6	Puente Grúa	1	Varios		
5	Compuerta Deslizante	2	Varios		
4	Válvula de admisión	1	Varios		
3	Regulador de Velocidad	1	Varios		
2	Generador Eléctrico	1	Varios		
1	Turbina Hidráulica Pelton	1	Varios		

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**

Diseño de un sistema para el aprovechamiento de la energía hidráulica

ESCALA: 1:150  
DIBUJO: O.B.A.L.  
FECHA: NOV. 2013

ING. OSCAR ARTEAGA L.

**CONTENIDO:**  
**EQUIPAMIENTO ELECTROMECÁNICO DE LA CASA DE MÁQUINAS**

RESPONSABLE: APROBADO: LAMINA: PEM-01-R02  
ING. OSCAR ARTEAGA PHD. GUSTAVO RODRIGUEZ, OA-PEM-01-R02

## **ANEXO 8**

**HOJAS DE CÁLCULO DEL PRESUPUESTO DE INVERSIONES  
REFERENCIAL DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA PROPUESTA**

**PRESUPUESTO REFERENCIAL CENTRAL HIDROELÉCTRICA  
COSTOS Y GASTOS**

Nº	DESCRIPCIÓN DEL RUBRO	CANTIDAD	UNIDAD	V. UNITARIO	V. TOTAL
<b>CASA DE MAQUINAS</b>					
<b>OBRA CIVIL</b>					
1	Replanteo de ejes con equipo topográfico	190,24	m <sup>2</sup>	0,98	186,44
2	Excavación manual inc. desalojo sobrantes	38,80	m <sup>3</sup>	7,53	292,16
3	Relleno compactado con suelo propio, en capas	31,90	m <sup>3</sup>	7,94	253,29
4	Replanteo de H.S. f'c=140 kg/cm2, e=5 cm	0,72	m <sup>3</sup>	111,34	80,16
5	Plintos de hormigón estructural f'c=210 kg/cm2	4,32	m <sup>3</sup>	127,63	551,36
6	Cimientos de hormigón ciclópeo 60% H.S. f'c=180 kg/cm2	8,44	m <sup>3</sup>	93,93	792,77
7	Hormigón estructural en cadenas f'c=210 kg/cm2, inc. encofrado	2,11	m <sup>3</sup>	187,38	395,37
8	Hormigón estructural en columnas f'c=210 kg/cm2 inc. encofrado	11,04	m <sup>3</sup>	217,87	2.405,28
9	Hormigón estructural en vigas f'c=210 kg/cm2 inc. encofrado	5,28	m <sup>3</sup>	201,78	1.065,40
10	Acero de refuerzo	3.070,00	kg	2,09	6.416,30
11	Estructura metálica perfiles A36	6.232,00	kg	3,49	21.749,68
12	Cubierta de galvanume e=0.45 mm	246,40	m <sup>2</sup>	11,46	2.823,74
13	Piso H.S. f'c=210 kg/cm2 e=15 cm inc. sub base e=15 cm y malla	188,70	m <sup>2</sup>	31,20	5.887,44
14	Mampostería de bloque de hormigón visto e=20 cm	330,80	m <sup>2</sup>	15,41	5.097,63
15	Ventanas de perfil de acero + vidrio claro 4 mm	30,40	m <sup>2</sup>	50,55	1.536,72
16	Puerta metálica corrediza 3.70x6.00 m	1,00	u	1.310,59	1.310,59
17	Riostras de H.A. f'c=210 kg/cm2, 20x20 cm	51,20	ml	26,58	1.360,90
				<b>SUBTOTAL 1:</b>	<b>52.205,23</b>
<b>OBRAS EXTERIORES</b>					
18	Vía de Acceso	1,00	km	50.000,00	50.000,00
19	Compra del Predio	0,50	Ha	25.000,00	12.500,00
21	Desbanque a cielo abierto suelo sin clasificar	6.123,20	m <sup>3</sup>	3,58	21.921,06
22	Excavación manual inc. desalojo sobrantes	48,60	m <sup>3</sup>	7,53	365,96
23	Relleno compactado con suelo propio, en capas	30,20	m <sup>3</sup>	7,94	239,79
24	Hormigón en cimentaciones de maquinaria y muros f'c=280 kg/cm2	120,90	m <sup>3</sup>	149,80	18.110,82
25	Hormigón simple en canales y tanques f'c=280 kg/cm2 inc. encofrado	53,92	m <sup>3</sup>	208,85	11.261,19
26	Hormigón simple en muros de contención f'c=280 kg/cm2 inc. encofrado	94,65	m <sup>3</sup>	248,84	23.552,71
27	Acero de refuerzo	16.351,00	kg	2,09	34.173,59
28	Cinta SIKA PVC en juntas constructivas	36,00	ml	10,58	380,88
29	Placas de neopreno e=5 cm para anclaje de maquinarias	24,00	m <sup>2</sup>	1.602,52	38.460,48
30	Malla electrosoldada 150x150x8	214,00	m <sup>2</sup>	8,16	1.746,24
31	Malla electrosoldada 150x150x6	103,00	m <sup>2</sup>	4,98	512,94
				<b>SUBTOTAL 2:</b>	<b>213.225,65</b>
<b>EQUIPOS ELECTROMECÁNICOS</b>					
32	Turbina Hidraulica Pelton	1,00	u	494.657,00	494.657,00
33	Tgenerador Electrico	1,00	u	101.529,00	101.529,00
34	Sistema de Regulacion de la Turbina	1,00	u	59.073,00	59.073,00
35	Valvula Esferica de Admision	1,00	u	63.895,00	63.895,00
36	Compuerta Deslizante	1,00	u	10.637,00	10.637,00
37	Puente Grua	1,00	u	35.765,00	35.765,00
				<b>SUBTOTAL 3:</b>	<b>765.556,00</b>
				<b>TOTAL 1:</b>	<b>1.030.986,88</b>
<b>VIVIENDA DE GUARDIAN Y CASA DE CONTROLES</b>					
<b>OBRA CIVIL</b>					
38	Replanteo de ejes con equipo topográfico	42,81	m <sup>2</sup>	0,98	41,95
39	Excavación manual inc. desalojo sobrantes	13,60	m <sup>3</sup>	7,53	102,41
40	Relleno compactado con suelo propio, en capas	4,30	m <sup>3</sup>	7,94	34,14
41	Replanteo de H.S. f'c=140 kg/cm2, e=5 cm	0,40	m <sup>3</sup>	111,34	44,54
42	Plintos de hormigón estructural f'c=210 kg/cm2	2,40	m <sup>3</sup>	127,63	306,31
43	Cimientos de hormigón ciclópeo 60% H.S. f'c=180 kg/cm2	5,75	m <sup>3</sup>	93,93	540,10
44	Hormigón estructural en cadenas f'c=210 kg/cm2, inc. encofrado	1,44	m <sup>3</sup>	187,38	269,83
45	Hormigón estructural en columnas f'c=210 kg/cm2 inc. encofrado	4,94	m <sup>3</sup>	217,87	1.076,28
46	Hormigón estructural en vigas f'c=210 kg/cm2 inc. encofrado	4,32	m <sup>3</sup>	201,78	871,69
47	Losa alivianada H.S. f'c=210 kg/cm2 e=20 cm	66,90	m <sup>2</sup>	25,96	1.736,72
48	Hormigón estructural en gradas f'c=210 kg/cm2 inc. encofrado	1,85	m <sup>3</sup>	230,47	426,37
49	Acero de refuerzo	2.328,09	kg	2,09	4.865,71
50	Piso H.S. f'c=210 kg/cm2 e=15 cm inc. sub base e=15 cm y malla	38,85	m <sup>2</sup>	31,20	1.212,12
51	Mampostería de bloque de hormigón visto e=20 cm	155,13	m <sup>2</sup>	15,41	2.390,55
52	Masillado paletado de pisos y losa de cubierta	125,30	m <sup>2</sup>	6,06	759,32
53	Enlucido horizontal paletado fino esponjeado	92,00	m <sup>2</sup>	6,92	636,64
54	Enlucido vertical paletado fino esponjeado	310,00	m <sup>2</sup>	6,37	1.974,70
55	Enlucido de filos y fajas	26,00	m	2,62	68,12
56	Piso baldosa cerámica antideslizante	20,20	m <sup>2</sup>	21,79	440,16
57	Revestimiento baldosa cerámica en paredes	21,48	m <sup>2</sup>	19,38	416,28
58	Piso de media duela lacado	14,70	m <sup>2</sup>	34,99	514,35
59	Pintura latex vinyl acrílica en paredes incluye empaste	380,50	m <sup>2</sup>	2,80	1.065,40
60	Ventanas perfil metálico + protección + vidrio 4 mm	22,13	m <sup>2</sup>	51,34	1.136,15
61	Puerta panelada madera 0.70 x2.10 m, lacada 3 manos, incl. cerradura	2,00	u	142,43	284,86
62	Puerta panelada madera 0.90x2.10 m, lacada 3 manos, incl. cerradura	3,00	u	176,58	529,74
63	Mesón de cocina H.A. e=6 cm, a= 0,60 cm	2,70	m	13,81	37,29
64	Inodoro color blanco (incluye accesorios)	2,00	u	98,23	196,46
65	Lavamanos de pared , color blanco (incluye grifería)	2,00	u	60,32	120,64
66	Fregadero acero inoxidable 1 pozo y escurridor, incluye grifería	1,00	u	112,00	112,00
67	Ducha eléctrica	1,00	u	63,96	63,96
68	Llave de pico para manguera	1,00	u	13,35	13,35
69	Desague de PVC Ø 110 mm	2,00	pto	35,09	70,18
70	Desague de PVC Ø 75 mm	4,00	pto	27,94	111,76
71	Desague de PVC Ø 50 mm	7,00	pto	21,52	150,64
72	Bajante de PVC Ø 110 mm	20,00	m	7,67	153,40
73	Canalización tubería de PVC Ø 110 mm, inc. excavación y relleno	26,00	m	9,73	252,98
74	Caja revisión 60x60 cm, tapa de H.A. inc. excavación y relleno	3,00	u	74,35	223,05
75	Tubería de ventilación de PVC Ø 75 mm	15,00	m	5,51	82,65
76	Rejilla de aluminio para pisos Ø 2"	4,00	u	6,72	26,88
77	Rejilla tipo cúpula para pisos Ø 3"	4,00	u	19,46	77,84
78	Salida de agua potable Ø 1/2", PVC roscable	6,00	pto	17,00	102,00
79	Red de agua potable Ø 1/2", PVC presión	24,00	m	4,23	101,52
80	Salidas de iluminación	16,00	pto	22,12	353,92
81	Salidas de tomacorriente	21,00	pto	24,99	524,79
82	Caja de control eléctrico 2 breakers	2,00	u	50,04	100,08
83	Puerta metálica tol 1.2 mm y tubo rectangular 25x50 mm	7,20	m <sup>2</sup>	101,17	728,42
				<b>SUBTOTAL 1:</b>	<b>25.348,26</b>
				<b>TOTAL 2:</b>	<b>25.348,26</b>

SUB - ESTACIÓN					
<b>OBRA CIVIL</b>					
84	Sistema de Drenaje (Excavación, desalojo, tubería PVC 160mm2 con accesorios, cajas de revisión, material granular, rejillas, cunetas)	1,00	global	25000	25000
85	Canalización Eléctrica (tuberías de PVC 160mm2 de tipo liviano con cajas de revisión de 1x1x1,5m)	1,00	global	12000	12000
87	Pozo Septico	1,00	global	1.500,00	1.500,00
88	Muros de contención	1,00	global	3.500,00	3.500,00
89	Cerramiento exterior cadena H.A, mampostería y malla galvanizada h=2.50 m	32,00	ml	71,85	2.299,20
90	Base de material pétreo e=0.08 m	87,00	m <sup>2</sup>	3,54	307,98
91	Bases de hormigón simple f'c=210 kg/cm2	3,80	m <sup>3</sup>	154,03	585,31
92	Puerta peatonal malla y tubo galvanizado 1.50x2.10 m	1,00	u	208,58	208,58
93	Puerta principal malla y tubo galvanizado 3.00x2.50 m	1,00	u	460,86	460,86
94	Bordillos de hormigón simple f'c=210 kg/cm2, 15x40 cm	32,00	ml	14,65	468,80
95	Aceras de hormigón simple f'c=210 kg/cm2, e=7 cm sobre sub base e=15 cm	26,00	m <sup>2</sup>	16,29	423,54
				<b>SUBTOTAL 1:</b>	<b>46.754,27</b>
<b>OBRAS ELÉCTRICAS</b>					
97	MALLA DE TIERRA	1,00	u	2.302,00	2.302,00
98	EQUIPOS DE PATIO (TRAFO-INTERRUPTOR-TRAFO MIX)	1,00	u	131.283,00	131.283,00
99	MONTAJE DE TABLERO Y CABLEADO	1,00	u	49.134,00	49.134,00
100	MONTAJE CABLES DE FUERZA	1,00	u	33987,00	33.987,00
101	COMUNICACIONES, CALIBRACIONES, PRUEBAS	1,00	u	7452,00	7.452,00
102	MONTAJE ESTRUCTURAS, ALUMBRADO PUBLICO, APANTALLAMIENTO	1,00	u	5664,00	5.664,00
103	MONTAJE CARGADOR, BANCO DE BATERIAS, S. AUXILIARES	1,00	u	37.743,00	37.743,00
				<b>SUBTOTAL 2:</b>	<b>267.565,00</b>
				<b>TOTAL 3:</b>	<b>314.319,27</b>
LÍNEA DE TRANSMISION					
<b>OBRAS ELÉCTRICAS</b>					
104	EST. 13 KV 3F CENTRADA ANGULAR - 3CAT	10,00	u	305,03	3.050,26
105	EST. 13 KV 3F CENTRADA DOBLE RETENCIÓN - 3CDT	18,00	u	512,35	9.222,32
106	EST. 13 KV 3F CENTRADA PASANTE - 3CPT	69,00	u	172,08	11.873,44
107	EST. 13 KV 3F CENTRADA RETENCIÓN - 3CRT	7,00	u	355,71	2.489,99
108	EST. 13 KV 3F EN VOLADO PASANTE - 3VPT	24,00	u	175,88	4.221,00
109	EST. 13 KV 1F CENTRADA ANGULAR - 1CAT	1,00	u	50,52	50,52
110	EST. 13 KV 1F CENTRADA PASANTE - 1CPT	5,00	u	42,63	213,17
111	EST. 13 KV 1F RETENCIÓN O TERMINAL - 1CRT	14,00	u	59,41	831,70
112	EST. 0V 1 VÍA. VERTICAL PASANTE O ANGULAR - 1EP	110,00	u	24,83	2.731,39
113	EST. 0V 1 VÍA. VERTICAL RETENCIÓN - 1ER	16,00	u	25,53	408,49
114	EST. 240V 3 VÍAS VERTICAL PASANTE - 3EP	16,00	u	60,24	963,92
115	EST. 240V 3 VÍAS VERTICAL RETENCIÓN - 3ER	7,00	u	62,34	436,41
116	TENSOR A TIERRA DOBLE EN REDES DE DIST. 13 KV - TTDT	110,00	u	101,89	11.208,39
117	TENSOR A TIERRA SIMPLE EN REDES DE DIST. 13 KV	70,00	u	59,74	4.182,04
118	TENSOR A TIERRA SIMPLE EN REDES DE DIST. 240/120 V - TTSD	2,00	u	75,82	151,63
119	PROTECCIÓN 13KV 3F CON DESCARGADOR 10KV - 3P10T	1,00	u	318,00	318,00
120	SECC. 13KV 3F CON SECCIONADOR FUS. UNIPOLAR AB. 100A - 3S100	2,00	u	625,77	1.251,54
121	SECC. 13KV 3F CON SECCIONADOR DE CUCHILLA 200A - 3C200T	2,00	u	603,97	1.207,93
122	SECC. 13KV 1F CON SECCIONADOR FUS. UNIPOLAR AB. 100A-1S100	3,00	u	229,84	689,51
123	POSTE HORMIGÓN ARMADO CIRCULAR DE 12M CARGA DE ROTURA 500KG	169,00	u	385,08	65.078,44
124	CONDUCTOR ACSR #2/0 AWG	38.800,00	m	2,09	80.986,46
125	CONDUCTOR ACSR # 1/0 AWG	14.400,00	m	1,53	22.010,49
126	CABLE AL. AISLADO 2*1/0+(1/0) AWG XLPE	1.000,00	m	3,89	3.885,05
127	PUESTA A TIERRA	1,00	u	62,14	62,14
128	EST. 0V 1 VÍA. VERTICAL DOBLE RETENCIÓN - 1ED	19,00	u	41,98	797,69
129	RECONOCIMIENTO, REPLANTEO E INVENTARIO	10,00	km	104,25	1.042,47
130	DESBROCE DE LINEAS	3,00	km	555,98	1.667,95
131	EST. 13 KV 1F CENTRADA DOBLE RETENCIÓN - 1CDT	12,00	u	142,87	1.714,46
132	EST. 13 KV 3F EN VOLADO ANGULAR -3VAT	4,00	u	301,29	1.205,18
133	EST. 13 KV 3F EN DOS POSTES PASANTE -3HPT	3,00	u	300,87	902,61
134	EST. 13 KV 3F EN DOS POSTES DOBLE RETENSION - 3HDT	12,00	u	566,29	6.795,46
135	TENSOR FAROL DOBLE EN REDES DE DIST. 13 KV - TFDT	5,00	u	133,09	665,47
136	POSTE PLÁSTICO FIBRA DE VIDRIO CIRCULAR DE 12M CARGA DE ROTURA 500KG	29,00	u	107,32	3.112,29
137	EST. 240V 3 VÍAS VERTICAL DOBLE RETENCIÓN - 3ED	3,00	u	107,32	321,96
				<b>SUBTOTAL 1:</b>	<b>245.749,80</b>
<b>MANO DE OBRA DE MONTAJE</b>					
138	EST. 13 KV 1F CENTRADA ANGULAR - 1CAT	5,00	u	7,81	39,04
139	EST. 13 KV 1F CENTRADA DOBLE RETENCIÓN - 1CDT	3,00	u	9,76	29,28
140	EST. 13 KV 1F CENTRADA PASANTE - 1CPT	8,00	u	7,81	62,47
141	EST. 13 KV 1F RETENCIÓN O TERMINAL - 1CRT	22,00	u	9,76	214,73
142	EST. 13 KV 1F EN VOLADO PASANTE - 1VPT	2,00	u	13,01	26,03
143	EST. 13 KV 3F CENTRADA PASANTE - 3CPT	1,00	u	9,76	9,76
144	EST. 13 KV 3F CENTRADA RETENCIÓN - 3CRT	1,00	u	20,50	20,50
145	EST. 0V 1 VÍA. VERTICAL PASANTE O ANGULAR - 1EP	4,00	u	5,21	20,82
146	EST. 0V 1 VÍA. VERTICAL RETENCIÓN - 1ER	18,00	u	5,21	93,70
147	EST. 240V PREENSAMBLADO RETENCIÓN CON 3 CONDUCT - 1PR3	1,00	u	5,21	5,21
148	EST. 240V 3 VÍAS VERTICAL DOBLE RETENCIÓN - 3ED	1,00	u	9,96	9,96
149	EST. 240V 3 VÍAS VERTICAL PASANTE - 3EP	17,00	u	7,81	132,74
150	EST. 240V 3 VÍAS VERTICAL RETENCIÓN - 3ER	7,00	u	7,81	54,66
151	TRANSFORMADOR 13 KV 1F AUTOPROTEG. 3 - 15 KVA EN POSTE	5,00	u	66,08	330,38
152	LUM. 240 V NA 70 - 100 W EN POSTE CON RED AEREA	18,00	u	6,51	117,13
153	SECC. 13KV 1F CON SECCIONADOR FUS. UNIPOLAR AB. 100A-1S100	5,00	u	9,76	48,80
154	TENSOR A TIERRA SIMPLE EN REDES DE DIST. 240/120 V - TTSD	7,00	u	16,27	113,87
155	TENSOR A TIERRA SIMPLE EN REDES DE DIST. 13 KV - TTST	10,00	u	16,27	162,68
156	TENSOR POSTE A POSTE SIMPLE EN REDES DE DIST. 13 KV	1,00	u	16,27	16,27
157	POSTE HORMIGÓN ARMADO CIRCULAR DE 9 - 11 M	32,00	u	28,32	906,19
158	POSTE DE MADERA DE 9 - 11 M	10,00	u	22,65	226,55
159	CONDUCTOR ACSR #2 AWG	1.700,00	m	0,08	143,80
160	CONDUCTOR ACSR # 1/0 AWG	3.000,00	m	0,08	253,77
161	CONDUCTOR ACSR # 2/0 AWG	100,00	m	0,09	9,11
162	ACOMETIDAS	65,00	u	6,51	422,96
				<b>SUBTOTAL 2:</b>	<b>3.470,41</b>
				<b>TOTAL 4:</b>	<b>249.220,20</b>
<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS:</b>					
<b>1.619.874,62</b>					
<b>LÓGISTICA E IMPREVISTOS</b>					
Ingeniería y Administración General de Obra	1.619.874,62			5%	80.993,73
Fiscalización	1.619.874,62			4%	64.794,98
Imprevistos de Generales	1.619.874,62			10%	161.987,46
<b>TOTAL LÓGISTICA E IMPREVISTOS</b>					
<b>307.776,18</b>					
<b>TOTAL COSTO DEL PROYECTO:</b>					
<b>1.927.650,79</b>					

## **ANEXO 9**

**HOJAS DE CÁLCULO DE LA POTENCIA ÚTIL GENERADA PARA LOS  
DIFERENTES CAUDALES MEDIDOS**

POTENCIA ÚTIL GENERADA PARA LOS DIFERENTES CAUDALES MEDIDOS

DATOS GENERALES

Longitud tubería Tramo 1:	9955,88	m
Longitud tubería Tramo 2:	406,68	m
Longitud total de tubería:	10362,55	m
Rendimiento total del sistema	82,9	%
Factor de carga de la central:	0,84	

		Espesor	Diámetro interior	Área tubo	Velocidad	Presión estática (m)		Pérdidas de presión ΔH (m)		Potencia (kW)		Energía Producida (MWh/año)
						Parcial	Total	Parcial	Total	Producida	Sin Producir	
1	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1071,87	94,63	7887,26
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
2	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,40	189,88	360,28	26,09	29,20	1065,42	94,06	7839,76
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,06	170,40		3,11				
3	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,38	189,88	360,28	26,09	29,20	1046,32	92,37	7699,24
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,02	170,40		3,11				
4	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1077,52	95,13	7928,83
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
5	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1072,41	94,68	7891,22
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
6	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1079,13	95,27	7940,70
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
7	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,43	189,88	360,28	26,09	29,20	1087,47	96,01	8002,06
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,10	170,40		3,11				
8	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1078,33	95,20	7934,77
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
9	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1074,29	94,84	7905,08
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
10	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,40	189,88	360,28	26,09	29,20	1065,95	94,11	7843,72
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,06	170,40		3,11				
11	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,39	189,88	360,28	26,09	29,20	1055,46	93,18	7766,53
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,04	170,40		3,11				
12	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1072,41	94,68	7891,22
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
13	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1079,94	95,34	7946,64
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
14	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1083,44	95,65	7972,37
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
15	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1069,72	94,44	7871,43
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,06	170,40		3,11				
16	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1073,75	94,79	7901,12
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
17	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1078,87	95,25	7938,72
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
18	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1071,33	94,58	7883,31
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
19	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1075,64	94,96	7914,97
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
20	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,40	189,88	360,28	26,09	29,20	1066,76	94,18	7849,66
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,06	170,40		3,11				
21	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1082,09	95,53	7962,47
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
22	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,43	189,88	360,28	26,09	29,20	1089,62	96,20	8017,89
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,10	170,40		3,11				
23	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1081,82	95,51	7960,50
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
24	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1073,75	94,79	7901,12
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
25	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1071,33	94,58	7883,31
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
26	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,34	189,88	360,28	26,09	29,20	1021,30	90,16	7515,17
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	1,97	170,40		3,11				

27	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1074,56	94,87	7907,06
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
28	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1070,26	94,49	7875,39
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
29	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1068,91	94,37	7865,49
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,06	170,40		3,11				
30	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1082,36	95,55	7964,45
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
31	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1078,06	95,17	7932,79
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
32	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,44	189,88	360,28	26,09	29,20	1093,12	96,50	8043,62
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,11	170,40		3,11				
33	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1071,87	94,63	7887,26
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
34	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,43	189,88	360,28	26,09	29,20	1085,59	95,84	7988,21
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
35	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,43	189,88	360,28	26,09	29,20	1084,51	95,74	7980,29
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
36	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1081,56	95,48	7958,52
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
37	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1077,52	95,13	7928,83
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
38	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1075,91	94,98	7916,95
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
39	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1081,56	95,48	7958,52
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
40	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1073,75	94,79	7901,12
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
41	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1071,87	94,63	7887,26
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
42	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,43	189,88	360,28	26,09	29,20	1084,51	95,74	7980,29
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
43	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1082,90	95,60	7968,41
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
44	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1079,67	95,32	7944,66
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
45	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1070,26	94,49	7875,39
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				
46	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,50	189,88	360,28	26,09	29,20	1144,50	101,04	8421,66
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,21	170,40		3,11				
47	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,43	189,88	360,28	26,09	29,20	1083,98	95,70	7976,33
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
48	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,43	189,88	360,28	26,09	29,20	1084,78	95,77	7982,27
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,09	170,40		3,11				
49	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,42	189,88	360,28	26,09	29,20	1079,94	95,34	7946,64
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,08	170,40		3,11				
50	Tramo B-1	8,00	600,00	0,283	1,41	189,88	360,28	26,09	29,20	1074,83	94,89	7909,04
	Tramo B-2	7,00	495,30	0,193	2,07	170,40		3,11				