

**DISEÑO DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN LA LOCALIDAD DE  
USME, BOGOTÁ.**

**ANGIE MILENA TRUJILLO GUAYARA**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D. C.,  
2017**

**DISEÑO DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN LA LOCALIDAD DE  
USME, BOGOTÁ.**

**ANGIE MILENA TRUJILLO GUAYARA**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**ASESOR  
HENRY ALBERTO CÓRDOBA ROMERO  
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.  
FACULTAD DE INGENIERÍA.  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL.  
BOGOTÁ D.C  
2017**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del Docente Asesor

Bogotá D.C. 10 de noviembre 2017.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por sus todas sus bendiciones a lo largo de mi vida, y en especial en esta carrera.

A mi padre Rodrigo Trujillo y a mi madre Gloria Guayara por sus consejos y apoyo incondicional para seguir adelante por el buen camino sin importar las dificultades. A mi hermana Ximena, por ser mi mayor motivación para levantarme todos los días.

Al ingeniero Henry Córdoba por su asesoría y palabras de aliento para la realización de este trabajo.

A la fundación Monseñor Emilio de Brigard por su confianza para obtener una carrera profesional.

A mis familiares y amigos quienes directa o indirectamente me favorecieron en el proceso de conseguir mi título profesional y en la formación como persona.

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. ANTECEDENTES.....	13
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
4. OBJETIVOS .....	16
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5. JUSTIFICACIÓN.....	17
6. ALCANCE Y DELIMITACIÓN .....	18
7. MARCO DE REFERENCIA.....	19
7.1 MARCO CONCEPTUAL.....	19
7.2 MARCO TEÓRICO .....	20
7.2.1 Calidad de vida en la localidad de Usme .....	20
7.2.2 Recursos naturales y energías renovables.....	22
7.2.3 Hidroenergía (energía hidráulica) .....	22
7.3 Referencias cronológicas de las PCH .....	27
7.4 MARCO LEGAL.....	30
7.5 ESTADO DEL ARTE .....	31
8. DESCRIPCIÓN GENERAL Y PARÁMETROS DE CÁLCULO .....	33
8.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	33
8.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO .....	34
8.3 EVALUACIÓN TOPOGRÁFICA.....	36
8.4 EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO .....	37
8.5 REQUERIMIENTO ENERGÉTICO .....	41
9. CÁLCULO DE OBRAS CIVILES.....	43
9.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL AGUA.....	43
9.2 SISTEMA DE CAPTACIÓN .....	43
9.2.1 Diseño de la derivación .....	43
9.3 SISTEMA DE CONDUCCIÓN. ....	47

9.3.1 Tipo y propiedades del suelo.....	47
9.3.2 Diseño del canal.....	48
9.4 CÁLCULO DE LA COMPUERTA DEL CANAL PRINCIPAL. ....	51
9.4.1 Cálculo del espesor de la compuerta del canal principal .....	51
9.4.2 Mecanismo de elevación de la compuerta del canal principal.....	53
9.5 CÁLCULO DE LA COMPUERTA DEL CANAL DE DERIVACIÓN. ....	54
9.5.1 Calculo del espesor de la compuerta del canal de derivación .....	54
9.5.2 Mecanismo de elevación de la compuerta del canal de derivación.....	55
9.6 DIMENSIONAMIENTO DEL DESARENADOR CON CÁMARA DE CARGA	55
9.6.1 Dimensionamiento de la cámara de carga.....	59
9.6.2 Calculo de las paredes de la cámara y el desarenador. ....	62
9.6.3 Espesor de la pared de la cámara de carga y desarenador.....	62
9.6.4 Calculo de la compuerta del desarenador. ....	62
9.6.5 Vertedero del desarenador .....	63
9.7 TUBERÍA DE PRESIÓN .....	64
9.7.1 Calculo del diámetro interno de la tubería de presión .....	64
9.7.2. Calculo de la velocidad del agua. ....	65
9.7.3. Calculo de pérdidas en la tubería de presión.....	66
9.8 SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE DERIVACIÓN .....	72
9.9 CASA DE MÁQUINAS.....	73
9.10 CANAL DE DESCARGA.....	74
9.10.1 Espesor del canal de derivación.....	75
9.11 PROTOCOLO DEL SISTEMA DE COMPUERTAS .....	75
10. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA .....	78
10.1. POTENCIA NOMINAL DE LA TURBINA. ....	78
10.2 POTENCIA MÍNIMA DE LA TURBINA.....	78
10.3 DIÁMETRO DEL RODETE DE LA TURBINA. ....	79
10.4 VELOCIDAD NOMINAL DE GIRO.....	81
10.5 VELOCIDAD SINCRÓNICA.....	81
10.6. VELOCIDAD DE EMBALAJE. ....	83

10.7 VELOCIDAD ESPECÍFICA DE LA TURBINA. ....	83
10.8 DIMENSIONES DE LA TURBINA.....	84
11. GENERACIÓN, TRANSMISIÓN Y CONTROL DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	86
11.1 SISTEMA DE GENERACIÓN .....	86
11.1.1 Selección del sistema generador.....	86
11.1.2 Tipos de generadores.....	87
11.1.3 Disposición del generador con respecto a la turbina .....	88
11.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN .....	88
11.2.1 Elementos de un sistema de transmisión de potencia mecánica .....	88
11.2.3 Comparación entre sistemas de transmisión .....	90
11.3 SISTEMA DE CONTROL .....	91
11.3.1 Regulación de velocidad por medio del caudal de agua en la turbina..	92
11.3.2 Regulación de velocidad por regulación de carga .....	92
12. COSTOS .....	94
13. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	96
14. CONCLUSIONES .....	98
15. RECOMENDACIONES.....	99
BIBLIOGRAFÍA.....	100
ANEXOS .....	104

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de las cotas de aducción y desagüe .....	36
Tabla 2. Cabeza de energía de los puntos .....	37
Tabla 3. Datos medidos en el punto 1.....	38
Tabla 4. Datos medidos en el punto 2.....	38
Tabla 5. Caudal para el punto 1 .....	40
Tabla 6. Caudal para el punto 2.....	40
Tabla 7. Consumo Diario por casa.....	42
Tabla 8. Propiedades del agua .....	43
Tabla 9. Velocidades mínimas recomendadas para evitar sedimentación .....	44
Tabla 10 Velocidad máxima del agua recomendada.....	45
Tabla 11 Elementos geométricos de secciones de canal.....	47
Tabla 12. Coeficiente de rugosidad “n” .....	49
Tabla 13. Talud recomendado para canales de sección trapezoidal .....	50
Tabla 14 Características de la lámina de acero ASTM A-36 .....	52
Tabla 15. Coeficientes de Fricción .....	54
Tabla 16. Velocidades horizontales limites .....	57
Tabla 17. Diámetro comercial de la tubería .....	65
Tabla 18. Coeficiente de rugosidad absoluta .....	67
Tabla 19. Valor del coeficiente k para diversos accesorios .....	69
Tabla 20. Velocidad del agua en la tubería en el punto 2 .....	70
Tabla 21. Perdidas primarias en la tubería en el punto 2 .....	71
Tabla 22. Perdidas secundarias en la tubería en el punto 2.....	71
Tabla 23. Pérdidas Totales en la tubería en el punto 2 .....	71
Tabla 24. Porcentaje de pérdidas en la tubería en el punto 2 .....	72
Tabla 25. Potencia calculada para el punto 1. ....	72
Tabla 26. Potencia calculada para el punto 2. ....	73
Tabla 27. Potencia calculada para el punto 3 .....	73
Tabla 28. Reglas de operación para caudales máximos - pendiente subcrítica ....	77
Tabla 29. Características de las turbinas modelo .....	79
Tabla 30. Tabla para seleccionar el diámetro estándar del rodete .....	81
Tabla 31. Valores aconsejables para el número de pares de polos .....	82
Tabla 32. Valores de las dimensiones de las turbinas Kaplan con respecto al diámetro del rodete (véase Figura 15) .....	84
Tabla 33. Dimensiones de la turbina Kaplan seleccionada .....	85
Tabla 34. Distribución porcentual de la inversión en una PCH.....	94
Tabla 35. Costo total del proyecto .....	95
Tabla 36. Datos medidos en el punto 3.....	116

Tabla 37. Datos medidos en el punto 4.....	116
Tabla 38. Datos medidos en el punto 5.....	117
Tabla 39. Datos medidos en el punto .....	117
Tabla 40. Caudal para el punto 3.....	118
Tabla 41. Caudal para el punto 4.....	118
Tabla 42. Caudal para el punto 5.....	118
Tabla 43. Caudal para el punto 6.....	118
Tabla 44. Dimensiones del canal de derivación para el punto 1 .....	119
Tabla 45. Dimensiones del canal de derivación para el punto 3 .....	119
Tabla 46. Calculo de la presión en las paredes del punto 1 .....	119
Tabla 47. Calculo de la presión en las paredes del punto 3 .....	120
Tabla 48. Espesor de las paredes para el punto 1 .....	120
Tabla 49. Espesor de las paredes para el punto 3.....	120
Tabla 50. Dimensiones del canal de derivación para el punto 1 .....	121
Tabla 51. Dimensiones del canal de derivación para el punto 3 .....	121
Tabla 52. Dimensiones del canal para el punto 1 .....	121
Tabla 53. Dimensiones del canal para el punto 3 .....	121
Tabla 54. Espesor de la compuerta principal para el punto 1.....	122
Tabla 55. Espesor de la compuerta principal para el punto 3.....	122
Tabla 56. Mecanismo de elevación para la compuerta principal en el punto 1 ....	123
Tabla 57. Mecanismo de elevación para la compuerta principal en el punto 3....	123
Tabla 58. Espesor de la compuerta de derivación para el punto 1 .....	123
Tabla 59. Espesor de la compuerta de derivación para el punto 3.....	124
Tabla 60. Mecanismo de elevación para la compuerta de derivación en el punto 1 .....	124
Tabla 61. Mecanismo de elevación para la compuerta de derivación en el punto 3 .....	124
Tabla 62. Cálculos y dimensiones del desarenador en el punto 1 Y 3 .....	125
Tabla 63. Cálculos y dimensiones de la cámara de carga en el punto 1 y 3 .....	126
Tabla 64. Cálculos de las paredes de la cámara de carga y desarenador en el punto 1	126
Tabla 65. Cálculos de las paredes de la cámara de carga y desarenador en el punto 3	127
Tabla 66. Cálculos y dimensiones del vertedero del desarenador en el punto 1 y 3 .....	127
Tabla 67. Diámetro interno de la tubería en el punto 1 y 3.....	128
Tabla 68. Velocidad del agua en la tubería en el punto 1 y 3.....	128
Tabla 69. Perdidas primarias en la tubería en el punto 1 y 3 .....	128
Tabla 70. Perdidas secundarias en la tubería en el punto 1 y 3.....	129
Tabla 71. Pérdidas Totales en la tubería en el punto 1 y 3 .....	129
Tabla 72. Porcentaje de pérdidas en la tubería en el punto 1 y 3.....	129
Tabla 73. Especificaciones papel de filtro .....	132

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del proyecto.....	34
Figura 2. Grafica de consumo de energía en el mes de las casas aledañas.....	34
Figura 3. Grafica del costo mensual de las casas aledañas a la Quebrada Fucha.....	35
Figura 4. Número de habitantes por casa .....	35
Figura 5. Número de aparatos electrónicos en uso por casa .....	35
Figura 6. Número de bombillas en uso por casa .....	36
Figura 7. Esquema de las cotas de aducción y desagüe .....	37
Figura 8. Espesor de la compuerta .....	51
Figura 9. Medidas principales del desarenador.....	57
Figura 10. Características hidrodinámicas de partida y parada brusca .....	60
Figura 11. Coeficiente de Perdidas.....	68
Figura 12. Ubicación de la casa de máquinas.....	74
Figura 13. Esquema de operación con compuertas .....	76
Figura 14. Diagrama para la selección de turbinas hidráulicas .....	80
Figura 15. Modelo de la turbina KAPLAN .....	85
Figura 16. Esquema del sistema generador de energía.....	86
Figura 17. Esquema del sistema de transmisión.....	89

## 1. INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía eléctrica el día de hoy se clasifican de diferentes formas, sin embargo, las más generales son la energía convencional y la energía no convencional, esta última ha sido estudiada e implementada en los últimos tiempos porque son sistemas que generan poco impacto ambiental, lo que las convierte en sistemas amigables con este medio, e incluso favorecen económica y socialmente a las comunidades que implementan dicho sistema de energía. Dentro de estos sistemas se encuentran las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, que generan energía a partir de la captación de agua de pequeños cauces, además las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas se clasifican dependiendo de la capacidad energética, como lo son las Mini Centrales Hidroeléctrica (100 a 1000 kW), Micro Centrales Hidroeléctrica (10 a 100 kW) y Pico Centrales Hidroeléctricas (PCH) (1 a 10 kW) (Torres Quintero).

Este proyecto se desarrolla dentro del marco social de la factibilidad de la implementación de una Pico Central Hidroeléctrica (PCH) en la zona rural de Usme, con la captación de agua de la Quebrada Fucha, para ello se llevaron a cabo actividades como, diagnóstico y verificación de datos de caudal y altura topográfica de la zona, selección de los sistemas adecuados para generar la eficiencia correspondiente, realización de diseño y calculo tanto del sistema hidráulico como del sistema energético, comparación entre los diferentes puntos donde se ubicarían las estructuras teniendo en cuenta la implementación de nuevas tecnologías y ejecución del presupuesto total para la implementación y mantenimiento de a PCH.

Para el desarrollo de estas actividades se realizaron aforos de caudal a lo largo de la quebrada y toma de puntos con GPS en la zona prevista para la instalación de las estructuras, laboratorios sobre la cantidad de sedimentos que tiene la quebrada, e incluso se realizaron encuestas a la comunidad sobre la prestación y consumo del servicio de energía eléctrica. Estas actividades se realizarán teniendo en cuenta la Ley 143 de 1994 la cual menciona que el abastecimiento de electricidad debe realizarse según los criterios económicos y de viabilidad financiera, asegurando un uso racional y eficiente de los diferentes recursos energéticos del país, también la Ley 1715 de 2014 que tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable.

## 2. ANTECEDENTES

Hoy en día se ve evidenciada la demanda de energía eléctrica en todo el mundo y es común encontrar en zonas aisladas de la urbanización la generación de esta energía eléctrica a través de motores DIESEL, siendo esta una gran fuente de contaminación para el medio ambiente, pero lo más inmediato en estas zonas. Sin embargo, las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas son fuentes de energía eléctrica renovable no convencional, por lo que son energías que generan poco impacto negativo al medio ambiente además de su bajo costo en cuanto a la implementación (Guarin Restrepo & Florez Galviz, 2013).

Las Pequeña Centrales Hidroeléctricas se clasifican según la capacidad generada en Mini Centrales Hidroeléctricas, Micro Centrales Hidroeléctrica y Pico Centrales Hidroeléctricas (PCH) (Torres Quintero), siendo esta última la más usada en sectores con poca demanda eléctrica y en la cual nos vamos enfocar para el desarrollo de este trabajo.

En el potencial hidráulico para 1991, Colombia se ubicaba en una sexta posición mundial, con 118 GW para 351 ríos inventariados del cual, el 79% es aprovechable para proyectos de más de 100 MW, el 17% para centrales medianas (10 MW) y un 5% para PCH, es decir, 5,9 GW. Y respecto al potencial total instalado en Colombia, el 64% de la energía eléctrica, 13,4 GW, proviene de centrales hidroeléctricas, de los cuales para el año 2005 el 7% correspondía a producción por pequeña generación PCH (Sierra Vargas, Sierra Alarcon, & Guerrero Fajardo, 2011)

Respecto a la energía eléctrica en Bogotá encontramos que una fuente de energía se obtiene a partir de 4 fases: Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización de energía eléctrica, son muchas las empresas que se encargan de estas etapas, siendo Codensa S.A la que representa la mayor cobertura en el Distrito Capital, lo que quiere decir que la mayoría de habitantes de Bogotá, se benefician de este servicio a través de la energía eléctrica producida a partir de las grandes centrales hidroeléctricas (Energía de Bogotá, s.f.)

Sin embargo, algunos habitantes o empresas utilizan otras fuentes de energía eléctrica como son la energía solar, algunos ejemplos son El Colegio Distrital Ramón Jimeno, en el cual el Distrito invirtió 480 millones de pesos y gracias a la instalación de paneles solares funciona autónomamente generando cerca de 21,62 KV, dejando de emitir cerca de 22 toneladas de CO<sub>2</sub> y ahorrando 71 por ciento en el consumo mensual del servicio gracias a su nueva iluminación LED (El Tiempo, La Energía Natural Que Mueve al Mundo, 2015); también, los parques La Virgen (Chapinero) y Cuatro Caminos (Usme) en los cuales se instalaron 10 paneles solares que buscan mejorar la iluminación, estas luces serán alimentadas

con un 'sistema fotovoltaico' a base de paneles solares, que se convierten en una solución económica y ecológica para la ciudad (Cívico, 2017)

Incluso algunos habitantes de Bogotá han optado por utilizar la energía de biomasa, uno de los proyectos que se desarrolla es "Energías limpias para el Jardín", el cual fue implementado en el Jardín Botánico José Celestino Mutis, donde la meta es que con las dos toneladas diarias que produce el jardín botánico al podar y arreglar sus más de 20 mil árboles, se genere el 30% de la energía que gastan todas las dependencias que allí funcionan. El proyecto fue apoyado por el Programa de Energía Limpia para Colombia de la Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, que entregó las dos plantas gasificadoras que convierten los residuos orgánicos en energía (El Tiempo, El experimento Para Que Árboles Generen Energía Para Bogotá, 2014).

No obstante, el enfoque del proyecto son las PCH y en una búsqueda general sobre el desarrollo de las PCH, encontramos que en Colombia existen alrededor de 250 PCH, distribuidas por todo el país, muchas de las cuales toman agua de pequeños cauces y abastecen la energía eléctrica con una capacidad no mayor a 10 kW (UPME U. d., 2015), sin embargo existen muchas otras, en las cuales se hacen los estudios de pre factibilidad para la implementación de las mismas, como se nombraran en las referencias cronológicas del proyecto.

### 3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la localidad de Usme, Bogotá, específicamente en la zona rural, las viviendas son de baja estratificación y los costos para el pago del servicio de energía eléctrica no se ajustan a sus necesidades, siendo el pago mensual promedio en gas natural y energía eléctrica entre \$17.432 y \$33.016 respectivamente (Observatorio de Desarrollo Económico, 2015). Muchas de estas viviendas están cerca de cauces pequeños como el Río Tunjuelito, la Quebrada Yomasa, la Quebrada Chuniza, la Quebrada El Piojo, La Quebrada Fucha , entre otras, siendo esta última de la cual se va a captar el agua, esto resulta ser una ventaja para la comunidad en caso que se implemente la PCH, esta no genera un impacto negativo al medio ambiente porque es considerada como fuente de energía renovable no convencional, incluso es beneficioso para los habitantes al ser un sistema económico y de larga vida útil.

A pesar de que Bogotá es una zona urbana con conexión a la energía eléctrica constantemente, la implementación de la PCH, será un sistema piloto sostenible económico, social y ambientalmente en esta zona, porque se promueve como una nueva fuente de energía eléctrica para la comunidad.

¿La implementación de una Pico Central Hidroeléctrica en la localidad de Usme, específicamente en cercanías a la Quebrada Fucha, beneficiara a la comunidad en el aspecto tanto económico como ambiental?

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una Pico Central Hidroeléctrica para la generación de energía eléctrica en un sector aledaño a la Quebrada Fucha de la localidad de Usme, Bogotá.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar el diagnóstico y verificación de datos, como caudal y altura topográfica en la zona, para la implementación de una Pico Central Hidroeléctrica
- Analizar el sistema hidráulico de una Pico Central Hidroeléctrica teniendo en cuenta la verificación de nuevas tecnologías para posible implementación de la misma.
- Verificar la información en cuanto a la disponibilidad energética del sector anteriormente enunciado.
- Identificar cuáles son los valores (potencia, caudal y altura) que se requieren para la implementación de la Pico Central Hidroeléctrica y el costo total de inversión para la comunidad.

## 5. JUSTIFICACIÓN

Desde el punto de vista ambiental, normalmente en zonas aisladas donde no llega la conexión a la energía convencional se usan como fuentes de energía eléctrica el carbón y los combustibles fósiles (derivados del petróleo), generando lo que se conoce como efecto invernadero, contaminando el medio ambiente por la emisión de los gases (Guarin Restrepo & Florez Galviz, 2013). Lo que se busca con el proyecto es reducir el impacto negativo al medio ambiente debido al cambio climático, enfocándolo como nueva fuente de energía renovable no convencional.

Desde el punto de vista social y económico, la implementación de una PCH favorece a las comunidades en condición de vulnerabilidad, donde la mayoría de hogares son de estratos 1 y 2, donde la demanda de energía eléctrica es alta y la conexión a la energía convencional tiene un alto costo que no se ajusta a sus necesidades, lo que permite que la implementación de la PCH sea sostenible económica, social y ambientalmente, incluyendo que la comunidad no dependerá de las empresas prestadoras de energía eléctrica

## **6. ALCANCE Y DELIMITACIÓN**

Con este proyecto lo que se busca es hacer un diseño de factibilidad para la implementación una PCH a partir de un análisis y diagnóstico de una captación de agua para generar energía eléctrica en una zona rural de la localidad de Usme (Bogotá), cerca de la conexión de la Quebrada Fucha con el Rio Tunjuelo (Barrio La Requilina), con este análisis se verificara si es viable o no dicha implementación. Incluso se evaluará si la calidad de vida de los habitantes de la zona mejorara con el proyecto.

Como el proyecto va encaminado a la etapa de factibilidad de la PCH, solo se mostrará de manera esquemática la parte de la generación de energía, además de la recomendación de la implementación del protocolo de compuertas; la limitación es la posibilidad de que la comunidad quiera someter su entorno a nuevas implementaciones de tecnologías en energía renovable no convencional para el desarrollo y sostenibilidad de este.

## 7. MARCO DE REFERENCIA

### 7.1 MARCO CONCEPTUAL

Energía: capacidad que tiene un cuerpo para realizar un trabajo (UPME U. d., 2015)

Energía cinética: aquella que poseerá cualquier cuerpo como consecuencia de su movimiento (UPME U. d., 2015)).

Energía eléctrica: es una fuente de energía renovable que se obtiene mediante el movimiento de cargas eléctricas (electrones positivos y negativos) que se produce en el interior de materiales conductores (por ejemplo, cables metálicos de cobre) (UPME U. d., 2015)

Energía hidráulica: energía obtenida de las corrientes de agua (UPME U. d., 2015).

Energía potencial: tipo de energía mecánica asociada a la posición o configuración de un objeto. Se puede decir que es la energía almacenada en el objeto debido a su posición, y que se puede transformar en energía cinética o trabajo (UPME U. d., 2015).

Energía renovable: es la que se obtiene de fuentes naturales, virtualmente inagotables; unas por la inmensa cantidad de energía que contienen y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales (UPME U. d., 2015).

Economía Doméstica: La economía doméstica es un micro entorno en donde las familias ahorran, invierten, gastan, comercian y pierden. Aspectos que de una forma y otra inciden en la economía de una casa y que también influyen otros aspectos más amplios. El ahorro, las hipoteca, la Bolsa, la legislación o los propios conceptos económicos: macro y micro, que afectan directamente en el día a día (Simple.net, 2016)

Medio Ambiente: Conjunto constituido por los agentes físicos, químicos, biológicos, visuales y sociales que constituyen el escenario donde transcurre la existencia del ser humano (ambientum.com, 2015)

Impacto Ambiental: Alteración que se produce sobre la salud y el bienestar del hombre como consecuencia de la realización de un proyecto, con respecto a la situación que existiría si el proyecto no se ejecutara (ambientum.com, 2015)

Contaminación: acción de un agente que mancha o intoxica a cualquier ambiente, haciéndolo perjudicial para la vida humana, animal o vegetal (UPME U. d., 2015)

**Caudal:** Volumen de agua que pasa por una sección dada en una determinada unidad de tiempo. Las expresiones más usadas son litros por segundo, litros por minuto, metros cúbicos por hora, metros cúbicos por día. La operación comprende no solamente la medición de la velocidad del agua y el área de la sección de aforo de la corriente de agua sino también los subsiguientes cálculos necesarios (AguaMarket, 2016)

**Caída hidráulica:** El salto o caída hidráulica es la diferencia de cota entre el punto de captación del agua y las turbinas; a mayor diferencia de cota, mayor potencia hidráulica disponible (UPME U. d., 2015)

**Capacidad Hidráulica:** Característica física, de un cauce abierto que, en función de la superficie de la sección transversal y su rugosidad, multiplicado por la raíz cuadrada de la pendiente, da el caudal correspondiente del cauce o canal. Caudal máximo que un conducto, canal u otra estructura hidráulica es capaz de conducir. Caudal máximo que puede manejar un componente o una estructura hidráulica conservando sus condiciones normales de operación (AguaMarket, 2016)

**Sistema Hidráulico:** Es un mecanismo operado por la resistencia que ofrece la transmisión o la presión cuando el líquido es forzado a través de una pequeña abertura o tubo. Puede verse como una red interdependiente, cuidadosamente equilibrada. La idea básica detrás de cualquier sistema es muy simple, la fuerza que se aplica en un momento dado en un punto se transmite a otro punto en forma de fluido (Baena, 2013)

**Potencia eléctrica:** es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo, es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. La potencia eléctrica se representa con la letra P y la unidad de medida es el Vatio (Watt) (UPME U. d., 2015)

**Rendimiento hídrico:** cantidad de agua superficial por unidad de superficie de una cuenca, en un intervalo de tiempo dado (UPME U. d., 2015)

## **7.2 MARCO TEÓRICO**

### **7.2.1 Calidad de vida en la localidad de Usme**

Índice de pobreza

Los resultados de la Encuesta Multipropósito para la localidad de Usme, muestran que la pobreza por NBI pasó de 8,5 en 2011 a 6,7 en 2014. Del mismo modo, la percepción de pobreza dice que 32 de cada 100 personas en este territorio se consideran pobres. Por su parte, 7,1% de los hogares manifestaron tener algún

miembro, que por falta de dinero no consumió ninguna de las tres comidas uno o más días a la semana. De los 6,8% de hogares que consideraron que estas condiciones han empeorado, 51,8% expresa que es por una pérdida económica importante. De la misma forma, 24,2% consideró que es por el aumento de los precios de los bienes y servicios (Observatorio de Desarrollo Económico, 2015)

## Vivienda

De acuerdo con los datos de la Encuesta Multipropósito para Bogotá, para 2011 en la localidad de Usme hay 99.215 viviendas y 102.380 hogares, lo que representa el 4,68% de los hogares de Bogotá y el 4,73% de las viviendas. Frente a la situación que se registraba en la Encuesta de Calidad de Vida para Bogotá de 2007, los hogares que se encontraban pagando arriendo aumentaron (5,4%), al igual que aquellos que se encuentran pagando su vivienda (1,1%); mientras que los hogares propietarios disminuyeron en 8,5% (Leon Garcia, 2013-2016)

## Empleo

En materia de género, Usme tiene una tasa de ocupación femenina de 50%, siendo este dato superior 2,2 puntos al de hace tres años, cuando se ubicó en 47,8%. Por el lado de los hombres, la tasa de ocupados fue de 68,5%, del mismo modo aumentando varios puntos porcentuales al observado en 2011 (64,18%). Analizando lo anterior, el aumento de los indicadores de ocupación en la localidad, fueron bastante favorables tanto para hombres como para mujeres, pues el incremento proporcional fue muy similar en ambos géneros (Observatorio de Desarrollo Económico, 2015).

## Servicios Públicos

La localidad de Usme cuenta con cubrimiento casi total de todos los servicios públicos domiciliarios, la cobertura de energía eléctrica, acueducto y aseo es del 100%, mientras que la de alcantarillado sanitario es del 99%. (Leon Garcia, 2013-2016)

En promedio, los hogares de Usme pagan \$66.563 por los servicios de acueducto, alcantarillado y recolección de basuras, \$19.941 más que en 2011. El pago mensual promedio en gas natural y energía eléctrica representan entre \$17.432 y \$33.016 respectivamente. Dichos pagos aumentaron con respecto a los registros de 2011, cifra que puede afectar la capacidad de las personas para disponer de sus recursos—luego de aportar al hogar— para destinarlos a sus gastos personales o al ahorro. En concordancia con lo anterior, 62,5% de los habitantes de la localidad manifiestan que el ingreso del hogar solo alcanza para cubrir los gastos mínimos, percepción que pese a ser alta, disminuyó 3,5 puntos con respecto a 2011 (Observatorio de Desarrollo Económico, 2015)

## Aspecto Social Rural

Dentro de los predios que se arriendan, un amplio porcentaje lo hace para iniciar cultivos, principalmente para papa del cual se desprende gran parte de la actividad económica agrícola de los habitantes de la zona, este arriendo se hace en algunos casos solamente del terreno que comprende el cultivo, sin contar con el espacio de la vivienda, en el que habita una familia diferente, en estos casos. En materia de servicios públicos los acueductos veredales son la principal fuente de agua en la mayoría de las veredas. La mayoría de los predios tienen pozo séptico para manejo de residuos y hay amplia cobertura en energía eléctrica. Los servicios de radio y televisión son ampliamente utilizados en todas las veredas. (Leon Garcia, 2013-2016)

### **7.2.2 Recursos naturales y energías renovables**

¿Qué es la Energía Renovable?

Energía renovable es la que se aprovecha directamente de recursos considerados inagotables como el Sol, el viento, los cuerpos de agua, la vegetación o el calor del interior de la Tierra. Estos recursos los encontramos en nuestro entorno, como ciclos naturales del planeta, haciendo que dispongamos de ellos permanentemente, este tipo de energías hoy en día se está viendo más utilizado, ya que generan un ambiente limpio, para nosotros y las futuras generaciones. Actualmente las energías renovables cubren cerca del 20% del consumo mundial de electricidad. Dentro de las energías renovables encontramos: la Energía Solar, la Energía Hidráulica, la Energía Eólica, la Energía De Los Océanos, la Energía De La Biomasa y la Energía De La Geotermia (UPME).

### **7.2.3 Hidroenergía (energía hidráulica)**

¿Qué Es La Hidroenergía?

Es la energía que tiene el agua cuando se mueve a través de un cauce o cuando se encuentra embalsada (energía potencial) a cierta altura y se deja caer para producir energía eléctrica. Esta fuente de energía renovable se encuentra disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua; la utilización más significativa la constituyen las centrales hidroeléctricas, y para su desarrollo requiere construcciones que varían de acuerdo con las condiciones del entorno (UPME U. d., 2015)

Generación de la hidroenergía

En una central hidroeléctrica, la transformación de la energía potencial en energía cinética se logra mediante la caída del agua. El agua que cae pasa por unas

turbinas que se acoplan a un generador. Estas convierten la energía cinética en energía mecánica (UPME U. d., 2015)

### ¿Qué Es Una Central Hidroeléctrica?

Una central hidroeléctrica es una instalación que permite el aprovechamiento de las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos, para transformarlas en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a generadores. Después de este proceso, el agua se devuelve al río en las condiciones en que se tomó, de modo que se puede volver a usar por otra central situada aguas abajo o para consumo (UPME U. d., 2015)

### ¿Qué Es Una Pico Central Hidroeléctrica?

Tiene una capacidad instalada de 1 a 10 kW, operación a filo de agua<sup>1</sup>, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectada.

## Evaluación del recurso hidroenergético

### Medición del salto

El salto o caída hidráulica es la diferencia de cota entre el punto de captación del agua y las turbinas; a mayor diferencia de cota, mayor potencia hidráulica disponible (UPME U. d., 2015). En los estudios de factibilidad para la realización de las PCH y en los definitivos se hace necesario realizar mediciones en el lugar a fin de obtener una mayor precisión. Por lo general, se requiere presiones de 3% o más, puesto que la caída es un parámetro importante en el diseño del sistema (Coz, Sánchez, & Viani, 1995)

Se recomienda realizar tres mediciones y analizar los resultados en el lugar, en caso de que los resultados den muy dispersos. Existen varios métodos con los cuales se puede medir el salto, como (Coz, Sánchez, & Viani, 1995)

- Manguera de nivelación
- Manguera y manómetro
- Nivel de carpintero y tabla
- Altimetro
- Eclímetro
- Nivel de ingeniero
- Mapa

### Medición del caudal

---

<sup>1</sup> Central de Agua Fluyente: se construye en los lugares en que la energía hidráulica debe emplearse en el instante en que se dispone de ella, para accionar las turbinas hidráulicas

El caudal es el volumen de agua por unidad de tiempo; normalmente en m<sup>3</sup>/s, disponible en un sitio determinado para la generación hidroeléctrica (UPME U. d., 2015)

En razón de que el caudal de los ríos varía a lo largo del año, realizar una medida del caudal instantáneo resulta un registro aislado cuya utilidad es relativamente pequeña. Lo ideal es hacer mediciones a diario, aunque también se usan mediciones semanales y mensuales. Algunos métodos de medición de caudal son:

- Método de la solución de la sal
- Método del recipiente
- Método del área y velocidad
- Método de la sección de control y regla graduada
- Método del vertedero de pared delgada

#### Evaluación de las Turbinas Hidráulicas

En el proceso de transformación de la energía de un fluido de energía mecánica o viceversa, se emplean diferentes tipos de máquinas, que pueden clasificarse del siguiente modo:

- Maquinas gravimétricas
- Maquinas hidrostáticas o de desplazamiento
- Maquinas rotodinámicas o turbomáquinas

Por lo tanto, una turbina hidráulica viene a ser una turbomáquina hidráulica, en la cual el trabajo mecánico proviene de la variación de la cantidad de movimiento del agua al fluir a través de un sistema de alabes rotativos (Coz, Sánchez, & Viani, 1995)

#### Tipos de turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas se pueden clasificar en dos grandes grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción. A estos dos grupos corresponden las turbinas modernas que hoy en día se emplean en las centrales hidráulicas, sean estas pequeñas o grandes. Dentro de las turbinas de acción se encuentran (Coz, Sánchez, & Viani, 1995)

- Turbinas Pelton de 1 o más inyectores
- Turbinas Turgo
- Turbinas Michell-Banki

Y dentro de las turbinas de reacción se encuentran:

- Bomba rotodinámica operando como turbina
- Turbinas Francis, en sus variantes: lenta, normal y rápida
- Turbina Deriaz
- Turbinas Kaplan y de hélice
- Turbinas axiales, en sus variantes: tubular, bulbo y de generador periférico

### Diseño de una Bocatoma

Las bocatoma son obras hidráulicas cuya función es regular y captar un determinado caudal de agua, en este caso, para la producción de hidroenergía sea esta mecánica o eléctrica. Las bocatoma nos permiten tomar el agua de los ríos y conducirla aprovechando la fuerza de gravedad. Según esto, el diseño de una bocatoma depende de los siguientes parámetros (Coz, Sánchez, & Viani, 1995):

1. Curso del río (tramo curvo o tramo recto)
2. Configuración del terreno (pendiente del cauce, ancho del valle)
3. Caudal del río, caudal a derivarse, ángulo de desvío
4. Régimen del río, nivel de aguas mínimas y máximas ordinarias, nivel de aguas máximas extraordinarias (coeficiente de retorno)
5. Acarreo de materiales (frecuencia de acarreo, tamaño de materiales acarreados, materiales de fondo, materiales de suspensión)
6. Geología del lugar. Presencia de fallas, arcillas y calizas en las zonas de fundación de la bocatoma
7. Geotecnia del lugar del emplazamiento, capacidad portante de los suelos.
8. Importancia de la obra, disponibilidad presupuestal

### Electricidad

La aplicación más frecuente de la potencia mecánica proveniente de una turbina hidráulica es la generación de energía eléctrica a pesar de la pérdida de eficiencia del recurso.

### Generadores eléctricos de micro centrales hidroeléctricas

Los generadores eléctricos para estas aplicaciones son máquinas eléctricas rotativas que se acoplan directa o indirectamente a los rodets de las turbinas y

así, conjuntamente, producen energía eléctrica o electricidad (Coz, Sánchez, & Viani, 1995). Existen dos tipos de generadores:

### 1. Generadores Síncronos

En este tipo de generador la conversión de energía mecánica en eléctrica se produce a una velocidad constante llamada velocidad de sincronismo, que viene dada por la expresión:

$$n = \frac{60 * f}{P}$$

Dónde:

$f$  = frecuencia de la corriente alterna

$P$  = número de pares polos del rotor del generador

Las bobinas arrolladas crean el campo magnético en los polos del rotor. Para que esto ocurra, por estas bobinas debe circular una corriente eléctrica continua. Para producir esta corriente continua pueden emplearse diferentes sistemas de excitación (IDAE, 2006) :

- Autoexcitación estática. La corriente proviene de la propia energía eléctrica generada, previamente transformada de alterna en continua.
- Excitación con diodos giratorios. Se crea una corriente alterna invertida, con polos en el estator y se rectifica por un sistema de diodos, situado en el eje común.
- Excitación auxiliar. La corriente necesaria se genera mediante una dinamo auxiliar regulada por un reóstato.

Es importante señalar que la frecuencia es una condición muy importante en un sistema energético que deben cumplir todos los generadores, el valor estándar es 50 o 60 Hz. En tal sentido, el proceso de conversión de energía debe mantener el voltaje y la frecuencia constante; para ello es necesaria regular la corriente de excitación y el par motor en la turbina en función de la demanda en el generador, tal que la velocidad mecánica sea constante. Los generadores sincrónicos se acolan a las turbinas hidráulicas, bien sea en forma directa o a través de sistemas de transmisión, ajustándose a condiciones predeterminadas por la turbina, es decir que se pueden ser de eje vertical horizontal o inclinado (Ortiz Flórez, 2011).

### 2. Generadores Asíncronos

Debido a la simplicidad, robustez y bajo costo de los clásicos motores eléctricos, estos han venido utilizándose como generadores eléctricos sobre todo en centrales de pequeña potencia. Para ello es necesario que el par mecánico comunicado al rotor produzca una velocidad de giro superior a la de sincronismo.

Este exceso de velocidad produce un campo giratorio excitador. Es importante que la diferencia entre las velocidades de funcionamiento y la de sincronismo sea pequeña, para reducir las pérdidas en el cobre del rotor (IDAE, 2006).

El generador toma la corriente de la red para la creación del campo magnético. También es necesaria la colocación de una batería de condensadores que compense la energía reactiva generada. El uso de este tipo de generadores no precisa regulador de velocidad de turbina. Para arrancar el grupo se abre el distribuidor de la turbina hasta que se llega a una velocidad superior a la de sincronismo (aunque próxima a la misma) y en este momento se conecta a la red por medio de un interruptor automático (IDAE, 2006).

Como generador se destaca, porque o requiere equipo de sincronización, posee capacidad de sobrevelocidad y protección inherente contra cortocircuitos; no obstante su principal desventaja es que no dispone de instrumentos que le permitan regular la potencia reactiva, por lo tanto, esta debe ser suministrada externamente; bien sea conectándole un banco regulador de condensadores en sus terminales o acoplándola directamente a la red (Ortiz Flórez, 2011).

### **7.3 Referencias cronológicas de las PCH**

En el mundo se han instalado aproximadamente 25.5 GW en plantas hidroeléctricas a pequeña escala. En Colombia, las PCHs comenzaron a implantarse a finales de 1889, con la puesta en marcha de plantas en Bogotá, Bucaramanga y Cúcuta. En 1898 se construyó una PCH en Santa Marta. Entre los años 40-60 se instalaron gran cantidad de PCHs, para electrificar las pequeñas y medianas poblaciones, entre los años 60 al 80, no hubo construcciones de PCHs y por el contrario, por falta de mantenimiento o interconexión muchas quedaron fuera de servicio (Torres Quintero & Castillo, 1995). Con la crisis del sector eléctrico, durante el racionamiento en 1992, se abre nuevamente la posibilidad de desarrollar los proyectos estancados y la posibilidad de evaluar otros nuevos.

Actualmente ICEL (Instituto Colombiano de Energía Eléctrica), al cual el Gobierno Nacional le ha asignado la misión de energizar las zonas no interconectadas del país está construyendo PCHs en Nariño, Chocó, Guajira y Meta. Adicionalmente, el Gobierno Colombiano, ha empezado a fortalecer los programas de PCHs y otras fuentes renovables mediante la ley Eléctrica. Igualmente, mediante la ley 141 del 28 de junio de 1994, por medio de la cual se creó el Fondo Nacional de Regalías, en el cual se asignará un 15% de los recursos, para financiar proyectos regionales de inversión en energización, con recursos provenientes de las regalías que reciben los departamentos y los municipios por la explotación de recursos no renovables como el carbón y el petróleo (Torres Quintero & Castillo, 1995).

Dentro de los planes que el gobierno colombiano ha querido fortalecer encontramos (Torres Quintero & Castillo, 1995):

- Plan de Micro centrales ICEL: Entre los años 1979 a 1982, el ICEL realizó estudios de pre factibilidad y factibilidad en sitios aislados, lo que se pretendía era instalar cerca de 13,4 MW en zonas aisladas, pero sólo se ejecutaron los proyectos de Paya y Pisba. Los Proyectos evaluados en este Plan fueron
  - Unguía (1100 kW),
  - Bahía Solano (2400 kW),
  - El Calvario (200 kW),
  - Santa Rosa (250 kW),
  - Argelia (750 kW),
  - Juradó (800 kW),
  - 
  - Paya (48 kW),
  - Pisba (36 kW),
  - Mitú (650 kW),
  - Aguazul (4800 kW),
  - Puerto López (600 kW),
  - Tame (1800 kW).
  -
- Cooperación Técnica Alemana: El ICEL con el fin de aprovechar al máximo los equipos de generación, ejecutó un estudio con cooperación de la República Federal Alemana, para 21 Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, con lo cual incrementaría la potencia de cada planta
- Plan de Rehabilitación de PCHs por la CVC: En 1983, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca -CVC- realizó estudios de rehabilitación de las siguientes centrales: Cali I y II, Nima I y II, Guadalajara, El Rubor, La Rivera, Riofrío y Consota. En 1992 inició gestiones para la consecución de los recursos financieros necesarios para emprender los trabajos de recuperación de estas instalaciones, con un costo total estimado de MUS\$ 23.
- Plan Micro centrales CORELCA - PESENCA: CORELCA a través de PESENCA, en 1985, con la participación del ICA y la GTZ, desarrolló un programa en la Costa Atlántica cuyos resultados fueron los siguientes:
  - Palmor (Magdalena, 125 kW, en operación),
  - Caracolí (Guajira, 100 kW, en construcción),
  - Palestina (Magdalena, 8.5 kW),
  - Paucedonia (Magdalena, 15 kW, en operación),
  - Siervo Arias (Magdalena, 12 kW, en operación),
  - Sacramento (Magdalena, 23 kW, en operación),
  - Río Piedras (Magdalena, 250 kW, en construcción),
  - Rehabilitación de la PCH de Gaira (Magdalena, 1090 kW),
  - Mico Ahumado (Bolívar, 120 kW, en construcción),
  - Machosolo (Magdalena, 10 kW, en operación).

Además, en este Plan se identificaron los proyectos de:

- Nabusinake (Magdalena, 30 kW),
  - Simití (Bolívar, 1900 kW),
  - Santa Rosa de Simití (Bolívar, 300 kW),
  - Villa Germanía (Cesar, 60 kW).
- Plan ICEL- JICA: El ICEL solicitó al Gobierno del Japón en 1987, la realización de un estudio de rehabilitación para 82 pequeñas centrales eléctricas (3 térmicas, 62 hidráulicas y 17 diésel), las cuales eran operadas por 15 Electrificadoras filiales del ICEL. De estas 82 Centrales se escogieron para estudios de factibilidad la Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Municipal, Intermedia y San Cancio en el Departamento de Caldas y Julio Bravo en el Departamento de Nariño.
- Proyecto Territorios Nacionales: Este proyecto fue desarrollado por ICEL, con la colaboración del Gobierno Italiano; se seleccionaron 16 posibles proyectos, de las cuales se les realizaron a estudios de factibilidad técnico económica para los siguientes:
- San Pedro (12 MW),
  - Mesetas (720 kW),
  - Nunchía (entre 800 - 1000 kW),
  - La Salina (500 kW),
  - Recetor (450 kW),
  - Tauranema (entre 600 - 800 kW).
- Proyecto Piloto en Zonas Aisladas: El Ministerio de Minas y Energía, fue encargado por el Gobierno Nacional para adelantar los siguientes Proyectos Piloto para suministro de Energía Eléctrica:
- Cumbitara (Nariño, 125 kW, en construcción),
  - Acandí (Chocó, 300 kW, en proyecto),
  - La Macarena (Meta, 150 kW, en proyecto),
  - Caracolí (Guajira, 100 kW, en construcción),
  - Bahía Solano (Chocó, 600 kW,
  - Puerto López (Cauca, 300 kW, en construcción).
- El ICEL (1995-1997) lleva a cabo un programa de construcción de PCHs:
- Chorrera(Amazonas) 40 KW,
  - San Pedro 15000 KW,
  - López de Micay(Cauca) 450 KW,
  - Guapi (Cauca) 13500 KW,
  - Timbiqui (Cauca) 8800 KW,
  - B. Solano (Choco) 2220 kw,
  - Unguia (Choco) 1100 KW,
  - Acandi 250 KW,
  - Pizarro 2000 KW,

- San José de Guaviare 15000 KW,
- El retorno 110 KW,
- La Macarena 600 KW,
- Puerto Carreño 5000 KW,
- Bocas de Satinga 3030 KW,
- Mocoa (Putumayo) 22000 KW
- Mitú (Vaupés) 320 KW

Asimismo, en marzo de 1996 se inauguró Riofrío II de 9.6 MW construida por la Compañía de Electricidad de Tuluá.

Adicionalmente se han construido e instalado aproximadamente 50 pico centrales con potencias entre 300 y 900 vatios entre 1994 y 1995 y en el año de 1995 se instaló una micro central de 6 kW en el parque nacional de los Guacharos Huila.

- El INEA (1995-1997) adelanta los proyectos: diagnostico técnico de rehabilitación de PCHs de PCHs fuera de servicio, Adecuación de Criterios de diseño de PCHs y Levantamiento del Potencial hídrico para generación hidroeléctrica a pequeña escala.

#### 7.4 MARCO LEGAL

LEY	NORMA	DESCRIPCIÓN
LEY 697 DE 2001	Reglamentada parcialmente por el Decreto 3683 de 2003	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras disposiciones.
DECRETO 1180 DE 2003	Derogado por el art. 41, Decreto Nacional 1220 de 2005	Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre Licencias Ambientales
RESOLUCION 1280 DEL 30 JUNIO DE 2006	Resolución No. 673 de 17 de julio de 1997	“Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la construcción y operación de centrales hidroeléctricas generadoras y se adoptan otras determinaciones”
ARTICULO 8 DEL DECRETO 1753 DE 1994	Por el cual se reglamentan parcialmente los Títulos VIII y XII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.	Construcción de centrales generadoras de energía inferiores o iguales a 100.000 Kw de capacidad instalada
LEY 1715 DE 2014		Por medio de la cual se regula la integración de las energías

		renovables no convencionales al sistema energético nacional
LEY 143 DE 1994	Modificada por la Ley 1151 de 2007	Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética.
RESOLUCIÓN 865 DE 2004	Artículo 21 del Decreto 155 de 2004	“Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones”

## 7.5 ESTADO DEL ARTE

En cuanto a los últimos estudios realizados de PCHs a nivel nacional encontramos que en el 2013 en La Florida, Pereira, realizaron el estudio para generar energía eléctrica a una fundación en condición vulnerable, el estudio se realizó a partir de bancos de prueba en los laboratorios de hidráulica, sin embargo se concluyó, que el caudal del cauce del cual estaban captando el agua, no era suficiente para la demanda energética que se requería (Guarin Restrepo & Florez Galviz, 2013)).

Por otro lado, en el 2015 se realizó un estudio en la Universidad Libre de Bogotá, Colombia, en donde constataba los pasos y requerimientos para la implementación de una PCH que generara energía eléctrica a un edificio de esta universidad, igualmente se realizaron los estudios y se llegó a la conclusión de que el sistema si podría ser implementando, al tomar el líquido de un tanque subterráneo que contenía las aguas lluvias del parqueadero de esta zona y el agua subterránea de las zonas verde de la misma, por lo cual la demanda de caudal era suficiente para cumplir con la demanda de energía requerida (Solano Leon & Bolivar Bernal, 2015)

Finalmente, en el 2016 en una Institución Educativa ubicada a 20 kilómetros al Sur Este del casco urbano del Municipio de Toledo Norte de Santander, es decir en un zona aislada del sistema interconectado de energía eléctrica, se realizó un proyecto el cual consistía en aprovechar la energía potencial del agua, para transformarla en energía eléctrica, mediante un equipo electromecánico, suficiente para el funcionamiento de equipos de cómputo y audiovisuales, así como los electrodomésticos básicos requeridos por los estudiantes de la Institución Educativa. Dicho proyecto fue visto de manera positiva por La Administración Municipal de Toledo Norte de Santander en cabeza de su Alcalde a través de su Consejo Municipal, donde posibilitaron la construcción de la Micro

central Hidroeléctrica para la Institución Educativa considerando el estudio realizado y la repercusión en el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la vereda teniendo en cuenta la creación de condiciones para la implementación de nuevas alternativas de educación y comunicación (Bohorquez Niño, Guerrero Gomez, & Cabellos Martinez, 2016)

Pero, evidentemente no solo se han implementado o se han realizado estudios de PCH's en Colombia, sino también en otros países en vía de desarrollo como lo son Ecuador, Guatemala, Perú, Honduras, entre otros. Tal ejemplo es la PCH que se construyó en Chimborazo, Ecuador, en el 2009, donde la demanda de energía era de 2 kW, la cual iba a generar energía para una hacienda que posteriormente se convertiría en hacienda de hospedaje para agroturismo, dicha hacienda estaba en una zona aislada donde no llegaba la conexión a la energía convencional, este proyecto no genero un impacto negativo ambiental en la zona, además que resultó ser de bajo costo para el propietario de la hacienda (Sisa Amaguaya & Villarroel Herrera, 2009).

Otro ejemplo de ello, es la PCH que se construyó en Florida, Guatemala, en el 2011, donde una población también aislada de la conexión a la energía convencional, usaban velas y batería para generar energía eléctrica, sin embargo esta energía no era constante, y muchas veces tenían que trasladarse a otros pueblos a cargar sus celulares, la PCH demanda una potencia de 60 Watt, por lo cual el caudal que se requería era bajo, y el rio del cual captaron el agua cumplía con dicho requerimiento, finalmente la PCH fue un éxito y la población de dicha zona se benefició mucho porque ya no tenían que trasladarse a otros lugares y podían cargar sus celulares constantemente, además que no generaba contaminación para el medio ambiente (EcolInventos, 2011)

Asimismo, en el 2012 en Nicaragua y Honduras se realizó un proyecto llamado Energising Development (EnDev), el cual desarrolla PCH, con el fin de satisfacer las necesidades de energía eléctrica en zonas rurales aisladas de la red eléctrica nacional; desarrollaron 6 proyectos, 4 en Honduras y 2 en Nicaragua, los cuales tiene potencias entre 0,5 y 2,5 kW, el objetivo de las PCH era abastecer energía eléctrica a comunidades dedicadas al cultivo del café y a la ganadería, los proyectos han sido experiencias positivas porque se mejoraron las condiciones de vida del productor y sus trabajadores, además se potenció la productividad de las fincas. Inclusive, indujeron en que las PCH tenían un costo inicial elevado, pero se compensaba con la larga vida útil del mismo, generando ahorro económico por eliminar el uso de baterías, combustible fósiles y velas, además de reducir el impacto negativo del medio ambiente producido por los combustibles fósiles, carbón y derivados del petróleo (Blanco Morazan, 2012)

## **8. DESCRIPCIÓN GENERAL Y PARÁMETROS DE CÁLCULO**

En base al planteamiento teórico anteriormente presentado se continúa con la ejecución del proyecto teniendo en cuenta los numerales 3, 5 y 6.

Para la ejecución del proyecto se consideran las etapas de recopilación de información, la cual consiste en buscar información acerca de las PCH a nivel nacional e internacional además de la investigación de nueva tecnologías para el sistema hidráulico; Datos de caudales, el cual consiente en la realización de aforos de caudal a lo largo de la Quebrada Fucha; Datos de altura topográfica, tomando puntos con GPS en la zona y procesando los datos en un sistema de información geográfico; Diseño del sistema hidráulico, en este punto se realizaran los cálculos para la captación y conducción de agua, además, de la selección y diseño de la turbina hidráulica; Diseño del sistema energético, aquí se realizan los cálculos para determinar cuánto se genera de energía (disponibilidad energética) y los elementos necesarios para la trasmisión y control de la misma; Por último, Cálculo del presupuesto de la implementación de la PCH, teniendo en cuenta los diferentes proveedores y la calidad y cantidad de los materiales necesarios.

### **8.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO**

El diseño de la PCH se va a realizar en la localidad de Usme, la cual está ubicada al sur de la ciudad de Bogotá; limita al occidente con la localidad de Ciudad Bolívar y el municipio de Pasca; al sur con la localidad de Sumapaz; al norte con las localidades de Tunjuelito, Rafael Uribe Uribe y San Cristóbal y al oriente con los municipios de Ubaque y Chipaque. Esta localidad se divide en 279 barrios, organizados en 7 UPZ, y tiene una extensión de 21.506,1 hectáreas (has.). La UPZ más extensa es Ciudad Usme (925 has.); Además, en Usme hay 77.513 predios, de los cuales 55.748 son residenciales y 21.765 no residenciales. En la zona rural de la localidad hay 2.469 predios, de los cuales el 48,3% tiene vivienda y el 51,7% no tiene ningún tipo de vivienda construida (Leon Garcia, 2013-2016)

El proyecto se desarrolla en la UPZ Ciudad de Usme, cerca de la conexión de la Quebrada Fucha con el Rio Tunjuelito, conexión ubicada al sur de la localidad; geomorfológicamente corresponde a un valle asimétrico muy estrecho hacia la vertiente derecha, ampliándose hacia la vertiente izquierda, donde se incrementa la densidad de drenaje y el área de captación; esto implica, que de presentarse crecientes, estarían asociadas al área drenada desde la vertiente izquierda. El régimen que presenta la microcuenca en la parte alta, donde hay fuertes cambios de pendiente longitudinal del cauce, podría asociarse a la ocurrencia de avenidas torrenciales (Cruz Lopez, 2013). Dicha zona se encuentra a una altura de 2704 m.s.n.m., con longitudes entre 4°29'02"O- 4°28'58,1"O y latitudes entre 74°7'9,9"N- 74°7'11,6"N (datos tomados en campo) En la siguiente Figura 1 se observa la localización del proyecto.

Figura 1. Localización del proyecto.



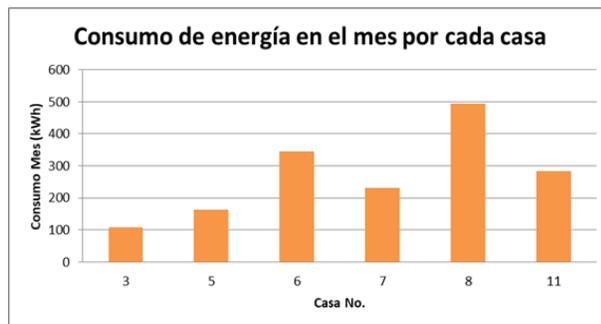
Fuente: Google Earth

## 8.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

El proyecto está enmarcado dentro del sector de trabajo social, esto quiere decir que la factibilidad del diseño de la PCH se realiza con el fin de beneficiar a una parte de la comunidad que habita esta zona. Se realizaron visitas a las casas aledañas que en total son 11 y se hicieron encuestas para conocer el esquema social que se iba a tratar, sin embargo, solo 6 de las 11 casas participaron en la encuesta; a partir de las preguntas se dedujo que el sector es estrato 2, que todas las casas cuentan con servicio de energía eléctrica y que el prestador del servicio es CODENSA.

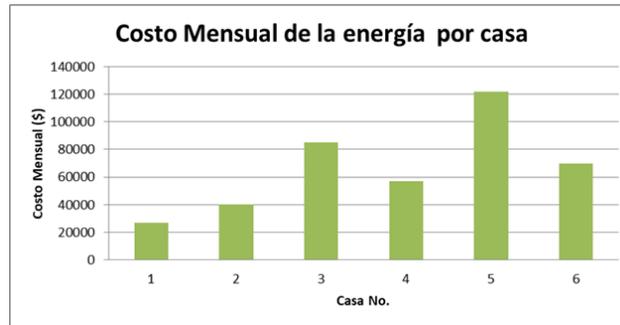
Para conocer más acerca de la prestación del servicio de esta zona se realizaron preguntas acerca del consumo promedio mensual y del costo mensual por dicho servicio, los resultados se muestran en la Figura 2 y en la Figura 3

Figura 2. Grafica de consumo de energía en el mes de las casas aledañas



Fuente. Autor

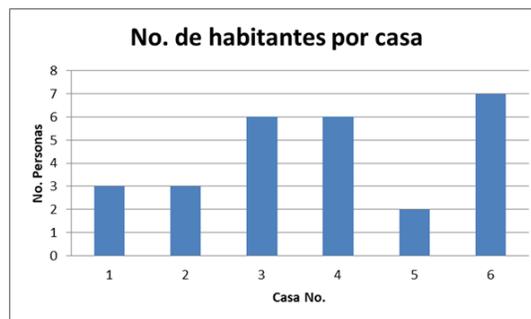
Figura 3. Grafica del costo mensual de las casas aledañas a la Quebrada Fucha



Fuente. Autor

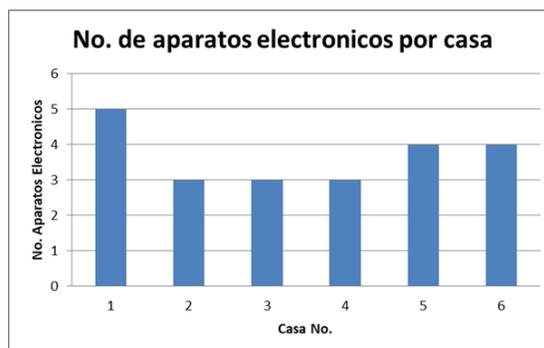
Incluso, se les pregunto si habían tenido alguna vez corte o suspensión del servicio de la energía eléctrica por falta de pago, y solo la casa No. 7, respondió que SI, el resto dijo que NO, esta es una de las razones por las cuales se tomó esta casa como punto para distribuir la energía eléctrica, además para justificar esta escogencia se preguntó por el número de habitantes en la casa, los aparatos electrónicos y las bombillas que utilizaban a diario, dando como resultado:

Figura 4. Número de habitantes por casa



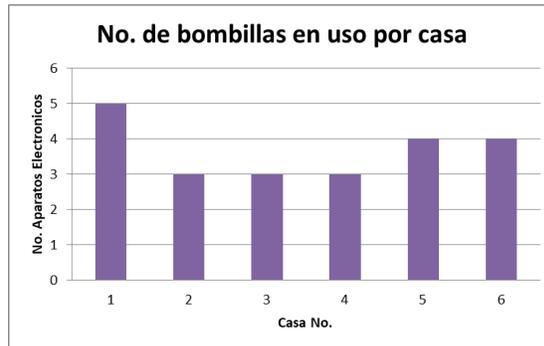
Fuente. Autor

Figura 5. Número de aparatos electrónicos en uso por casa



Fuente. Autor

Figura 6. Número de bombillas en uso por casa



Fuente. Autor

Finalmente, a cada una de las personas que atendió a cada casa se le explicó sobre el proyecto, y para saber si la comunidad estaba de acuerdo con que su hogar estuviera conectado a un sistema de energía eléctrica renovable no convencional, todos respondieron que SI. De esta manera, cada que se realizaron visitas tanto para hacer los aforos de caudal como para tomar las muestras para hacer el laboratorio de sólidos totales, entre otros, se les informaba sobre el avance del proyecto.

### 8.3 EVALUACIÓN TOPOGRÁFICA

El análisis topográfico permite determinar la cabeza de energía que es la diferencia de cotas entre el punto donde se deriva el agua (cota de aducción) hasta donde se entrega (cota de desagüe), sin considerar todas las pérdidas que ocurrirán ya sea por pendiente del canal, cámara de carga, tubería, accesorios, entre otros.

Para determinar esta altura se tomó datos geográficos en cada uno de los puntos donde se realizarían las estructuras, teniendo en cuenta que son tres los puntos de la cota de aducción y uno el punto de desagüe, además se tomaron puntos en la zona para luego procesarlos en un sistema de información geográfico y determinar las distancias y alturas, los datos de los puntos de aducción y desagüe se encuentran en la Tabla 1, además en la Figura 7 se muestran dichos puntos:

Tabla 1. Datos de las cotas de aducción y desagüe

NOMBRE		COTA (m)
COTA DE ADUCCIÓN	PUNTO 1	2700,33
	PUNTO 2	2699,33
	PUNTO 3	2700,73
COTA DE DESAGÜE	PUNTO 4	2691

Fuente. Autor

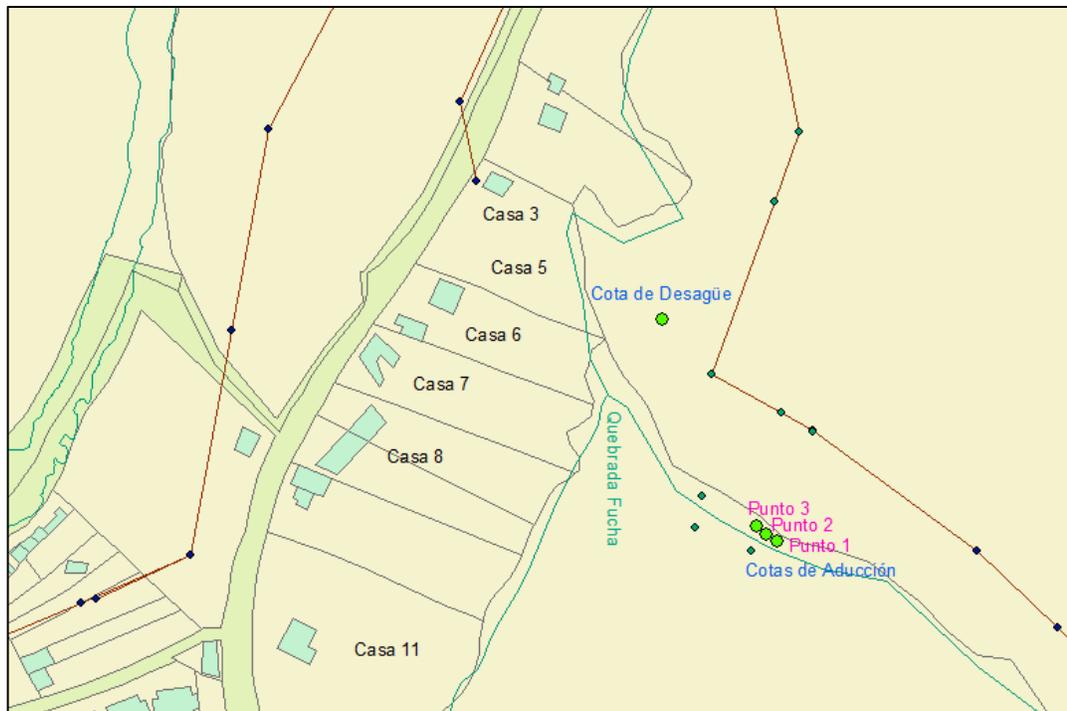
A partir de los datos que arrojo el sistema se puede determinar la cabeza de energía, como se muestra a continuación:

Tabla 2. Cabeza de energía de los puntos

NOMBRE		CABEZA DE ENERGÍA(m)
COTA DE ADUCCIÓN	PUNTO 1	9
	PUNTO 2	8
	PUNTO 3	9,4

Fuente. Autor

Figura 7. Esquema de las cotas de aducción y desagüe



Fuente. Autor

#### 8.4 EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

Para determinar qué cantidad de agua posee la quebrada se realizó aforos de caudal a lo largo de esta, en total fueron 6 puntos (secciones transversales), se tomó el dato de la velocidad (con el molinete) cada 50 centímetros a lo ancho y cada 20 centímetros de profundidad en cada sección, además de tomar los datos de localización, elevación y ancho total de cada punto, los datos de los puntos a utilizar se encuentran a continuación (Véase Tabla 3 y Tabla 4), los demás puntos se encuentran en Anexos 2.

Con dichos datos se halla el caudal en cada sección con la siguiente formula:

$$Q = \sum Q_{cada\ tramo} \quad (1)$$

$$Q_{cada\ tramo} = V * A \quad (2)$$

Dónde:

$Q =$  Caudal total ( $m^3/s$ )

$Q_{cada\ tramo} =$  Caudal de cada tramo ( $m^3/s$ )

$V =$  Velocidad ( $m/s$ )

$A =$  Area ( $m^2$ )

Tabla 3. Datos medidos en el punto 1

1er Punto																																
Localización		N			4°28'55,5"																											
		W			74°07'10,4"																											
Elevación		m			2696																											
Ancho		m			5,45																											
Tramo a			Tramo b						Tramo c						Tramo d			Tramo e			Tramo f											
0,5			1			1,5			2			2,5			3			3,5			4			4,5			5			5,23		
Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad				
m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s			
0,2	1,1	0,34	0,20	1,3	0,40	0,2	0,8	0,24	0,2	0,8	0,24				0,2	0,4	0,12	0,2	0,9	0,27				0,2	0,4	0,12						
0,33	1,1	0,34	0,40	0,2	0,06	0,4	0,9	0,27	0,4	0,8	0,24	0,4	0,4	0,12	0,4	0,3	0,09	0,4	0,4	0,12	0,4	0,4	0,12	0,4	0,4	0,12	0,4	0,5	0,15			
			0,44	0,2	0,06	0,42	0,9	0,27	0,54	0,6	0,18	0,6	0,4	0,12	0,6	0,2	0,06	0,6	0,3	0,09	0,51	0,3	0,09	0,6	0,5	0,15	0,6	0,4	0,12			
												0,72	0,4	0,12	0,64	0,2	0,06	0,68	0,1	0,03				0,64	0,5	0,15	0,7	0,3	0,09			

Fuente. Autor

Tabla 4. Datos medidos en el punto 2

2do Punto																				
Localización		N			4°28'55,4"															
		W			74°07'11,2"															
Elevación		m			2698															
Ancho		m			3,3															
Tramo a			Tramo b						Tramo c						Tramo d					
0,5			1			1,5			2			2,5			3			3,15		
Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad				
m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s			
															0,2	0,9	0,27			
0,4	0,3	0,09	0,40	0,2	0,06	0,4	0,5	0,15	0,4	1,4	0,43	0,4	0,9	0,27	0,4	0,9	0,27			
0,5	0,3	0,09	0,6	0,2	0,06	0,6	0,5	0,15	0,6	1	0,30	0,52	1	0,30	0,6	0,8	0,24			
			0,62	0,2	0,06	0,64	0,5	0,15												

Fuente. Autor

La velocidad, es el promedio de las velocidades en cada tramo de 1 metro de ancho, y el área es el factor entre 1 metro de ancho y la profundidad en ese tramo, teniendo en cuenta que en los extremos el área es calculada como un triángulo y en los demás tramos como un trapecio. A continuación, se realiza el procedimiento

para el punto 1. Los datos de los puntos 1 y 2 se encuentran en la Tabla 5 y Tabla 6, los de los demás puntos se encuentran en los Anexos 3

Para el tramo a

$$V_{tramo a} = \frac{0,34 + 0,40 + 0,06}{3} = 0,26 \text{ m/s}$$

$$A_{tramo a} = \frac{1\text{m} * 0,44 \text{ m}}{2} = 0,22 \text{ m}^2$$

$$Q_{tramo a} = 0,26 \text{ m/s} * 0,22 \text{ m}^2 = 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el tramo b

$$V_{tramo b} = \frac{0,24 + 0,27 + 0,24 + 0,24}{4} = 0,25 \text{ m/s}$$

$$A_{tramo b} = \left( \frac{0,44\text{m} + 0,54 \text{ m}}{2} \right) (1\text{m}) = 0,49 \text{ m}^2$$

$$Q_{tramo b} = 0,25 \text{ m/s} * 0,49 \text{ m}^2 = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el tramo c

$$V_{tramo c} = \frac{0,12 + 0,12 + 0,12 + 0,12 + 0,06}{5} = 0,11 \text{ m/s}$$

$$A_{tramo c} = \left( \frac{0,54\text{m} + 0,64 \text{ m}}{2} \right) (1\text{m}) = 0,59 \text{ m}^2$$

$$Q_{tramo c} = 0,11 \text{ m/s} * 0,59 \text{ m}^2 = 0,06 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el tramo d

$$V_{tramo d} = \frac{0,27 + 0,09 + 0,09 + 0,12}{4} = 0,14 \text{ m/s}$$

$$A_{tramo d} = \left( \frac{0,64\text{m} + 0,51 \text{ m}}{2} \right) (1\text{m}) = 0,58 \text{ m}^2$$

$$Q_{tramo d} = 0,14 \text{ m/s} * 0,58 \text{ m}^2 = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el tramo e

$$V_{tramo e} = \frac{0,12 + 0,12 + 0,15 + 0,15 + 0,12}{5} = 0,13 \text{ m/s}$$

$$A_{tramo e} = \left( \frac{0,51\text{m} + 0,70 \text{ m}}{2} \right) (1\text{m}) = 0,61 \text{ m}^2$$

$$Q_{tramo e} = 0,13 \text{ m/s} * 0,61 \text{ m}^2 = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el tramo f

$$V_{tramo f} = 0,27 \text{ m/s}$$

$$A_{tramo a} = \frac{1\text{m} * 0,70 \text{ m}}{2} = 0,35 \text{ m}^2$$

$$Q_{tramo f} = 0,27 \text{ m/s} * 0,35 \text{ m}^2 = 0,10 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo tanto, el caudal para del primer punto es de:

$$Q = 0,06 + 0,12 + 0,06 + 0,08 + 0,08 + 0,10 = 0,506 \text{ m}^3/\text{s}$$

Resumiendo, los cálculos:

Tabla 5. Caudal para el punto 1

Tramo	Velocidad	Profundidad	Ancho	Area	Caudal
	m/s	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
a	0,26	0,33	1,00	0,22	0,06
b	0,25	0,42	1,00	0,49	0,12
c	0,11	0,72	1,00	0,59	0,06
d	0,14	0,68	1,00	0,58	0,08
e	0,13	0,64	1,00	0,61	0,08
f	0,27	0,35	1,00	0,35	0,10
Total					0,506

Fuente. Autor

Tabla 6. Caudal para el punto 2

Tramo	Velocidad	Profundidad	Ancho	Area	Caudal
	m/s	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
a	0,07	0,50	1,00	0,31	0,02
b	0,24	0,64	1,00	0,61	0,15
c	0,27	0,52	1,00	0,60	0,16
d	0,27	0,35	1,00	0,30	0,08
Total					0,418

Fuente. Autor

Los puntos 1 y 2 corresponden a los puntos en los cuales se realizarán las estructuras, de esta manera los caudales son 0,506 m<sup>3</sup>/s y 0,418 m<sup>3</sup>/s, respectivamente.

Sin embargo, el caudal de diseño está en función del caudal ecológico, que según el IDEAM es un valor aproximado del 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente de estudio (Ministerio de Ambiente, 2014), siendo el caudal de diseño para cada uno de los puntos:

$$Q_{diseño} = 0,25 * Q \quad (3)$$

Dónde:

$$Q_{diseño} = \text{Caudal de diseño (m}^3/\text{s)}$$
$$Q = \text{Caudal de la corriente (m}^3/\text{s)}$$

Para el primer punto,

$$Q_{diseño} = 0,25 * (0,506\text{m}^3/\text{s})$$
$$Q_{diseño} = 0,127 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para el segundo punto,

$$Q_{diseño} = 0,25 * (0,418\text{m}^3/\text{s})$$
$$Q_{diseño} = 0,105 \text{ m}^3/\text{s}$$

## 8.5 REQUERIMIENTO ENERGÉTICO

Según Ramiro Ortiz, el análisis de la demanda de energía eléctrica es una de las piezas fundamentales para determinar el consumo actual por potencia y energía de la población y la demanda futura para un periodo de T años. Esta proyección debe tener en cuenta que el sistema eléctrico se diseña en base a la potencia máxima que se debe abastecer, tanto para la generación como para la transmisión y distribución (Ortiz Flórez, 2011).

Igualmente, se debe tener en cuenta que el uso de la energía va a ser de tipo domiciliario. La estimación de la demanda de energía eléctrica se obtiene al determinar la potencia de diseño necesaria para abastecer todos los gastos eléctricos básicos existentes en las viviendas. Sin embargo, la demanda de electricidad no será un valor fijo, sino cambiará en las distintas horas del día y en los distintos meses del año. Por otro lado, se debe considerar todas las pérdidas a

las cuales será sometido el sistema, de esta forma la PCH tendrán un grado de eficiencia, que variará según las condiciones a las cuales sea sometida.

Para saber el requerimiento energético de la zona se realizó encuestas a las casas aledañas a la zona, teniendo en cuenta que todas las casas son estrato 2, y que actualmente cuentan con el servicio de energía eléctrica; una de las preguntas de la encuesta era el valor del consumo promedio de la casa a lo que las personas respondieron:

Tabla 7. Consumo Diario por casa.

<b>Casa No.</b>	<b>Consumo Promedio en el mes (kWh)</b>	<b>Consumo Diario (kWh/dia)</b>
3	109	3,63
5	163	5,43
6	344	11,47
7	232	7,73
8	495	16,50
11	284	9,47
<b>Suma</b>		<b>54,23</b>

Fuente. Autor

## 9. CÁLCULO DE OBRAS CIVILES

Las obras civiles cumplen con el objetivo de desviar el agua, para transportarla hacia la turbina y luego de que cumpla su finalidad devolverla al cauce original, a continuación, se presenta el cálculo de las estructuras en tres puntos diferentes, para luego escoger la más óptima según las condiciones del terreno, teniendo en cuenta que el desarrollo total de las ecuaciones utilizadas se presenta en el Apéndice A (Véase Anexo 1)

### 9.1 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL AGUA

Se tomó una muestra de agua (1Litro) del punto donde posiblemente se realizaría la captación de agua, y se midió la temperatura en este mismo punto, posteriormente se analizó la muestra dando como resultado:

Tabla 8. Propiedades del agua

Parámetro	Unidades	Valor
PH		4,91
Oxigeno	mg*l	2,9
% Oxigeno	%	44
Resistividad	kΩ*cm	77,7
Conductividad	μS*cm	12,89
TDS (Solidos en Suspensión)	mg*l	41,2
Salinidad		0
Color	Pt-Co	158
Turbidez	NTU	27,1
Temperatura	°C	15
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	999,19
Viscosidad Cinemática	m <sup>2</sup> /s	1,15E-06
Diámetro Partícula	mm	0,01

Fuente. Autor

### 9.2 SISTEMA DE CAPTACIÓN

**9.2.1 Diseño de la derivación** El diseño de la derivación se realiza con el fin de dividir el caudal de diseño del caudal total de la quebrada a las demás partes del sistema, los cálculos para este diseño se realizan a partir del Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995.

Se muestra el procedimiento de los cálculos del punto 2 porque al final se comprueba que es el punto óptimo para realizar las estructuras, sin embargo, para los puntos 1 y 3 se muestran los resultados en las tablas de Anexos 4.

**9.2.1.1 Dimensiones del canal antes de la derivación.** Las dimensiones del canal se determinan con la siguiente ecuación:

$$Q = V * A \quad (4)$$

Dónde:

$Q = \text{Caudal de diseño (m}^3/\text{s)}$

$V = \text{Velocidad del agua en el canal (m/s)}$

$A = \text{Sección transversal del canal (m}^2\text{)}$

Para realizar el cálculo de la capacidad del canal se considera el caudal de avenida. Y según información administrada por los habitantes de la zona, el excedente del caudal puede estar entre un 30% y 50% del caudal de la quebrada, de esta manera

$$Q_{avenida} = Q + xQ \quad (5)$$

Dónde:

$Q_{avenida} = \text{Caudal máximo de la quebrada (m}^3/\text{s)}$

$Q = \text{Caudal de la quebrada (m}^3/\text{s)}$

$x = \text{Porcentaje de aumento del caudal (adimensional)}$

Por seguridad se toma como valor máximo de caudal de avenida un 50%

$$Q_{avenida} = 0,759 \text{ m}^3/\text{s}$$

Los valores de velocidad mínima y máxima con los que se diseña el canal antes de la derivación son:

Velocidad mínima recomendada. Se toma el valor de la Tabla 9, teniendo en cuenta que la calidad del agua en esta zona es con sedimentos finos según estudios realizados (Anexo 5).

Tabla 9. Velocidades mínimas recomendadas para evitar sedimentación

Calidad del agua	Velocidad mínima (m/s)
Con sedimentos finos	0,3
Con arena	0,5

Fuente. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995

Velocidad máxima recomendada. Se toma el valor de la Tabla 10., teniendo en cuenta que el canal se realizara en concreto y con una profundidad menos de 1 m.

Tabla 10 Velocidad máxima del agua recomendada

Material	Velocidad máxima	
	Menos de 0,3 m de profundidad (m/s)	Menos de 1 m de profundidad (m/s)
Arena	0,3	0,5
Greda arenosa	0,4	0,7
Greda	0,5	0,8
Greda de arcilla	0,6	0,9
Arcilla	0,8	2
Mampostería	1,5	2
Concreto	1,5	2

Fuente. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995.

Por lo tanto, los valores son:

- Velocidad mínima recomendada.                      0,3 m/s
- Velocidad máxima recomendada.                      2 m/s

El área se obtiene de la ecuación:

$$A = \frac{Q_{avenida}}{V_{minima}} \quad (6)$$

$$A = 2,530 \text{ m}^2$$

Conocida el área transversal, los valores de base y altura del canal transversal, se obtienen mediante un proceso iterativo de la siguiente ecuación:

$$A = y * b \quad (7)$$

Dónde:

- $A$  = Sección transversal del canal ( $\text{m}^2$ )
- $y$  = Tirante o profundidad del agua (m)
- $b$  = Solera o fondo de canal (m)

$$A = 2,530 \text{ m}^2$$

Las dimensiones del canal de derivación son:

- Base del canal:                      2,3 m
- Altura de canal:                      1,1 m

**9.2.1.2 Cálculo de la resistencia de las paredes del canal antes de la derivación.** Para las paredes del canal de derivación se recomienda que sean

diseñadas en hormigón, para ello se calcula el espesor mínimo de las paredes que soporte la presión que se genera sobre ellas.

La presión que se genera en el canal por el paso del agua o retención de esta, determina el espesor de las paredes, presión que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$P_C = P_A + (\rho * g * h_2) \quad (8)$$

Dónde:

$P_C$  = Presión de fondo del canal ( $N/m^2$ )

$P_A$  = Presión atmosférica ( $N/m^2$ ). Para Bogotá es de 74660,32 Pa

$\rho$  = Densidad del agua ( $Kg/m^3$ ). Véase la Tabla 8

$g$  = Gravedad ( $9,81 m/s^2$ )

$h_2$  = Altura del nivel del agua (m)

$$P_C = 0,871 Kg/cm^2$$

Ahora se compara el valor anterior con la resistencia del concreto,

*Presión en el canal < Resistencia del hormigón*

$$0,871 Kg/cm^2 < 105 Kg/cm^2$$

De esta manera, las paredes soportaran la presión que el agua ejercerá sobre él.

**9.2.1.3 Espesor del canal de derivación.** El espesor mínimo de la pared del canal se calcula con la ecuación (9):

$$e = 0,10 * h \quad (9)$$

Dónde:

$e$  = Espesor mínimo del canal (m)

$h$  = Altura del canal (m)

$$e = 0,11 m$$

Se recomienda que el espesor mínimo de las paredes del canal este entre 5 cm y 7,5 cm para acomodar el concreto, por lo cual este espesor de 0,11 m cumple con el criterio.

**9.2.1.4 Dimensiones del canal de salida de la derivación hacia el tanque de presión.** Para el dimensionamiento del canal de derivación, se recomienda que la forma del canal sea rectangular, y se halla con la ecuación (4):

Los valores de velocidad mínima y máxima con los que se diseña el canal de derivación se tienen en cuenta de la Tabla 9 y Tabla 10, como se muestra a continuación:

- Velocidad mínima recomendada. 0,3 m/s
- Velocidad máxima recomendada. 2 m/s

El área se obtiene de la ecuación (6):

$$A = 0,423 \text{ m}^2$$

Conocida el área transversal se calculan las dimensiones del canal tipo rectangular, que tenga el área antes calculada con la ecuación (7):

$$A = 0,55 \text{ m} * 0,77 \text{ m}$$

$$A = 0,424 \text{ m}^2$$

Las dimensiones del canal de derivación son:

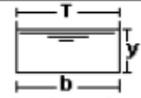
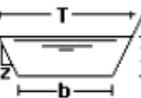
- Base del canal: 0,77 m
- Altura de canal: 0,55 m

### 9.3 SISTEMA DE CONDUCCIÓN.

**9.3.1 Tipo y propiedades del suelo.** La Quebrada Fucha se encuentra en la parte alta de la formación del Tunjuelito, por lo cual el tipo de suelo es arcilla (Cruz Lopez, 2013)

En la Tabla 11 se encuentra la descripción de las características de los diferentes tipos de secciones que pueden ser empleados para el diseño de los canales.

Tabla 11. Elementos geométricos de secciones de canal

Sección	Area hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	$by$	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	$b$
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$

Fuente. Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow, 1994.

El tipo de sección que se planteara para el canal es trapezoidal, debido a las características de funcionabilidad y el tipo de terreno que se tiene. La principal característica de este tipo de canales es que son eficientes hidráulicamente y poseen una estabilidad del material, lo que quiere decir que el desprendimiento de este es mínimo.

**9.3.2 Diseño del canal.** Teniendo en cuenta las propiedades del suelo y las condiciones geográficas de los puntos de derivación y generación del sistema, se determina la velocidad del agua que pasara por el canal.

- Altura del punto de derivación: 2700,33091 m
- Altura del punto de ingreso al desarenador: 2700,33037 m

Los cálculos para este diseño se realizan a partir del Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995. Por lo cual el área transversal del canal se halla con la ecuación (4):

Los valores de velocidad mínima y máxima con los que se diseña el canal de conducción se tienen en cuenta de la Tabla 9 y Tabla 10, siendo en este caso el material de arcilla, como se muestra a continuación:

- Velocidad mínima recomendada. 0,3 m/s
- Velocidad máxima recomendada. 2 m/s

El grado de inclinación que tiene el canal se obtiene de la ecuación de Manning:

$$S_c = \left( \frac{n * V}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^2 \quad (10)$$

Dónde:

- $S_c$  = Pendiente del canal (adimensional)
- $n$  = Rugosidad del material del canal (adimensional)
- $V$  = Velocidad del agua en el canal (m/s)
- $R$  = Radio hidráulico (m)

El valor de la pendiente se obtiene de dividir la altura por su longitud total, la altura es la diferencia entre el punto donde se va a implantar el desarenador y el punto de la derivación

$$S_c = \frac{h_1 - h_0}{L} \quad (11)$$

Dónde:

- $h_1$  = Altura geográfica de la derivación (2700,33091 m)

$h_0 =$  Altura geográfica del desarenador (2700,33037 m)

$L =$  Longitud total del canal (5m)

$$S_c = 0,108 \times 10^{-3}$$

El valor de la rugosidad del canal se obtiene de la Tabla 12.

Tabla 12. Coeficiente de rugosidad “n”

Canales de tierra	n
Arcilla	0,0130
Material sólido, suave	0,0167
Arena con algo de arcilla o roca partida	0,0200
Fondo de arena y grava, con lados empedrados	0,0213
Grava fina de unos 10/20/30 mm	0,0222
Grava regular, de unos 20/40/60 mm	0,0250
Grava gruesa, de unos 50/100/50 mm	0,0286
Greda en terrones	0,0333
Revestido con piedras	0,0370
Arena, greda, grava e hierbas	0,0455

Fuente. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995.

El canal será construido en suelo de arcilla, para evitar la sedimentación de los sólidos en el canal, el valor de velocidad mínimo que se toma es:

- Velocidad mínima recomendada. 0,3 m/s
- Rugosidad. n= 0,013

Con los valores antes determinados, el radio hidráulico se calcula a partir de la ecuación de la pendiente o ecuación de Manning para canales abiertos:

$$R = \left( \frac{n * V}{\sqrt{S}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$$R = 0,230 \text{ m}$$

El radio hidráulico se define como:

$$R = \frac{A}{Pe} \quad (13)$$

Dónde:

$R =$  Radio hidráulico (m)  
 $A =$  Sección del canal ( $m^2$ )  
 $Pe =$  Perímetro mojado (m)

Se recomienda la ecuación (4) de área para evitar la sedimentación de los sólidos dependiendo del caudal de diseño:

$$A = 0,423 m^2$$

El perímetro mojado se obtiene mediante la ecuación (13):

$$Pe = 1,841 m$$

Conocida el área transversal del canal, se determina el perímetro mojado del mismo según el tipo de sección que se está utilizando, en este caso es trapezoidal y la ecuación se obtiene de la Tabla 11.

$$Pe = b + 2y\sqrt{1 + Z^2} \quad (14)$$

$Pe =$  Perímetro mojado (m)  
 $b =$  Tirante o profundidad del agua (m)  
 $y =$  Solera o fondo del canal (m)  
 $Z =$  Talud o ángulo de inclinación de las paredes de canal

Según la Tabla 13, el valor del talud corresponde a 0,58, siendo el material de arcilla.

Tabla 13. Talud recomendado para canales de sección trapezoidal

Material	Talud (Z= Cot $\theta$ )
Arena	3,00
Arena y greda	2,00
Greda	1,50
Greda y arcilla	1,00
Arcilla	0,58
Concreto	0,58

Fuente. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995.

$$1,841 = b + 2y\sqrt{1 + 0,58^2}$$

$$1,841 = b + 2,31y$$

Para determinar la base y la altura del canal realiza un proceso iterativo, de la formula antes mencionada dando como resultado:

$$b = 0,69 \text{ m}$$
$$y = 0,50 \text{ m}$$

El espejo de agua se obtiene de la ecuación:

$$T = b + 2Zy \quad (15)$$

Dónde:

$T =$  Espejo de agua (m)

$b =$  Tirante o profundidad del agua (m)

$y =$  Solera o fondo del canal (m)

$Z =$  Talud o ángulo de inclinación de las paredes de canal

$$T = 1,270 \text{ m}$$

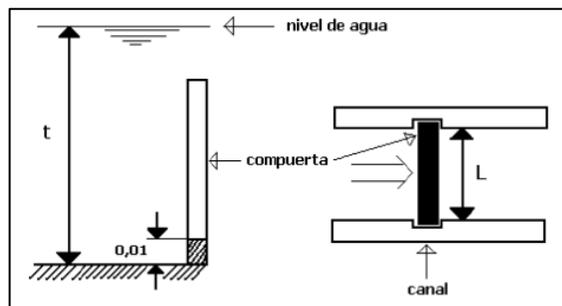
#### 9.4 CÁLCULO DE LA COMPUERTA DEL CANAL PRINCIPAL.

A partir de los parámetros que se conoce del canal se pueden determinar las dimensiones de la compuerta siguiendo los parámetros del Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995:

- Base de la compuerta:  $b_c = 2,3 \text{ m}$
- Altura de la compuerta:  $H_c = 1,1 \text{ m}$

**9.4.1 Cálculo del espesor de la compuerta del canal principal.** Se deja una zona de 0,01 m de altura desde la profundidad, como se ve en la Figura 8.

Figura 8. Espesor de la compuerta



Fuente. Estudio de prefactibilidad técnica económica de una pico central hidroeléctrica para la hacienda Titaycun, parroquia La Matriz, comunidad Titaycun del Cantón Chambo, Cazorla Riera y Merizalde Salas-Ecuador, 2013

La presión del agua sobre la compuerta es uniformemente repartida. La presión total en esta zona se determina con la siguiente ecuación:

$$P = 10 * L * t \quad (16)$$

$P$  = Presión total en la zona indicada

$L$  = Luz de la compuerta (m)

$t$  = Profundidad (m)

La compuerta colocada en las paredes del canal forma una viga apoyada en sus extremos con carga total uniformemente repartida  $P$ , se hallan las ecuaciones con el momento flector máximo:

Se recomienda utilizar una lámina de acero ASTM A-36 con una resistencia a la tracción de 400 N/mm<sup>2</sup> (40816326 Kg/m<sup>2</sup>) como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14 Características de la lámina de acero ASTM A-36

LÁMINAS	Límite elástico		Resistencia a la tracción		% de alargamiento
	(KSI)	(MPa)	(KSI) MIN - MAX	(MPa) MIN - MAX	
ASTM A	36	250	58-80	400-550	20
ASTM - A 131 GR A (espesor < 7mm)	34	234	58 - 71	400 - 490	24
ASTM - A 131 GR A (espesor >= 7mm)	34	234	58 - 71	400 - 490	24
ASTM A - 131GR C	34	235	58-71	400-490	21
ASTM A - 283GR C	30	205	55-75	380-515	22
ASTM A - 285GR C	30	205	55-75	380-515	23
ASTM A - 516GR 70	38	260	70-90	485-620	17
ASTM A - 572GR 50	50	345	65	450	20
ASTM A - 588GR B	50	345	70	485	18
ANTIABRASIVAS AA 400	DUREZA BRINEL 360 Min, 380-400 Typical				

Fuente. Aceroscol S.A.S.

La ecuación del espesor de la compuerta ( $e$ ) es:

$$e = \sqrt{\frac{60 * L^2 * t}{8 * 0,01 * 40816326}} \quad (17)$$

Ahora reemplazamos los valores de  $L$  y  $t$ , que corresponden a la base y la altura de la compuerta:

$$e = 0,0103 \text{ m}$$

$$e = 10,34 \text{ mm} \cong 10,5 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se plantea que el espesor de la compuerta sea de 10,5 mm, el cual se seleccionara del catálogo ACEROSCOL que se encuentra en el Anexo 6

**9.4.2 Mecanismo de elevación de la compuerta del canal principal.** La compuerta será de tipo deslizante, por lo que en el diseño de los cables de acero se debe determinar la resistencia a vencer para la elevación y descenso de la compuerta.

La resistencia en este caso abarca dos términos: uno es el rozamiento presente por la presión hidráulica que ejerce sobre la compuerta; y otro, en caso de elevación, debido al propio peso de la compuerta, este último término es una fuerza favorable para el descenso. La resistencia está dada por:

$$F = (H * Ac * k) + W \quad (18)$$

$$F' = (H * Ac * k) - W \quad (19)$$

*F = Fuerza necesaria en toneladas para equilibrar las resistencias en el ascenso (toneladas).*

*F' = Fuerza necesaria en toneladas para equilibrar las resistencias en el descenso (toneladas).*

*Ac = Superficie de la compuerta en metros cuadrados, expuestas a presión hidráulica (m<sup>2</sup>)*

*H = Carga de agua sobre la compuerta (m)*

*k = Coeficiente de rozamiento estático (adimensional)(Vease Tabla 15)*

*W = Peso propio de la compuerta (toneladas)*

$$Ac = b * y \quad (20)$$

$$Ac = 2,3 \text{ m} * 1,1 \text{ m}$$

$$Ac = 2,53 \text{ m}^2$$

Para la carga de agua sobre la compuerta se asume un valor de 0,63 m para el primer y segundo punto y 0,58 m para el tercer punto.

Para el coeficiente de rozamiento estático se tiene en cuenta que es acero sobre acero, el valor que corresponde es 0,74, según la Tabla 15.

Para el peso propio de la compuerta se utiliza la formula (21):

$$W = \frac{L * An * e * 7,85}{1000} \quad (21)$$

Dónde:

*L = Largo (mm)*

*An = Ancho (mm)*

*e = Espesor (mm)*

$$W = 208,535 \text{ Kg}$$

$$W = 0,209 \text{ Ton}$$

Tabla 15. Coeficientes de Fricción

Material	$\mu_s$	$\mu_k$
Hule sobre concreto	1,0	0,8
Acero sobre acero	0,74	0,57
Aluminio sobre acero	0,61	0,47
Vidrio sobre vidrio	0,94	0,4
Cobre sobre acero	0,53	0,36
Madera sobre madera	0,25-0,5	0,2
Madera encerada sobre nieve húmeda	0,14	0,1
Madera encerada sobre nieve seca	--	0,04
Metal sobre metal (lubricado)	0,15	0,06
Teflón sobre teflón	0,04	0,04
Hielo sobre hielo	0,1	0,03
Articulación sinovial en humanos	0,01	0,003

Nota: Todos los valores son aproximados. En algunos casos el coeficiente de fricción puede superara 1,0

Fuente. FÍSICA para ciencias e ingeniería, Serway y Jewett - México D.F, 2008

Por lo cual,

$$F = (0,63 * 2,53 * 0,74) + 0,209 = 1,388 \text{ Ton}$$

$$F' = (0,63 * 2,53 * 0,74) - 0,209 = 0,971 \text{ Ton}$$

## 9.5 CÁLCULO DE LA COMPUERTA DEL CANAL DE DERIVACIÓN.

A partir de los parámetros que se conoce del canal de derivación se pueden determinar las dimensiones de la compuerta siguiendo los parámetros del Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995:

- Ancho del canal: 0,77m
- Altura estimada de la compuerta: 1,1 m

**9.5.1 Calculo del espesor de la compuerta del canal de derivación.** La compuerta forma una viga apoyada en sus extremos con carga total uniformemente repartida P; el momento flector máximo se obtiene de la ecuación (17):

$$e = 3,462 \text{ mm} \approx 3,5 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se plantea que el espesor de la compuerta sea de 10,5 mm, el cual se seleccionara del catálogo ACEROSCOL que se encuentra en el Anexo 6

**9.5.2 Mecanismo de elevación de la compuerta del canal de derivación.** La compuerta será de tipo deslizante, por lo que en el diseño de los cables de acero se debe determinar la resistencia a vencer para la elevación y descenso de la compuerta.

La resistencia está dada por las ecuaciones (18), (19) y (20)

$$A_c = 0,847 \text{ m}^2$$

Para la carga de agua sobre la compuerta se asume un valor de 0,63 m para el primer y segundo punto y 0,58 m para el tercer punto.

Para el coeficiente de rozamiento estático se tiene en cuenta que es acero sobre acero, el valor que corresponde es 0,74, según la Tabla 15.

Para el peso propio de la compuerta se utiliza la siguiente formula (21):

$$W = 0,023 \text{ Ton}$$

Por lo cual,

$$F = (0,63 * 0,847 * 0,74) + 0,023 = 0,418 \text{ Ton}$$

$$F' = (0,63 * 0,847 * 0,74) - 0,023 = 0,372 \text{ Ton}$$

## **9.6 DIMENSIONAMIENTO DEL DESARENADOR CON CÁMARA DE CARGA**

Debido a que el agua captada de la quebrada y conducida hacia la turbina, transporta partículas de material sólido en suspensión compuesta por materiales abrasivos, que producen el rápido desgaste de los alabes de la turbina. El diseño del desarenador se realiza a partir del Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas (Coz, Sánchez, & Viani, 1995) y al Libro Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (Ortiz Flórez, 2011), teniendo en cuenta las recomendaciones del libro Micro-Hydro Design Manual de Adam Harvey (Harvey, Brown, & Hettiarachi, 1993):

1. Deben tener dimensiones de largo y ancho que sean lo suficientemente grandes para provocar el asentamiento de los sedimentos, pero no tan grandes como para que las estructuras sean demasiado caras y voluminosas.
2. Deben permitir la eliminación fácil de los depósitos, realizados a intervalos suficientemente frecuentes
3. El agua eliminada de la salida de descarga debe conducirse con cuidado lejos de la instalación. Esto evita la erosión del suelo que rodea y apoya los cimientos de la estructura y la tubería de carga.

4. Deben evitar la turbulencia del flujo causada por la introducción de cambios bruscos en el área o curvas, y deben evitar la separación del flujo.
  5. Se debe permitir suficiente capacidad para la recolección de sedimentos
- Las dimensiones del desarenador se muestran en la Figura 9 y se obtienen mediante las ecuaciones (22), (23) y (24):

$$Q = A * V_h \quad (22)$$

$$A = W_d * d_d \quad (23)$$

$$L_d = \frac{V_h}{V_d} * d_d * f \quad (24)$$

Dónde:

- $Q =$  Caudal de diseño ( $m^3/s$ )
- $A =$  Área de la sección transversal ( $m^2$ )
- $V_h =$  Velocidad horizontal del agua ( $m/s$ )
- $W_d =$  Ancho del desarenador ( $m$ )
- $d_d =$  Profundidad de decantación ( $m$ )
- $L_d =$  Longitud de decantación ( $m$ )
- $V_d =$  Velocidad de decantación ( $m/s$ )
- $f =$  Factor de seguridad (adimensional)

- La velocidad horizontal ( $V_h$ ) de la corriente en la cámara de sedimentación no debe ser superior a 0,5 m/s, dado que con velocidades superiores las partículas no pueden detenerse en una superficie lisa como lo es el fondo del desarenador. Sin embargo, Dubuat propone las velocidades límites por debajo de las cuales el agua cesa de arrastrar diversas materias, estas son:

Tabla 16. Velocidades horizontales límites

Material	Velocidad (m/s)
Arcilla	0,081
Arena Fina	0,16
Arena Gruesa	0,216

Fuente. Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, Ortiz Flórez, Ramiro-Bogotá, 2011.

Esto indica que la velocidad horizontal en la cámara de sedimentación oscila entre 0,1m/s – 0,4m/s y la profundidad media entre 1,5 m – 4 m.

- La profundidad de decantación ( $d_d$ ) no debe tener valores mayores a 1 m para facilitar la limpieza.

- Para determinar la velocidad de decantación ( $V_d$ ) se tiene en cuenta la ley de Stokes, como se ve a continuación,

$$V_d = \frac{1}{18} * g * \left( \frac{\rho_a - \rho}{v} \right) * d^2 \quad (25)$$

Dónde:

$\rho_a$  = Densidad de la arena

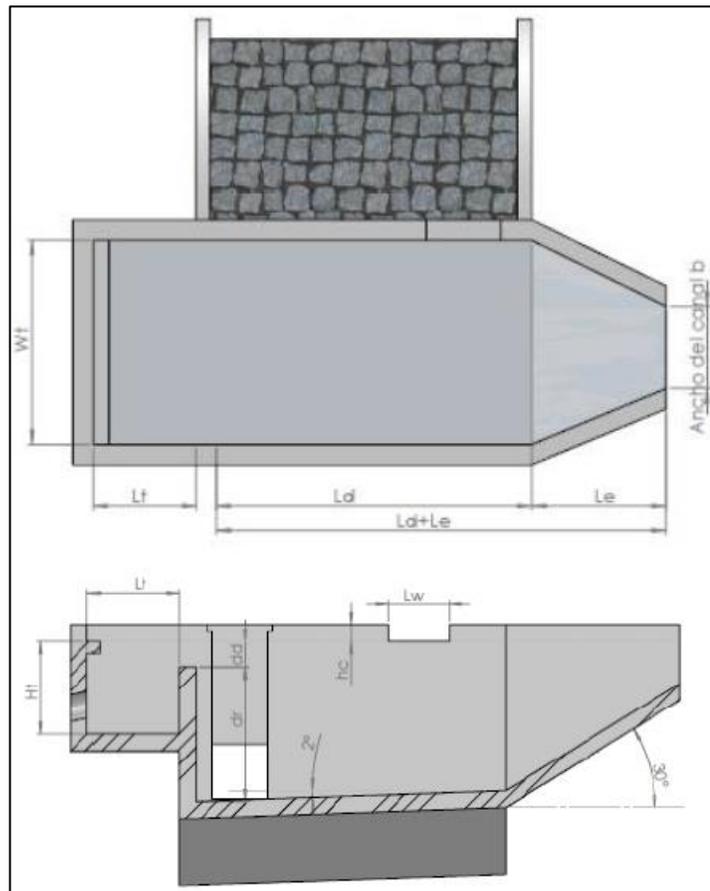
$\rho$  = Densidad del agua (Vease Tabla 8)

$v$  = Viscosidad cinematica del agua ( $cm^2/s$ ) (Vease Tabla 8)

$d$  = Diametro de la partícula (cm) (Vease Tabla 8),

$$V_d = 0,78 \text{ cm/s} = 0,0078 \text{ m/s}$$

Figura 9. Medidas principales del desarenador



Fuente. Estudio de prefactibilidad técnica económica de una pico central hidroeléctrica para la hacienda Titaycun, parroquia La Matriz, comunidad Titaycun del Cantón Chambo, Cazorla Riera y Merizalde Salas-Ecuador, 2013

Los datos de los que se disponen para realizar el cálculo respectivo son los siguientes:

$$Q = 0,127 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_h = 0,2 \text{ m/s (recomendación para lograr sedimentación)}$$

$$V_d = 0,0078 \text{ m/s}$$

$$d_d = 0,15 \text{ m (Valor asumido)}$$

$$f = \text{Factor de seguridad 2 asumido.}$$

Se reemplazan los datos para determinar el ancho del desarenador partiendo de los datos de área, ecuación (4):

$$A = 0,633 \text{ m}^2$$

$$W_d = \frac{A}{d_d} = \frac{0,633 \text{ m}^2}{0,15 \text{ m}} = 4,217 \text{ m}$$

Ahora para hallar la longitud del desarenador:

$$L_d = \frac{0,2 \text{ m/s}}{0,008 \text{ m/s}} * 0,15 \text{ m} * 2 = 7,699 \text{ m}$$

La capacidad del tanque colector  $m$ , y frecuencia de velocidad del depósito se obtiene de la ecuación (26):

$$m = Q * T * ST \quad (26)$$

Dónde:

$$Q = \text{Caudal de diseño (m}^3/\text{s)}$$

$$T = \text{Período de tiempo de vaciado del tanque, una vez cada 4 meses ; } T = 10454400 \text{ s}$$

$$ST = \text{Solidos Totales (Vease Anexo 5)}$$

$$m = 211597,056 \text{ Kg}$$

Calculo del volumen de sedimento  $V$ :

$$V = \frac{m}{\rho_a} \quad (27)$$

Dónde:

$$m_R = \text{Masa de la arena (Kg)}$$

$$\rho_a = \text{Densidad de la arena (2650 Kg/m}^3\text{)}$$

$$V = 79,848 \text{ m}^3$$

A continuación, se halla la profundidad del colector:

$$d_r = \frac{V}{W_d * L_d} \quad (28)$$

Dónde:

$V = \text{Volumen de sedimento (m}^3\text{)}$   
 $W_d = \text{Ancho del desarenador (m)}$   
 $L_d = \text{Longitud de decantación (m)}$

$$d_r = 2,469 \text{ m}$$

Se determina la longitud de entrada del desarenador con la ecuación (29):

$$\tan \theta = \frac{d_r'}{Le} \quad (29)$$

$$Le = \frac{d_r'}{\tan \theta} = 3,819 \text{ m}$$

### 9.6.1 Dimensionamiento de la cámara de carga

Según Ramiro Ortiz, la cámara de descarga se realiza con el fin de crear un volumen de reserva de agua que permita satisfacer las necesidades de las turbinas durante los aumentos bruscos de demanda, mantener sobre la tubería una altura de agua suficiente que evite el ingreso de aire, impedir la entrada de elementos sólidos de arrastre y flotantes a la tubería de presión, además de decantar materiales sólidos en suspensión y permitir su lavado (Ortiz Flórez, 2011). El dimensionamiento de esta estructura se muestra a continuación, teniendo en cuenta la Figura 10.

- Se fija un valor de altura, que evite el ingreso de posibles sedimentos a la tubería de presión. Se recomienda un valor de:

$$0,3 < a_1 < 0,5 \text{ (m)}$$

$$a_1 = 0,4 \text{ m}$$

- Se toma un valor de altura equivalente al diámetro de la tubería de presión

$$a_2 \approx D$$

$$a_2 \approx 0,406 \text{ m}$$

- Para que el torbellino creado por el flujo del caudal no genere cavitación se deja un nivel mínimo equivalente a:



$$V_2 = 0,6 \text{ m/s}$$

- Se determina el ancho del tanque de carga

$$b_2 = \frac{Q}{V_2 * h_2} \text{ (m)} \quad (30)$$

$$b_2 = 4,217 \text{ m}$$

- Se determina la altura del volumen de agua en el tanque para el arranque

$$h_{2d} = \frac{Q}{7 * b_2 * \sqrt{h_2}} \quad (31)$$

$$h_{2d} = 0,019 \text{ m}$$

- Se determina:

$$h_{2e} = a_1 + a_2 + a_3 + h_{2d} \quad (32)$$

$$h_{2e} = 1,225 \text{ m}$$

- Se confrontan las alturas  $h_{2e}$  y  $h_2$ , si:

$$h_{2e} > h_2 \text{ Los valores tomados son correctos}$$

$$h_{2e} < h_2 \text{ Se debe tomar un valor mayor para } h_2 \text{ y recalcular}$$

- Como se cumple la relación se determina la longitud de la cámara de carga

$$L_2 = 0,304 \left( \frac{Q * L * \sqrt{h_2}}{h_{2e} * D^2} \right) \quad (33)$$

$$L_2 = 3,066 \text{ m}$$

- Se calcula la altura del nivel máximo

$$h_{2e} = \frac{0,25 * Q}{b_2 * \sqrt{h_2}} \quad (34)$$

$$h_{2e} = 0,034 \text{ m}$$

- Se determina la altura de la cámara de carga

$$h_{2c} = h_2 + h_{2e} + a_4 \quad (35)$$

$$h_{2c} = 1,675 \text{ m}$$

### 9.6.2 Calculo de las paredes de la cámara y el desarenador.

Con la ecuación (8) se determina si el material de la cámara y el desarenador resisten la presión que ejerce el fluido sobre él, teniendo en cuenta una altura de nivel de agua de 2,179 m

$$P_c = 1,033 \text{ Kg/cm}^2$$

Ahora se compara el valor anterior con la resistencia del concreto,

$$\text{Presión en las paredes} < \text{Resistencia del hormigón}$$

$$1,033 \text{ Kg/cm}^2 < 210 \text{ Kg/cm}^2$$

De esta manera, las paredes soportaran la presión que el agua ejercerá sobre él.

**9.6.3 Espesor de la pared de la cámara de carga y desarenador.** El espesor mínimo de la pared del canal se calcula con la ecuación (9):

$$e = 0,272 \text{ m}$$

Se recomienda que el espesor mínimo de las paredes del canal este entre 5 cm y 7,5 cm para acomodar el concreto, por lo cual este espesor de 0,27 m cumple con el criterio.

**9.6.4 Calculo de la compuerta del desarenador.** Los parámetros que se conocen para determinar la compuerta del desarenador son:

- |   |  |
|---|--|
| • Caudal del canal                            | $Q_{min} = 0,127 \text{ m}^3/\text{s}$ |
| • Base estimada de la compuerta               | $b_c = 1 \text{ m}$                    |
| • Altura estimada de la compuerta             | $H_c = 2 \text{ m}$                    |
| • Altura del nivel de agua sobre la compuerta | $H = 0,719 \text{ m}$                  |

**9.6.4.1 Calculo del espesor de la compuerta.** El espesor de la compuerta se obtiene de la ecuación (17):

$$e = 6,062 \text{ mm} \approx 6 \text{ mm}$$

**9.6.4.2 Mecanismo de elevación de la compuerta del desarenador.** La compuerta será de tipo deslizante, por lo que en el diseño de los cables de acero se debe determinar la resistencia a vencer para la elevación y descenso de la compuerta.

La resistencia está dada por las ecuaciones (18), (19) y (20):

$$Ac = 2 \text{ m}^2$$

Para el coeficiente de rozamiento estático se tiene en cuenta que es acero sobre acero, el valor que corresponde es 0,74, según la Tabla 15.

Para el peso propio de la compuerta se utiliza la formula (21):

$$W = 0,094 \text{ Ton}$$

Por lo cual,

$$F = 1,158 \text{ Ton}$$

$$F' = 0,97 \text{ Ton}$$

### 9.6.5 Vertedero del desarenador

Se realiza con el fin de regular los caudales superiores a los de diseño, porque si estas aguas excedentes ingresan a las diferentes obras que componen el sistema, podrían ocasionar daños de imprevisibles consecuencias.

Para realizar el cálculo del vertedero se debe conocer el caudal de avenida. Y según información administrada por los habitantes de la zona, el excedente del caudal puede estar entre un 30% y 50% del caudal de diseño, de esta manera el caudal máximo de la quebrada se calcula con la ecuación (5) dando como resultado:

$$Q_{avenida} = 0,190 \text{ m}^3/\text{s}$$

La longitud del vertedero se halla a partir de la ecuación del vertedero estándar:

$$L_W = \frac{Q_e}{C_W * h_c^{3/2}} \quad (36)$$

Dónde:

$Q_e = \text{Caudal a evacuar (m}^3/\text{s)}$

$C_W = \text{Coeficiente de descarga}$

$h_c = \text{Carga del vertedero (0,1 m)}$

$$Q_e = Q_{avenida} - Q \quad (37)$$

$$Q_e = 0,190 \text{ m}^3/\text{s} - 0,127 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_e = 0,063 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$C_W = 0,602 + 0,07 \left( \frac{h}{p} \right) \quad (38)$$

$$C_W = 0,602 + 0,07 \left( \frac{0,1 \text{ m}}{2,483 \text{ m}} \right)$$

$$C_W = 0,605$$

$$L_W = \frac{0,063 \text{ m}^3/\text{s}}{0,605 * 0,1^{3/2}}$$

$$L_W = 3,307 \text{ m}$$

Las dimensiones del vertedero que está ubicado en el desarenador son las siguientes:

- Altura del vertedero 0,1 m
- Longitud del vertedero 3,307 m

## 9.7 TUBERÍA DE PRESIÓN

El diseño de esta se realiza con el fin de transportar el agua bajo presión a la turbina, para ello se determinan las dimensiones de esta y las pérdidas que se tienen en el sistema, teniendo en cuenta que se va a diseñar la tubería en PVC. Se realizan los cálculos de los tres puntos a partir del Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995.

**9.7.1 Calculo del diámetro interno de la tubería de presión.** El diámetro de la tubería de presión se obtiene de la ecuación de Bondschú:

$$D = 1,27 \frac{Q^{0,4268}}{(H_B + h_s)^{0,1423}} \quad (39)$$

Dónde:

$Q$  = Caudal de diseño ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$H_B$  = Altura Bruta (m)

$h_s$  = Altura sobrepresión por golpe de ariete (m). Se recomienda un valor igual a  $0,3H_B$

$$D = 0,377 \text{ m} \approx 377,21\text{mm} \approx 14,85 \text{ in}$$

Debido a que el diámetro calculado no es comercial, se recomienda seleccionar un diámetro de tubería de 14 pulgadas que es un diámetro que se puede adquirir en el mercado.

Tabla 17. Diámetro comercial de la tubería

Presión de trabajo a 23°C: 125 psi - 0.86 MPa - 8.8 Kg/cm <sup>2</sup>							
Diámetro Nominal pulg	Referencia	Peso Aprox. Kg/m	Diámetro Exterior Prom.		Espesor de Pared Mínimo		Diámetro Interior Prom. mm
			mm	pulg.	mm	pulg.	
3	2900026	1.16	88.90	3.50	2.74	0.11	83.42
4	2900037	1.90	114.30	4.50	3.51	0.14	107.28
6	2900047	4.13	168.28	6.62	5.18	0.20	157.92
8	2900058	7.02	219.08	8.62	6.73	0.26	205.57
10	2902415	11.13	273.05	10.75	8.41	0.33	256.23
12	2902425	15.70	323.85	12.75	9.96	0.39	303.93
14	2902433	18.3	355.60	14	10.92	0.43	333.76
16	2902437	23.9	406.40	16	12.50	0.49	381.40
18	2902441	30.8	457.20	18	14.07	0.55	429.06
20	2902492	37.9	508.00	20	15.62	0.61	476.76
24	NUEVO	53.0	609.60	24	18.75	0.74	572.10

Fuente. Manual técnico Unión Platino, PAVCO – Mexichem.  
<file:///C:/Users/Toshiba/Downloads/Manual%20UNION%20PLATINO.pdf>

**9.7.2. Calculo de la velocidad del agua.** La velocidad de circulación del agua en la tubería se determina con la ecuación de continuidad, ecuación (4):

El área de la tubería de sección circular es:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (40)$$

Despejando la velocidad y reemplazando el área de la tubería de sección transversal circular en la ecuación se tiene:

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * d^2} \quad (41)$$

Dónde:

$Q =$  Caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$d =$  Diámetro interior de la tubería (m)

$V =$  Velocidad de circulación del agua (m/s)

Remplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$V = 1,279 \text{ m/s}$$

**9.7.3. Calculo de pérdidas en la tubería de presión.** Se producen dos tipos de pérdidas de energía: perdidas por fricción del agua contra las paredes de la tubería llamadas pérdidas primarias y pérdidas por turbulencia conocidas como pérdidas secundarias.

**9.7.3.1 Calculo de las perdidas primarias por fricción en la tubería.** Se aplica la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_{friccion} = \frac{f * L * V^2}{2 * g * D} \quad (42)$$

Dónde:

$f$  = Factor de fricción

$L$  = Longitud de la tubería (m)

$D$  = Diámetro de la tubería (m)

$V$  = Velocidad del agua (m/s)

$g$  = Aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

El factor de fricción de la tubería de determina mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} + \frac{ks}{3,71 d} \right) \quad (43)$$

Dónde:

$Re$  = Número de Reynolds

$ks$  = Rugosidad absoluta del PVC (Vease Tabla 18)

$d$  = Diámetro de la tubería

$$Re = \frac{V * d}{\nu} \quad (44)$$

$V$  = Velocidad de circulación del agua (m/s)

$\nu$  = Viscosidad cinemática del agua (m<sup>2</sup>/s)(Vease Tabla 8)

Reemplazando los valores

$$Re = \frac{1,279 \text{ m/s} * 0,356 \text{ m}}{1,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 395416,008$$

$$Re = 395416,008$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{2,51}{395416,008 * \sqrt{f}} + \frac{0,0015}{3,71 (0,356)} \right)$$

Se realiza un proceso iterativo para hallar el factor de fricción dando como resultado:

$$f = 0,029$$

De esta manera:

$$h_{friccion} = \frac{f * L * V^2}{2 * g * D}$$

$$h_{friccion} = 0,491 \text{ m}$$

Tabla 18. Coeficiente de rugosidad absoluta

Material	Coefficiente de Manning (n)	Coefficiente Hazen Williams (C <sub>H</sub> )	Coefficiente Rugosidad Absoluta (ks)
Asbesto Cemento	0,011	140	0,0015
Latón	0,011	135	0,0015
Tabique	0,015	100	0,6
Fiero fundido (nuevo)	0,012	130	0,26
Comcreto (cimbra metalica)	0,011	140	0,18
Concreto (cimbra madera)	0,015	120	0,6
Concreto simple	0,013	135	0,36
Cobre	0,011	135	0,0015
Acero corrugado	0,022	--	45
Acero galvanizado	0,016	120	0,15
Acero (esmalado)	0,01	148	0,0048
Acero (nuevo, sin recubrimiento )	0,011	145	0,045
Acero (remachado)	0,019	110	0,9
Plomo	0,011	135	0,0015
Plástico PVC	0,009	150	0,0015
Madera (duelas)	0,012	120	0,18
Vidrio (laboratorio)	0,011	140	0,0015

Fuente. Computer Applications in Hydraulic Engineering, Haestad Methods, 2004

**9.7.3.2 Calculo de las perdidas secundarias por accesorios en la tubería.** Las perdidas secundarias se determinan con la ecuación:

$$h_{accesorios} = \frac{k * V^2}{2 * g} \quad (45)$$

Dónde:

$k$  = factor asociado a cada accesorio a utilizar

$V$  = Velocidad del agua entrante (m/s)

$g$  = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

En el proyecto las pérdidas secundarias se producirán por:

- Conexión tubería con cámara de descarga  $k_1$
- En válvulas  $k_2$
- Acoplamientos de la tubería de presión  $k_3$
- Reducción de la tubería  $k_4$
- Codos  $k_5$
- 

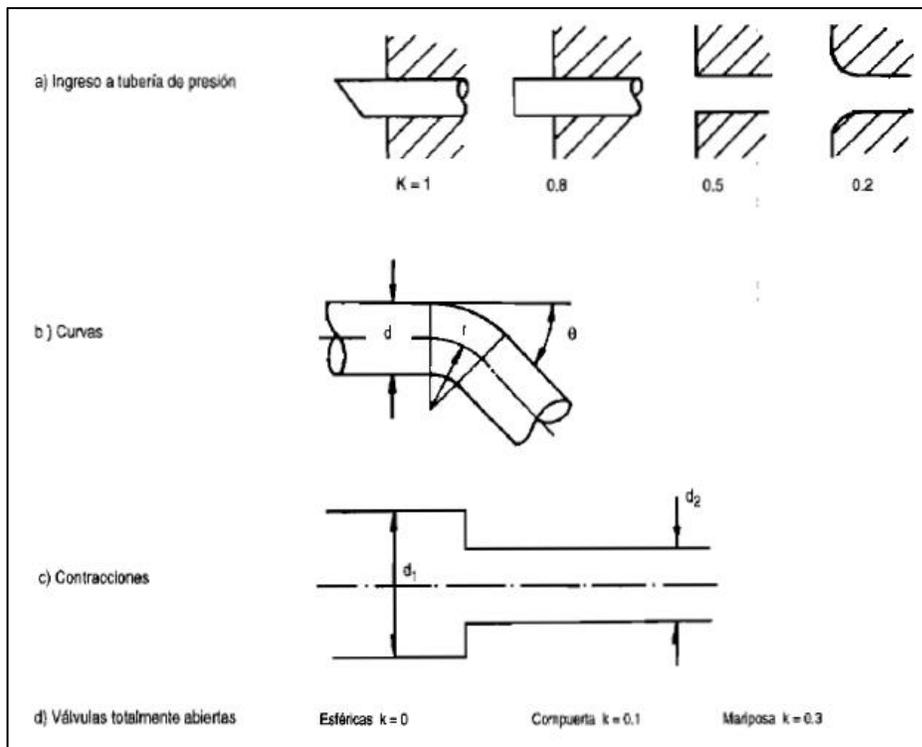
*Pérdidas por conexión tubería con cámara de descarga:*

Se asume un  $k$  de 0,2 según el ingreso a tubería de presión como se muestra en la Figura 11.

$$h_{k1} = \frac{k_1 * V^2}{2 * g}$$

$$h_{k1} = 0,017 \text{ m}$$

Figura 11. Coeficiente de Pérdidas



Fuente. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995.

*Perdidas en las válvulas:*

Se asume un k de 0,1 teniendo en cuenta que las válvulas son de compuerta y están totalmente abiertas como se muestra en la Figura 11

$$h_{k2} = \frac{k_2 * V^2}{2 * g}$$

$$h_{k2} = 0,008 \text{ m}$$

*Perdidas por acoplamiento de la tubería de presión:*

Se asume un k de 0,2 según el ingreso a tubería de presión como se muestra en la Figura 11.

$$h_{k3} = \frac{k_3 * V^2}{2 * g}$$

$$h_{k3} = 0,250 \text{ m}$$

*Perdidas por codos a 45° en la instalación:*

Para el factor d pérdida del codo a 45° se tiene en cuenta la siguiente tabla:

Tabla 19. Valor del coeficiente k para diversos accesorios

Accesorio	Valor de K
Valvula esferica, totalmente abierta	10
Valvula de angulo, totalmente abierta	5
Valvula de retencion de charneta	2,5
Valvula de pie con colador	0,8
Valvula de compuerta, totalmente abierta	0,19
Codo de retroceso (codo en U)	2,2
Empalme en T normal	1,8
Codo de 90° normal	0,9
Codo de 90° de radio medio	0,75
Codo de 90° de radio grande	0,6
Codo de 45°	0,42

Fuente. Fluidos 6. Perdidas de carga en conducciones, José Agüera Soriano, 2011. <https://www.slideshare.net/DiegoLokhito/fluidos-6-perdidas-de-carga-en-conducciones>

$$h_{k4} = \frac{k_4 * V^2}{2 * g}$$

$$h_{k4} = 0,140 \text{ m}$$

Se realiza la sumatoria de los valores de las pérdidas que se producen en cada uno de los accesorios:

$$h_{\text{accesorios}} = h_{k1} + h_{k2} + h_{k3} + h_{k4}$$

$$h_{\text{accesorios}} = 0,415 \text{ m}$$

**9.7.3.3. Calculo de las pérdidas totales.** Las pérdidas totales se calculan sumando las perdidas primarias y secundarias mediante la siguiente ecuación:

$$H_{PT} = h_{\text{friccion}} + h_{\text{accesorios}} \quad (46)$$

Dónde:

$$H_{PT} = \text{Pérdidas totales (m)}$$

$$h_{\text{friccion}} = \text{Pérdidas primarias (m)}$$

$$h_{\text{accesorios}} = \text{Pérdidas secundarias (m)}$$

$$H_{PT} = 0,491 \text{ m} + 0,415 \text{ m}$$

$$H_{PT} = 0,906 \text{ m}$$

**9.7.3.4. Calculo del porcentaje de pérdidas.** Se calculan con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{100 * H_{PT}}{H_S} \quad (47)$$

Dónde:

$$H_{PT} = \text{Pérdidas totales (m)}$$

$$H_S = \text{Altura Neta (m)}$$

Se recomienda que el porcentaje de pérdidas en una tubería este entre 3% y 11%, de lo contrario se procederá a seleccionar un diámetro mayor.

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{100 * 0,906 \text{ m}}{8 \text{ m}} = 11,33 \%$$

Debido a que no cumple con la recomendación anteriormente expuesta, se deja aumenta el diámetro a 16 pulgadas (0,406 m). De esta manera los cálculos se resumen de la Tabla 20 a Tabla 24.

Tabla 20. Velocidad del agua en la tubería en el punto 2

Punto 2		
Q	m <sup>3</sup> /s	0,127
d	m	0,406
V	m/s	0,979

Fuente. Autor

Tabla 21. Perdidas primarias en la tubería en el punto 2

<b>Punto 2</b>		
f	m	0,028
L	m	72,000
V	m/s	0,979
g	m/s <sup>2</sup>	9,81
d	m	0,406
$h_{friccion}$	m	0,243

Fuente. Autor

Tabla 22. Perdidas secundarias en la tubería en el punto 2

<b>Punto 2</b>		
Conexión Tubería-Cámara de Carga		
$h_1$	m	0,010
k		0,2
Válvulas		
$h_2$	m	0,005
k		0,1
Acoplamiento tubería		
$h_3$	m	0,147
k		0,2
Codos 45°		
$h_4$	m	0,082
k		0,42
$h_{accesorios}$	m	0,243

Fuente. Autor

Tabla 23. Pérdidas Totales en la tubería en el punto 2

<b>Punto 2</b>		
$h_{friccion}$	m	0,243
$h_{accesorios}$	m	0,243
$H_{PT}$	m	0,486

Fuente. Autor

Tabla 24. Porcentaje de pérdidas en la tubería en el punto 2

Punto 2		
$H_{PT}$	m	0,486
$H_S$	m	8
%Perdidas	%	6,08

Fuente. Autor

## 9.8 SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE DERIVACIÓN

Para seleccionar cuál de los tres puntos se tienen cuenta la potencia calculada con la altura útil de cada punto, además del porcentaje de perdidas: La potencia se halla con la siguiente formula:

$$P = Q * H_N * \rho * g \quad (48)$$

Dónde:

$P =$  Potencia (KW)

$Q =$  Caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$H_N =$  Altura Util (m)

$\rho =$  Densidad del agua ( $Kg/m^3$ ) (Vease Tabla 8)

$g =$  Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$$H_N = H_S - H_{PT} \quad (49)$$

Dónde:

$H_S =$  Altura Neta (m)

$H_{PT} =$  Pérdidas totales (m)

Tabla 25. Potencia calculada para el punto 1.

1 Punto		
Q	$m^3/s$	0,127
$H_N$	m	8,432
$\rho$	$Kg/m^3$	999,19
g	$m/s^2$	9,81
P	KW	10,46

Fuente. Autor

Tabla 26. Potencia calculada para el punto 2.

2 Punto		
Q	m <sup>3</sup> /s	0,127
H <sub>N</sub>	m	7,514
ρ	Kg/m <sup>3</sup>	999,19
g	m/s <sup>2</sup>	9,81
P	KW	9,32

Fuente. Autor

Tabla 27. Potencia calculada para el punto 3

3 Punto		
Q	m <sup>3</sup> /s	0,105
H <sub>N</sub>	m	8,447
ρ	Kg/m <sup>3</sup>	999,19
g	m/s <sup>2</sup>	9,81
P	KW	8,65

Fuente. Autor

Como se puede observar en las tablas anteriores, el punto donde más se genera potencia es el punto 1, sin embargo, es el punto donde más se producen pérdidas en la tubería (Anexo 4), aun así, el punto 1 que es donde se producen menos pérdidas, no genera tanta potencia, por lo tanto, el punto óptimo es el punto 2.

## 9.9 CASA DE MÁQUINAS

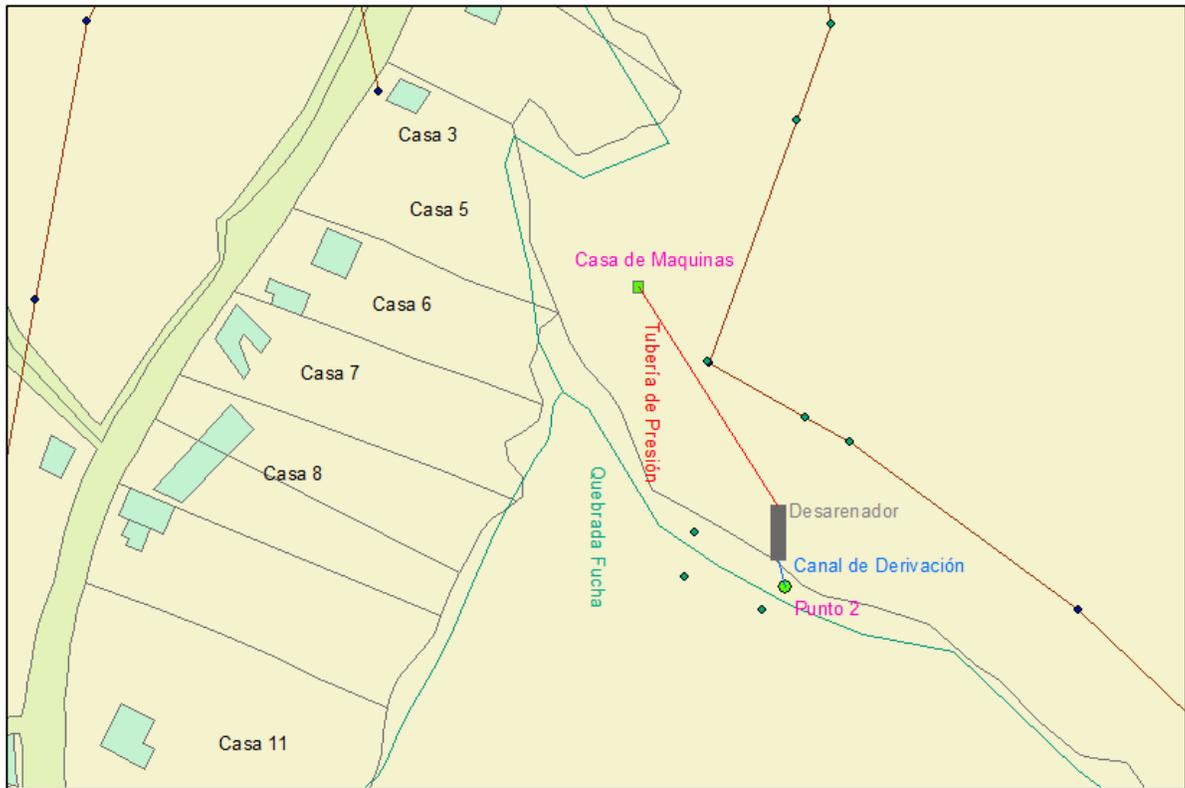
Para el buen funcionamiento de la PCH es importante tener en cuenta la ubicación de la casa de máquinas, además de tener en cuenta los siguientes aspectos según Ramiro Ortiz (Ortiz Flórez, 2011):

- En general la casa de máquinas se debe colocar cercaba al afluente al cual se le entregara el agua turbinada. Teniendo en cuenta que en el canal de desagüe o se depositen sedimentos que disminuyan su sección.
- Es importante destacar que la casa de máquinas, se ubique en una zona con terrenos estables y que esté fuera del alcance de riadas, ya que estas puede depositar una cantidad de sedimentos en el canal de desagüe o en caso extremo afectar la casa de máquinas.
- Tener facilidades internas como externas, tales como: prever una posible ampliación, tener facilidad de acceso y facilidad de adquirir terrenos.
- Un factor importante en la ubicación de la casa de máquinas, es que la disposición de los equipos armonice con el paisaje exterior.

El diseño de la casa de máquinas se puede normalizar en función de la posición del eje del grupo turbina-generator; este puede ser horizontal o vertical.

El terreno que se tiene dispuesto para la casa de máquinas tiene un área de 667 m<sup>2</sup> como se ve en la figura 12, teniendo en cuenta las recomendaciones anteriores y las dimensiones de la turbina y el generador, se recomienda que el área de la casa de máquinas sea de 9 m<sup>2</sup> con dimensiones de 3 m de ancho por 3 m de largo y estructura de concreto.

Figura 12. Ubicación de la casa de máquinas



Fuente. Autor

### 9.10 CANAL DE DESCARGA

El canal de descarga se realiza con el fin que el fluido utilizado por la turbina pueda ser devuelto al canal principal para no afectar el entorno aguas debajo de la casa de máquinas, este se diseña teniendo en cuenta el Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995.

El área del canal de descarga se determina con la ecuación (4):

$$A = \frac{0,127m^3/s}{0,324 m/s}$$

$$A = 0,392 m^2$$

Las dimensiones del canal se obtienen de la ecuación (7):

$$A = 0,65m * 0,60m = 0,39 m^2$$

Las dimensiones del canal son:

- Altura del canal      60cm
- Base del canal        65cm

Al igual que el canal de conducción, se recomienda que este canal sea revestido en concreto

**9.10.1 Espesor del canal de derivación.** El espesor mínimo de la pared del canal se calcula con la ecuación (9):

$$e = 0,10 * 0,6$$
$$e = 0,06 m$$

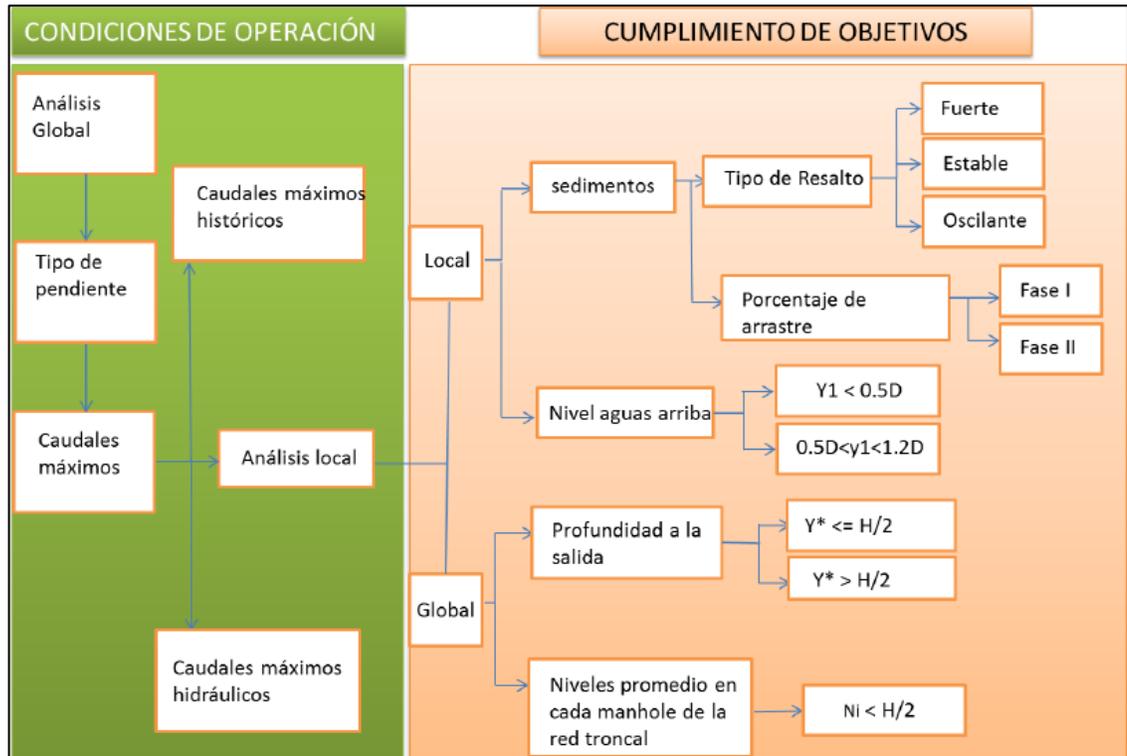
Se recomienda que el espesor mínimo de las paredes del canal este entre 5 cm y 7,5 cm para acomodar el concreto, por lo cual este espesor de 0,06 m cumple con el criterio.

## 9.11 PROTOCOLO DEL SISTEMA DE COMPUERTAS

Como se mencionó en los enunciados 9.4 y 9.5 las compuertas son los sistemas que regulan la entrada del agua al sistema, en este caso se recomienda implementar compuertas de desplazamiento vertical ascendente una antes de la derivación y otra a la entrada del canal de conducción, esto con el objetivo del lavado de sedimentos (que se obtendría a partir de un porcentaje de apertura de la compuerta) y de la verificación de los niveles de caudal aguas arriba de la compuerta (no pueden ser mayores a 1,2 veces el diámetro ya que esto produce posibles sobrecargas en el sistema) .

Existe un procedimiento para el análisis de este protocolo, el cual se muestra en la siguiente figura:

Figura 13. Esquema de operación con compuertas



Fuente. Protocolo de Operación Hidráulica con Compuertas en Alcantarillados. Córdoba Romero, Henry Alberto - Bogotá, 2012

Cada uno de los caudales indica si es posible una operación, se analiza a nivel local, esto corresponde al análisis de los tipos de resalto con el cual se analiza el comportamiento de la compuerta, su modo de operación, la cantidad de lavado de sedimentos y la profundidad aguas arriba, que se genera con la compuerta.

En este caso se realiza el análisis local con caudales, teniendo en cuenta que se tiene un comportamiento de flujo subcrítico, con un porcentaje de apertura MEDIO, el cual está entre 40% y 60% de la profundidad de la compuerta. A partir de la descripción realizada y la Figura 13 se especifican las siguientes condiciones, como se muestra en la Tabla 28.

Cuando existe pendientes subcríticas la compuerta puede ser operada para regular los niveles aguas arriba del sistema con caudales menores al 75% de los caudales, de esta forma cumple con las condiciones admisibles; logrando un lavado de sedimentos que llegaría hasta el 50% del arrastre de sedimentos generando niveles de agua por debajo de la mitad de los tramos del sistema, cumpliendo los objetivos de operación especificados. (Córdoba Romero, 2012). De esta manera, las estructuras de la PCH generan un porcentaje de arrastre de

sedimento entre 11,33 y 5,2, y un nivel aguas arriba de la compuerta mayor a la profundidad de los canales, teniendo un lavado critico (Véase Tabla 28).

Tabla 28. Reglas de operación para caudales máximos - pendiente subcrítica

PORCENTAJE DE APERTURA DE COMPUERTA			BAJO	MEDIO	ALTO
Condiciones					
Q trans hist	Q <sub>máx</sub>	1	<b>Fuerte-Estable-Oscilante</b>	<b>Oscilante-Débil</b>	<b>Ondulante-Crítico</b>
		2	(75,6 - 1,0)%	(0 - 1,0)%	(0 - 1,0)%
		3	y <sub>1</sub> >1,2D	0,5D>y <sub>1</sub> >1,2D	y <sub>1</sub> <D
	(0-25)% Q <sub>máx</sub>	1	<b>Fuerte a Ondulante</b>	<b>Crítico</b>	<b>Crítico</b>
		2	(38,8 - 0,11)%	(0,8 - 0,10)%	(0 - 0,07)%
		3	y <sub>1</sub> >0,5D	y <sub>1</sub> <D	y <sub>1</sub> <D
	(26-50)% Q <sub>máx</sub>	1	<b>Fuerte a Ondulante</b>	<b>Crítico</b>	<b>Crítico</b>
		2	(40 - 4,8)%	(4,5 - 2,8)%	(0 - 2,7)%
		3	y <sub>1</sub> >0,5D	y <sub>1</sub> <D	y <sub>1</sub> <D
	(51-75)% Q <sub>máx</sub>	1	<b>Fuerte a Ondulante</b>	<b>Crítico</b>	<b>Crítico</b>
		2	(50 - 0,15)%	(14 - 5,3)%	(0 - 4,5)%
		3	y <sub>1</sub> >0,5D	0,5D>y <sub>1</sub> >1,2D	y <sub>1</sub> <D
Q hid	Q <sub>máx</sub>	1	<b>Fuerte a Ondulante</b>	<b>Crítico</b>	<b>Crítico</b>
		2	(100 - 11)%	(11,09 - 10)%	(10 - 0)%
		3	y <sub>1</sub> >1,2D	0,5D>y <sub>1</sub> >1,2D	y <sub>1</sub> <D
	(0-25)% Q <sub>máx</sub>	1	<b>Fuerte a Ondulante</b>	<b>Crítico</b>	<b>Crítico</b>
		2	(40,5 - 1,1)%	(1,05 - 1,02)%	(1 - 0)%
		3	y <sub>1</sub> >1,2D	y <sub>1</sub> <D	y <sub>1</sub> <D
	(26-50)% Q <sub>máx</sub>	1	<b>Fuerte a Ondulante</b>	<b>Crítico</b>	<b>Crítico</b>
		2	(60,3 - 11,3)%	(11,33 - 5,2)%	(5,1 - 0)%
		3	y <sub>1</sub> >1,2D	y <sub>1</sub> <D	y <sub>1</sub> <D
	(51-75)% Q <sub>máx</sub>	1	<b>Fuerte a Ondulante</b>	<b>Crítico</b>	<b>Crítico</b>
		2	(76,1 - 11)%	(11,09 - 10)%	(10 - 0)%
		3	y <sub>1</sub> >1,2D	0,5D>y <sub>1</sub> >1,2D	y <sub>1</sub> <D
		Niveles de Apertura	BAJO	y <sub>2</sub> <40%	
			MEDIO	40%<y <sub>2</sub> <60%	
			ALTO	y <sub>2</sub> >60%	
1	Lavado= Tiene 6 tipos de comportamiento; Fuerte, Estable, Oscilante, Débil, Ondulante, Crítico				
2	Porcentaje de arrastre de sedimentos= Porcentaje de arrastre con una determinada apertura (%)				
3	Niveles aguas arriba de la compuerta= Niveles en los tramos hacia aguas arriba del sistema (m) (y <sub>1</sub> <D, D<y <sub>1</sub> <1,2D, y <sub>1</sub> >1,2D)				

Fuente. Protocolo de Operación Hidráulica con Compuertas en Alcantarillados.  
Córdoba Romero, Henry Alberto - Bogotá, 2012

## 10. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LA TURBINA HIDRÁULICA

La turbina hidráulica extraerá energía del agua transportada y la convertirá en energía mecánica que activará el generador para crear energía eléctrica. Las eficiencias del sistema varían entre 65 % y 80% dependiendo del estilo y diseño de la turbina (BT Ibrahim, 2012). Con los datos calculados y analizados en el proyecto, se procederá a la selección de equipos estandarizados de una gama de fabricantes en función de los siguientes parámetros:

- Caudal de diseño
- Altura útil
- Numero de revoluciones del eje

La altura útil y caudal de diseño, valores calculados anteriormente para el presente proyecto son:

$$H_N = 7,507 \text{ m}$$
$$Q = 0,127 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para calcular los parámetros de las turbinas reactivas se recomienda seguir la secuencia, propuesta por Centrales Hidroeléctricas, Tomas Ochoa Rubio, Colombia, 2002 (Ochoa Rubio, 2002)

### 10.1. POTENCIA NOMINAL DE LA TURBINA.

La potencia nominal de la turbina se determina con la ecuación (48):

$$P = 0,127 \text{ m}^3/\text{s} * 7,514 \text{ m} * 999,19 \text{ Kg}/\text{m}^3 * 9,81\text{m}/\text{s}^2$$

$$P = 9,32 \text{ KW}$$

### 10.2 POTENCIA MÍNIMA DE LA TURBINA.

Se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_{min} = \frac{P}{\eta_G} \quad (50)$$

Dónde:

$P$  = Potencia Nominal de la turbina (KW)

$\eta_G$  = Eficiencia del generador, que en calculos de prefactibilidad y factibilidad se puede tomar 0,96 a 0,97

$$P_{min} = \frac{9,32 \text{ KW}}{0,96}$$

$$P_{min} = 9,708 \text{ KW}$$

### 10.3 DIÁMETRO DEL RODETE DE LA TURBINA.

El diámetro del rodete de la turbina se calcula con la fórmula:

$$D = \sqrt{\frac{Q}{Q'_I * \sqrt{H_N}}} \quad (51)$$

Dónde:

$Q$  = Caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$Q'_I$  = Caudal unitario, el cual se toma de la Tabla 29 para la turbina elegida

$H_N$  = Altura Util (m)

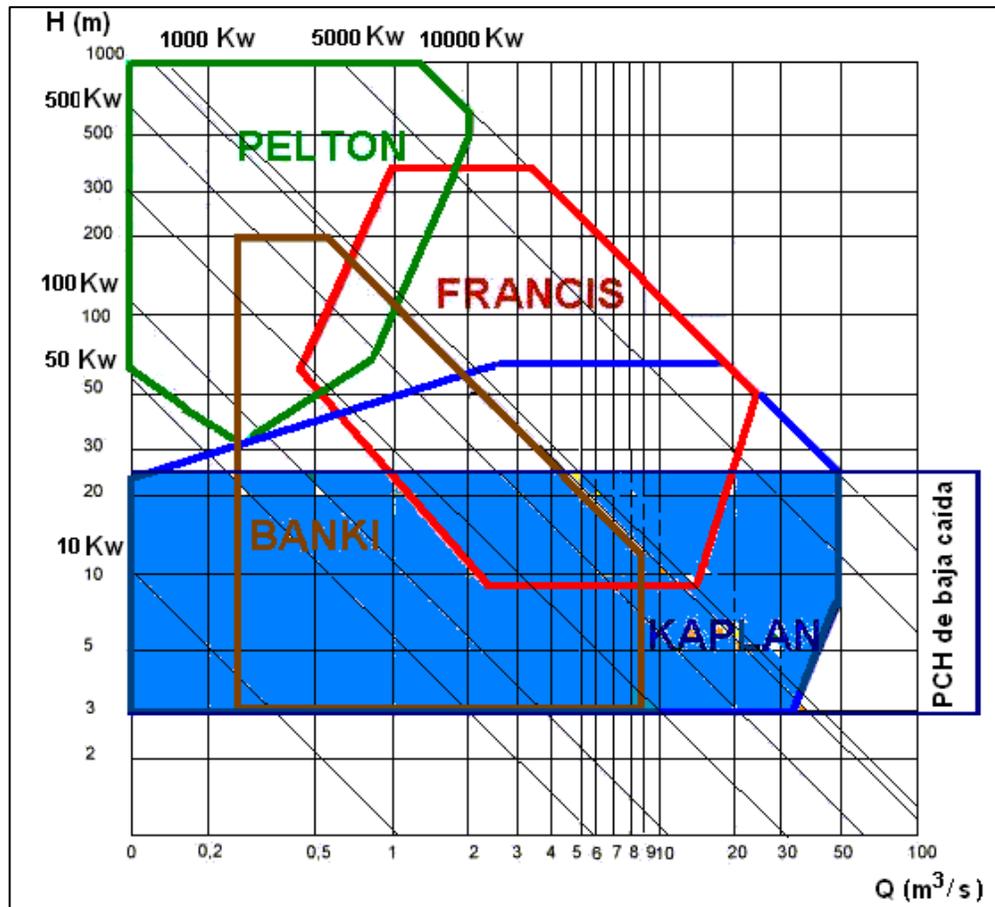
Tabla 29. Características de las turbinas modelo

$H_{min} - H_{max}$ (m)	Tipo de Turbinas	Numeros de alabes del rodete	Velocidad unitaria r.p.m		Caudal unitaria l.p.s		Coeficiente de Thoma		Velocidad unitaria de embalaje n'le
			n' optimo	n' de diseño	Q' max	Q' min	Q' max	Q' min	
3-10	K 10	4	165	180	2250	2010	1,400	1,400	380
5-15	K 15	4	150	160	2130	1850	1,000	0,840	365
10-20	K 20	4	138	152	2040	1710	0,835	0,680	240
15-30	K 30	5	125	140	1940	1430	0,745	0,505	312
20-40	K 40	6	115	130	1700	1240	0,680	0,400	290
30-50	K 50	7	110	120	1400	1110	0,505	0,325	275
40-60	K 60	8	106	112	1240	1040	0,400	0,270	270
45-70	K 70	8	103	107	1150	940	0,360	0,230	265
50-80	K 80	8	100	105	1075	830	0,325	0,205	260
30-45	F 45	11-15	75	78	1400	1370	0,270	0,230	160
40-75	F 75	11-15	73	74	1370	1250	0,243	0,160	146
70-115	F 115	11-15	68	72	1250	1030	0,168	0,097	139
110-170	F 170	13-15	67	69	1030	650	0,100	0,060	130
160-230	F 230	13-17	62	67	650	420	0,065	0,047	110
220-310	F 310	13-19	60	65	420	280	0,048	0,040	104
290-400	F 400	13-19	58	62	280	200	0,042	0,035	98
380-500	F 500	15-19	57	60	200	150	0,036	0,030	95

K - Kaplan; F - Francis

Fuente. Centrales Hidroeléctricas, Tomas Ochoa Rubio, Colombia, 2002  
 Para seleccionar la turbina se tiene en cuenta la altura mínima y máxima para la cuales debe operar la turbina, teniendo en cuenta la altura de diseño, siendo 7, 507 m, como se observa en la Tabla 29. Además en la Figura 14, se puede observar que la turbina adecuada para este diseño es la Kaplan.

Figura 14. Diagrama para la selección de turbinas hidráulicas



Fuente. Dimensionamiento de pequeñas centrales hidroeléctricas, Ramiro Ortiz Flórez, Universidad del Valle  
<http://shplab.univalle.edu.co/documentos/Dimensionamiento%20PCH.pdf>

$$D = \sqrt{\frac{0,127 \text{ m}^3/\text{s}}{2,01 \text{ m}^3/\text{s} * \sqrt{7,514 \text{ m}}}}$$

$$D = 0,152 \text{ m}$$

El valor obtenido del diámetro del rodete, se redondea hasta el valor superior más cercano de la serie de diámetros estándar de rodetes de turbinas de la Tabla 30.

Tabla 30. Tabla para seleccionar el diámetro estándar del rodete

D (cm)
180
200
225
250
280
320
360
400
450
500
550
600
650
700
750
800
850
900
950
1000
1050

Fuente. Centrales Hidroeléctricas, Tomas Ochoa Rubio, Colombia, 2002

#### 10.4 VELOCIDAD NOMINAL DE GIRO.

La velocidad nominal de giro de una turbina se determina con la siguiente ecuación:

$$n_I = \frac{n'_I * \sqrt{H_N}}{D} \quad (52)$$

Dónde:

$n'_I$  = Velocidad unitaria, que se toma de la Tabla 29 para la turbina elegida

$H_N$  = Altura Util (m)

$D$  = Diametro del rodete (m)

$$n_I = \frac{180 * \sqrt{7,514 \text{ m}}}{1,8 \text{ m}}$$

$$n_I = 274,117 \text{ r.p.m}$$

#### 10.5 VELOCIDAD SINCRÓNICA.

Una turbina debe girar con una velocidad igual a la del generador ya que se encuentran unidos por el mismo eje. Esta velocidad se llama sincrónica y debe ser lo más cercana posible a la velocidad nominal calculada anteriormente. La velocidad sincrónica es:

$$n = \frac{60 * f}{P} \quad (53)$$

Dónde:

$f$  = frecuencia de la corriente alterna

$P$  = número de pares polos del rotor del generador

En los países del continente americano (incluida Colombia y excluyendo a Paraguay) y en África (exceptuando Egipto), lo mismo que en la mayoría de los países asiáticos y en Oceanía, la frecuencia es  $f= 60$  Hertz.

El número de pares polos de rotor del generador  $p$  se toma de la Tabla 31. La velocidad de rotación de los rotores de los generadores se encuentra entre 50 y 750 rpm

Tabla 31. Valores aconsejables para el número de pares de polos

P	P	P	P
6	28	56	96
8	(30)	60	100
10	32	64	104
12	36	68	108
14	(38)	72	112
(16)	40	(74)	116
(18)	44	(76)	120
20	46	80	128
22	48	(84)	136
24	(50)	88	144
(26)	52	92	150

Fuente. Centrales Hidroeléctricas, Tomas Ochoa Rubio, Colombia, 2002

Por lo tanto reemplazando los datos:

$$n = \frac{60 * 60}{6}$$

$$n = 600 \text{ rpm}$$

Dado que la velocidad real de la turbina es la sincrónica y  $n$  la nominal, se debe recalcular el valor del diámetro del rodete  $D$  en función de la velocidad sincrónica, con la fórmula:

$$D = \frac{n'_I * \sqrt{H_N}}{n} \quad (54)$$

Dónde:

$n'_I =$  Velocidad unitaria, que se toma de la Tabla 29

$H_N =$  Altura Util (m)

$n =$  velocidad sincrónica (rpm)

$$D = \frac{180 * \sqrt{7,514 \text{ m}}}{600}$$

$$D = 0,822 \text{ m}$$

De nuevo, se toma el diámetro estándar más cercano, de acuerdo a la Tabla 30.

## 10.6. VELOCIDAD DE EMBALAJE.

Si se desconecta la unidad (generador y turbina) de la red eléctrica, sin cerrar Los alabes dl distribuidor, esta empezara a elevar su velocidad de rotación, la cual, después de cierto tiempo, alcanzara su máximo valor llamado velocidad de embalaje, la cual se calcula con la fórmula:

$$n_e = n'_I_e \frac{\sqrt{H_N}}{D} \quad (55)$$

Dónde:

$H_{max} =$  Altura Maxima, tomada de la Tabla 29 (m)

$D =$  Diámetro estándar del rodete de la turbina (m)

$n'_I_e =$  Velocidad unitaria de embalaje, se toma de la Tabla 29

$$n_e = (380) \frac{\sqrt{10 \text{ m}}}{1,8 \text{ m}}$$

$$n_e = 667,592 \text{ rpm}$$

## 10.7 VELOCIDAD ESPECÍFICA DE LA TURBINA.

Dado que la velocidad especifica depende de la potencia, de la velocidad nominal de rotación y de la caída y cambia su valor al variar estos parámetros, al comparar

turbinas del mismo tipo de acuerdo con a velocidad específica, se debe hacer para regímenes de operación iguales. Generalmente, la velocidad específica se determina para la potencia nominal, la caída de diseño y la velocidad nominal de rotación. De tal manera, la velocidad específica será:

$$n_s = \frac{1,167n \sqrt{P}}{H_N \sqrt[4]{H_N}} \quad (55)$$

Dónde:

$n$  = velocidad nominal (sincrónica) de rotación, (rpm)

$P$  = Potencia Nominal de la turbina (KW)

$H_N$  = Altura Util (m)

$$n_s = \frac{1,167(600 \text{ rpm}) \sqrt{9,32 \text{ KW}}}{(7,514 \text{ m}) \sqrt[4]{(7,514 \text{ m})}}$$

$$n_s = 171,827 \text{ rpm}$$

## 10.8 DIMENSIONES DE LA TURBINA.

La dimensiones de una turbina dependen del valor del diámetro el rodete  $D$  y del tipo de turbina escogido de acuerdo con la caída y la potencia.

Conociendo el valor del diámetro del rodete  $D$ , se determinan las demás dimensiones de la turbina en función de este valor, utilizando los datos de la Tabla 32, teniendo en cuenta la Figura 15.

Tabla 32. Valores de las dimensiones de las turbinas Kaplan con respecto al diámetro del rodete (véase Figura 15)

Dimensiones	Tipos de Turbinas										
	K 10	K 15	K 20	K 30		K 40		K 50		K 60	K 80
Z	4	4	4	5	6	6	7	7	8	8	8
$b_0/D$	0,45	0,45	0,4	0,4	0,375	0,375	0,375	0,375	0,35	0,35	0,35
$d_{BT}/D$	0,33	0,35	0,37	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,54	0,6
$d_1/D$	0,28	0,3	0,32	0,36	0,38	0,4	0,42	0,44	0,46	0,49	0,55
$R_0/D$	0,36	0,35	0,34	0,32	0,31	0,3	0,29	0,28	0,27	0,25	0,22
$K_1/D$	0,31	0,33	0,35	0,4	0,42	0,44	0,46	0,48	0,5	0,54	0,6
$K_2/D$	0,087	0,09	0,093	0,098	0,1	0,103	0,105	0,108	0,11	0,113	0,12
$R_1/D$	0,315	0,338	0,36	0,406	0,43	0,453	0,477	0,52	0,52	0,56	0,635
$h_1 = 0,2085D$ ; $d = 0,1D$											

Fuente. Centrales Hidroeléctricas, Tomas Ochoa Rubio, Colombia, 2002

Reemplazando el diámetro en cada una de las dimensiones:

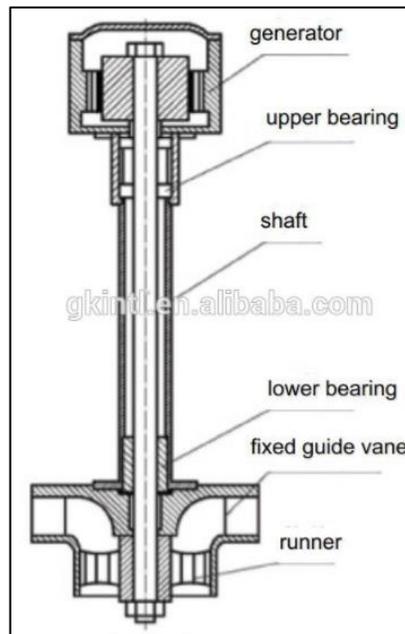
Tabla 33. Dimensiones de la turbina Kaplan seleccionada

Dimensiones (m)		
Ecuación	Coficiente	Valor
Z	4	4
$b_0/D$	0,45	0,250
$d_{BT}/D$	0,33	0,183
$d_1/D$	0,28	0,156
$R_0/D$	0,36	0,200
$K_1/D$	0,31	0,172
$K_2/D$	0,087	0,048
$R_1/D$	0,315	0,175
$h_1$	0,2085	0,375
d	0,1	0,180

Fuente. Autor

A continuación se presenta el modelo de la turbina KAPLAN

Figura 15. Modelo de la turbina KAPLAN



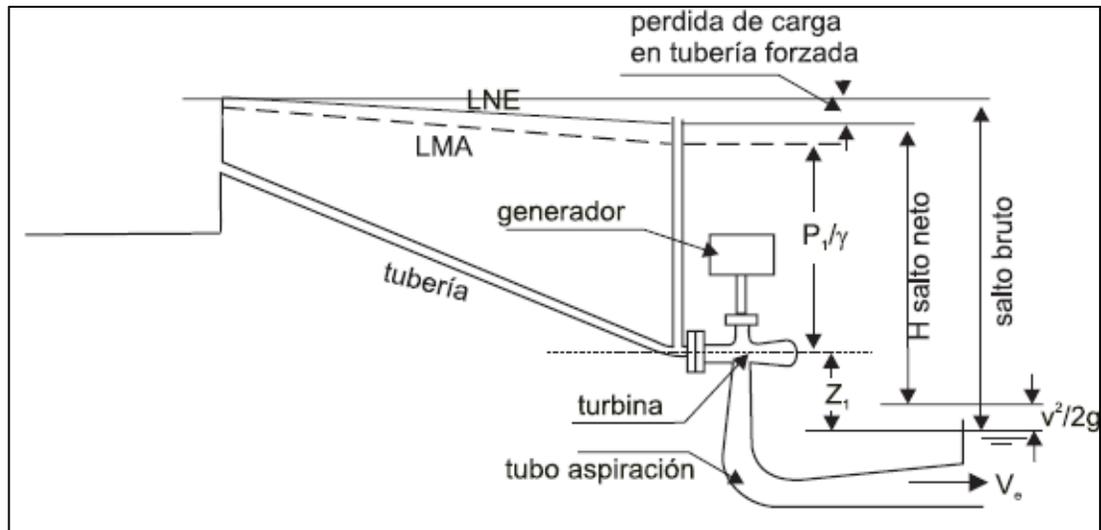
Fuente. Micro hydro turbine Kaplan, <https://spanish.alibaba.com/product-detail/micro-hydro-kaplan-turbine-60381399498.html?spm=a2700.8699010.29.181.445f146e8WBMeh>

## 11. GENERACIÓN, TRANSMISIÓN Y CONTROL DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

### 11.1 SISTEMA DE GENERACIÓN

En la figura que se encuentra a continuación se muestra el sistema de generación de energía:

Figura 16. Esquema del sistema generador de energía



Fuente. Manual de pequeña hidráulica, Dirección general de energía, 1998

#### 11.1.1 Selección del sistema generador

Para la selección del generador de energía se tiene en cuenta los siguientes parámetros según Claudio Mataix (Mataix, 1986):

##### 11.1.1.1 Potencia transmitida por el agua al rodete

Como se observa en la Tabla 26 la potencia transmitida por el agua es:

$$P = 9,32 \text{ KW}$$

##### 11.1.1.2 Rendimiento hidráulico de la turbina:

Se determina con base en la altura útil y la altura total, utilizando la siguiente ecuación:

$$\eta_h = \frac{H_N}{H_S} \quad (56)$$

Dónde:

$H_N = \text{Altura Útil}$   
 $H_S = \text{Altura Total}$

$$\eta_h = \frac{7,514 \text{ m}}{8 \text{ m}}$$

$$\eta_h = 93,93\%$$

### 11.1.1.3 Rendimiento Total

Se obtiene del producto entre el rendimiento mecánico y el rendimiento hidráulico como se muestra a continuación:

$$\eta_T = \eta_m * \eta_h \quad (57)$$

Dónde:

$\eta_T = \text{Rendimiento Total (\%)}$   
 $\eta_m = \text{Rendimiento mecánico (\%)}$   
 $\eta_h = \text{Rendimiento hidráulico (\%)}$

$$\eta_T = 0,7 * 0,939$$

$$\eta_T = 65,75\%$$

Además de tener en cuenta el rendimiento total del generador se recomienda tener en cuenta los siguientes criterios:

- Nivel de voltaje
- Potencia a generar
- Numero de revoluciones
- Tipo de acoplamiento entre turbina y el generador
- En pequeñas centrales se recomienda el uso de generadores asíncronos

### 11.1.2 Tipos de generadores

El generador tiene como misión transformar en energía eléctrica la energía mecánica suministrada por la turbina. En un principio se utilizaban generadores de corriente continua; actualmente, solo se utilizan alternadores trifásicos de corriente alterna. En función de la red que debe alimentar (Dirección General de Energía, 1998), el proyectista puede escoger entre generadores síncronos y asíncronos. Los generadores síncronos tienen la capacidad de establecer su propio voltaje de funcionamiento y de mantener la frecuencia mientras se encuentra funcionando en

condiciones aisladas a la red eléctrica nacional y los generadores asíncronos se utilizan solamente cuando las condiciones y la economía del sistema lo permite (Amaya Chicas, Hernandez Gordiano, & Villegas Cabrera, 2009).

En el caso de este proyecto el tipo de generador que se recomienda es el asíncrono, porque este evita las pérdidas en el motor, lo que hace que el sistema constantemente suministre de energía a la vivienda.

### **11.1.3 Disposición del generador con respecto a la turbina**

Los generadores pueden ser de eje horizontal o de eje vertical, independientemente de cuál sea el tipo o configuración de turbina utilizada, pero por regla general los generadores adoptan la misma configuración que la turbina. En las turbinas Kaplan dispuestas en ángulo se utiliza a veces, para aprovechar mejor el espacio disponible (Dirección General de Energía, 1998)

Al comparar los generadores anteriores considerando el regulador de excitación, se debe recordar que la masa y el costo de los condensadores en algunos casos suele ser significativamente mayor que el regulador de excitación del síncrono. Los condensadores deben suministrar una corriente de magnetización en el generador asíncrono igual al 25-35 % de la nominal para generadores de potencias relativamente grandes y del 70% para generadores de potencias hasta 1KW (Ortiz Flórez, 2011).

Para una frecuencia de 60Hz y una velocidad de 3600 rpm la masa total del generador asíncrono y el regulador de tensión es más pequeña que la del generador síncrono. Para velocidades menores se disminuye el factor de potencia y la utilización de generadores asíncronos no suele ser económica. La eficiencia de los generadores asíncronos y los síncronos incluido el regulador de excitación es prácticamente igual. Debemos recordar la gran confiabilidad que ofrecen los asíncronos, la cual es una consideración especial para generadores de grandes velocidades (Ortiz Flórez, 2011).

## **11.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN**

Los sistemas de transmisión se emplean para transmitir la potencia mecánica proporcionada por el eje del motor hacia el conducido, los cuales se encuentran separados entre sí por una cierta distancia. En una PCH, se produce una continua conversión de energía hidráulica en energía mecánica en la turbina y de energía mecánica en energía en el generador.

### **11.2.1 Elementos de un sistema de transmisión de potencia mecánica**

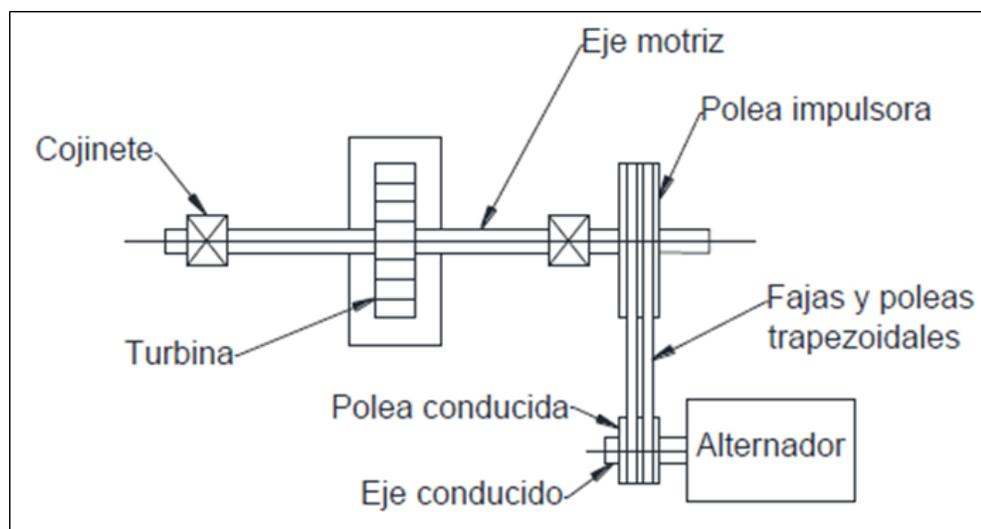
En todo sistema de transmisión de movimiento y potencia mecánica se pueden distinguir fundamentalmente dos tipos de elementos (Coz, Sánchez, & Viani, 1995):

- Elemento conductor motriz
- Elemento conducido

De una manera más específica los elementos mecánicos involucrados en una transmisión serán, como se ve en la Figura 17:

- Una rueda impulsora
- Una rueda conducida
- Ejes que soportan las ruedas y giran con ellas
- Soportes de los ejes (cojinetes de rodamiento o deslizamiento)
- Acoplamientos

Figura 17. Esquema del sistema de transmisión



Fuente. Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, ITDG-Perú, 1995.

### 11.2.2 Tipos de transmisiones

Existen varios tipos de transmisiones mecánicas, se indicaran las más importantes (Coz, Sánchez, & Viani, 1995):

*Transmisiones flexibles por fajas, que pueden ser*

- Planas
- Trapezoidales o en V
- Dentadas

*Transmisiones flexibles por cadena de rodillos, que pueden ser:*

- Simples
- Múltiples

*Transmisiones por ruedas de fricción, que pueden ser:*

- Cilíndricas de ejes paralelos
- Cilíndricas de ejes transversales
- Cónicas

*Transmisiones por engranajes, las que pueden ser*

- Cilíndricas de dientes rectos
- Cilíndricas de dientes helicoidales
- Cónicos de dientes rectos
- Cónicos de dientes espirales
- Tornillo sin fin con rueda dentada

### **11.2.3 Comparación entre sistemas de transmisión**

A continuación se presentan las características más relevantes de los principales sistemas de transmisión según (Coz, Sánchez, & Viani, 1995):

#### **11.2.3.1 Transmisiones por fajas**

En ellas la capacidad de transmisión de potencia depende de la fricción entre la faja y las ruedas que, a su vez, depende del coeficiente de rozamiento y del ángulo de contacto de la faja con la polea menor (Coz, Sánchez, & Viani, 1995).

*Ventajas*

- Posibilidad de unir el árbol conductor con el conducido, dispuestos a distancias relativamente grandes
- Debido a que la transmisión es por fricción, en caso de sobrecargas se produce resbalamiento entre faja y poleas, lo que protege a otros elementos de la transmisión y a los equipos involucrados.
- Sencillez y costo inicial relativamente bajo

*Desventajas*

- En caso de bajas velocidades, su empleo se limita a pequeñas potencias, ya que si las potencias fueran grandes, el número de fajas y las dimensiones exteriores serían desproporcionadamente altas
- Duración relativamente baja (entre los límites desde 1000 hasta 5000 horas)
- Normalmente se producen grandes cargas sobre los ejes y apoyos y, por consiguiente, considerables pérdidas de potencia.

### **11.2.3.2 Transmisiones por cadena de rodillos**

Son transmisores que tienen flexibilidad pues están constituidas por articulaciones de eslabones metálicos que, al entrar en contacto con los dientes de las ruedas, permiten una transmisión sincronizada (Coz, Sánchez, & Viani, 1995).

#### *Ventajas*

- Es posible transmitir movimientos a varios ejes con una misma cadena
- Se consiguen eficiencias relativamente altas (98%)
- Se originan menores cargas sobre los ejes con respecto a los casos de fajas

#### *Desventajas*

- Requerimientos de sistemas de lubricación e caos de grandes velocidades y cargas
- En caso de cambio las cadenas quedan inutilizables debido al estiramiento sufrido
- Cierta irregularidad en la velocidad y cargas sobre la rueda conducida durante el funcionamiento

### **11.2.3.3 Transmisiones por cadena de rodillos**

Las cajas reductoras de engranajes pueden significar una opción para la transmisión de movimiento entre el eje de la turbina y el generador, con las ventajas de ocupar poco espacio, originar menores pérdidas por fricción y evitar cargas fuertes en los cojinetes del generador. Los engranajes tienen la ventaja de poder adaptarse adecuadamente tanto a transmisiones de bajas velocidades como de altas. Su principal inconveniente es su costo mucho más elevado que las transmisiones por fajas como cadenas; asimismo, los trabajos de mantenimiento, relacionados mayormente con cambios de rodamientos de las cajas (Coz, Sánchez, & Viani, 1995).

## **11.3 SISTEMA DE CONTROL**

Las turbinas se diseñan para una altura de salto y un caudal predeterminados. Cualquier variación de estos parámetros debe compensarse abriendo o cerrando los dispositivos de control del caudal, tales como alabes, directrices, válvulas o compuertas, a fin de mantener constante, ya sea la potencia de salida a la red, el nivel de la lámina de agua en la toma o el caudal que atraviesa la turbina (Direcció General de Energía, 1998).

En aquellas centrales hidroeléctricas que no tienen un sistema de regulación de la velocidad, una variación en la demanda de energía inmediatamente producirá un cambio en la velocidad de giro de la turbina. Por lo tanto el alternador empezara a girar a otra velocidad diferente de la velocidad sincrónica, con la consecuente variación en la frecuencia y en el voltaje de la línea. Por ello, cuando se prevé que en el sistema existirán continuamente variaciones en la demanda, es necesario instalar algún sistema de compensación que mantenga constante la velocidad de la turbina (Cazorla Riera & Merizalde Salas, 2013). Existen básicamente dos maneras de controlar la velocidad del grupo generador:

Por regulación de caudal de agua en la turbina  
Por regulación de carga

### **11.3.1 Regulación de velocidad por medio del caudal de agua en la turbina**

Para obtener una velocidad constante del grupo generador, existiendo una demanda variable, es necesario que en todo momento la potencia disponible al ingreso del grupo generador, deba ser igual a la potencia eléctrica a la salida de este, más las pérdidas internas del grupo

$$Potencia\ ingreso = Potencia\ de\ salida + Pérdidas$$

Este equilibrio se logra regulando la cantidad de agua que ingresa a la turbina, de tal manera que si se produjera un aumento en la demanda, se abrirá una válvula que permite el mayor ingreso de agua a la turbina ocasionando que la potencia generada se iguale a la demanda (Cazorla Riera & Merizalde Salas, 2013). Existen dos maneras de realizar esta regulación:

- Manualmente
- Automáticamente

### **11.3.2 Regulación de velocidad por regulación de carga**

A diferencia de la regulación por caudal de agua, en la que todo momento la turbina regula el paso de agua con el fin de igualar la potencia generada con la demanda para mantener la velocidad de giro constante, en los sistemas de regulación de carga el grupo generador entrega una potencia constante: esto es,

no hay regulación de caudal de agua. No obstante, debe cuidarse que el grupo genere una potencia mayor o igual a la máxima potencia esperada en la demanda. El exceso de potencia generada se disipara en forma de calor a través de resistencia sumergida en agua o al aire. Esta regulación también se puede realizar de manera manual o automática, siendo esta última la más utilizada (Cazorla Riera & Merizalde Salas, 2013).

Para este proyecto se recomienda implementar un sistema de control de la velocidad del grupo generador por regulación por carga, porque este sistema permite una simplificación del diseño de las turbinas al no existir la necesidad de regular el caudal, no produce sobrepresiones en la tubería de presión debido a que está siempre trabajando a la misma presión y condiciones de servicio, mayor rapidez en la respuesta a cambios de carga, el tiempo de respuesta al 10% de la potencia nominal es de 250 milisegundos, además tiene un menor costo del sistema y la operación y mantenimiento son sencillos.

## 12. COSTOS

El costo de inversión e implementación de una PCH depende de diferentes factores como el tipo de terreno, el acceso a la zona, el tipo de instalación, el tamaño, la potencia a generar, el punto de conexión, entre otros. Además, hay que tener en cuenta las diferentes partes del proceso y los costos que implica cada una, sin embargo, en este caso se presentara el presupuesto desde la parte de pre factibilidad del proyecto. En la Tabla 34 se hace un desglose del presupuesto del proyecto haciendo una diferenciación en lo que pertenece a las obras civiles y a las obras electromecánicas tomando como referencia otros proyectos de similares características ya estudiados, además de la distribución porcentual de la inversión en una PCH, según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía:

Tabla 34. Distribución porcentual de la inversión en una PCH

<b>Componente</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
Grupo turbogenerador	30
Equipos Eléctricos, Regulación, Control y Línea	22
Ingeniería y Dirección de Obra	8
Obra Civil	40

Fuente: Minicentrales Hidroeléctricas, IDEA- Madrid, 2006

Para el costo de cada actividad se tiene en cuenta el precio unitario de esta, los precios del sistema hidráulico se tomaron de diferentes fuentes, así el precio del concreto, de la mampostería y de la excavación se toman del análisis de precios unitarios del Instituto Distrital de Recreación y Deporte (IDRD, 2016); para la tubería y los accesorios se tiene en cuenta la Lista de Precios de PAVCO (PAVCO, 2017) , para a cubierta se toma la lista de precios Bogotá de Eternit (Eternit, 2016); el precios de las compuertas se tomó del análisis económico del Estudio De Prefactibilidad Técnica Económica De Una Pico Central Hidroeléctrica Para La Hacienda Titaycun Parroquia La Matriz, Comunidad Titaycun Del Cantón Chambo (Cazorla Riera & Merizalde Salas, 2013)

Los precios del sistema energético, se tomaron principalmente de una cotización realizada por parte de la empresa IREM (IREM, 2017) y turbina hidráulica se encuentra disponible en la página de Alibaba (Alibaba, 2017).

De esta manera el costo total de la PCH se encuentra a continuación:

Tabla 35. Costo total del proyecto

ITEM	ACTIVIDAD		UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	SUBTOTAL
<b>COSTOS DIRECTOS</b>						
Sistema Hidráulico						
1	Canal de Derivación	Concreto	m <sup>3</sup>	0,771	\$16.719,23	\$12.890,53
		Excavación	m <sup>3</sup>	5,617	\$30.203,95	\$169.655,59
2	Canal de Conducción	Excavación	m <sup>3</sup>	1,899	\$30.203,95	\$57.357,30
3	Compuertas	Materiales e instalación	Unidad	2	\$217.231,25	\$434.462,50
4	Desarenador con cámara de carga	Concreto	m <sup>3</sup>	28,186	\$16.719,23	\$471.248,22
		Excavación	m <sup>3</sup>	175,505	\$30.203,95	\$5.300.944,24
		Compuerta	Unidad	1	\$217.231,25	\$217.231,25
5	Tubería de Presión	Accesorios	Unidad	4	\$1.761.338,00	\$7.045.352,00
		Tubo	m	72	\$278.173,00	\$20.028.456,00
6	Casa de Maquinas	Mamposteria	m <sup>2</sup>	9	\$52.160,82	\$469.447,38
		Acero	Kg	4	\$2.715.642,37	\$10.862.569,48
		Cubierta (Teja Plastica)	Unidad	3	\$17.431,00	\$52.293,00
7	Canal de Descarga	Concreto	m <sup>3</sup>	0,72	\$16.719,23	\$12.037,85
		Excavación	m <sup>3</sup>	3,9	\$30.203,95	\$117.795,41
<b>SUBTOTAL</b>						\$45.251.740,74
Sistema Energético						
8	Turbina Hidráulica	Grupo Turbina-Generador KAPLAN	Unidad	1	\$4.000.000	\$4.000.000
9	Sistema de Transmisión	Regulador Electrónico RMP 2/B - disipación de agua	Unidad	1	\$2.500.000	\$2.500.000
10	Sistema de control	Tablero de control CM 7 - 7kW monofásico	Unidad	1	\$4.500.000	\$4.500.000
<b>SUBTOTAL</b>						\$11.000.000
<b>COSTOS INDIRECTOS</b>						
11	Administración		%	7		\$3.937.621,85
12	Utilidades		%	10		\$5.625.174,07
13	Imprevistos		%	8		\$4.500.139,26
<b>SUBTOTAL</b>						\$14.062.935,18
<b>TOTAL</b>						\$70.314.676

Fuente. Autor

### 13. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Según la evaluación del recurso hídrico se analizó el caudal a partir de un aforo con el método de molinete en 6 puntos diferentes a lo largo de la Quebrada Fucha, en la Tabla 5 y Tabla 6 se muestran los resultados de los dos puntos con mayor caudal, por esta razón se ubicaron las estructuras de la captación de agua en estos puntos, teniendo en cuenta que el caudal con el que se realizan los cálculos es el caudal ecológico, el cual corresponde al 25 % del caudal de la fuente de agua, de esta manera con la ecuación (3) se calcula el caudal de diseño, el cual en el punto 1 es de  $0,127 \text{ m}^3/\text{s}$  y en el punto 2 es de  $0,105 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para la evaluación topográfica se realizó el análisis a partir de la toma de puntos geográficos con GPS en la zona y el procesamiento de estos datos en un sistema de información geográfico, teniendo como resultado tres puntos para la ubicación óptima de las estructuras, siendo la cabeza de energía para el primer punto de 9,4 m, para el segundo punto 8 m y para el tercer punto 9 m, después del realizar las pérdidas por accesorios y fricción se tiene que la altura neta es 8,432 m, 7,514 m y 8,447 m respectivamente.

Para verificar el requerimiento energético de la zona se realizaron encuestas a la comunidad, que según visitas realizadas y a partir de los sistemas de información geográfico, se comprobó que son 11 las casas aledañas a la Quebrada Fucha, de las cuales solo 6 participaron en la encuesta, donde se les preguntó por el consumo promedio diario y el costo de este según la factura del prestador de servicio de la zona, según las estadísticas realizadas se evidenció que el consumo de la zona no excede los 17 KW de potencia, sin embargo, las PCH están dentro de los sistemas que generan potencia hasta de 10 KW (Torres Quintero). De esta manera se escogió la casa 7, siendo la potencia requerida de 7,73 kW, a causa de que está en un punto de fácil acceso a la PCH.

Dentro del análisis del sistema hidráulico de la PCH, se tiene que el canal de derivación es rectangular revestido en concreto y el canal de conducción es trapezoidal en condiciones naturales del terreno, que según investigaciones es de arcilla, para el cálculo de los canales se tiene en cuenta que la ubicación es en una zona plana con una pendiente del 0,0001%, las dimensiones y materiales determinan el costo de estas obras civiles dando un total de \$239.903,42. El desarenador y la cámara de carga cumple con la función de sedimentar las partículas con diámetros considerables para que no ingresen al sistema, asimismo las dimensiones de estos dependen de la velocidad del agua y del diámetro de las partículas en sí, el laboratorio de sólidos totales permite conocer en qué porcentaje se encuentran estas partículas en el agua. De acuerdo con el volumen de las estructuras y los materiales el costo de estas estructuras está alrededor de \$5'989.423,71.

La tubería de presión se diseñó teniendo en cuenta el material de PVC, inicialmente se propuso un diámetro comercial, sin embargo este no cumplía con el porcentaje de perdidas por lo que se recomendó otro diámetro el cual es de 16", los diferentes accesorios a los cuales se conecta la tubería permite el transporte del agua a la turbina que en este caso se diseñó con la turbina KAPLAN, lo relevante de esta turbina son las dimensiones como se ve en la Tabla 33, porque a medida que llega el agua conducida a la turbina esta genera la energía mecánica necesaria para ser transformada en energía eléctrica, para una turbina KAPLAN, la eficiencia total es muy alta y casi constante para diferentes valores de flujo en comparación con otros tipos de turbinas. Esta razón se debe a que las cuchillas del corredor se pueden ajustar a caudales diferentes, y también a las cuchillas del distribuidor (Reales Ferreres & Raurell Font , 2010), como se observa en el cálculo de la ecuación (57) el rendimiento total de la turbina y el generador es del 65,75%.

El costo de las turbinas juega un papel vital en el presupuesto total de las PCH, donde el costo depende del tipo de turbina, que también puede variar de un sitio a otro. La capacidad de potencia y el diámetro de la turbina de la planta son los factores más importantes para determinar el costo del conjunto de turbinas (Elbatran, Yaakob, & Ahmed, 2014). El canal de descarga se diseñó de forma rectangular revestida en concreto. A partir de cálculos de todas las estructuras se determinó que las estructuras se realizarían en el punto 2.

Se propone que la casa de maquinas sea ubicada en el lugar presentado en la Figura 12, porque es un lugar con suficiente terreno para ser construida a casa según las dimensiones (9m<sup>2</sup>), además permite que el agua utilizada por la turbina regrese nuevamente al cauce en un tramo corto, de igual manera es un punto estratégico para la transmisión y control de la energía eléctrica, teniendo en cuenta que las dimensiones planificadas de la casa de máquinas es suficiente para la operación y el mantenimiento seguros de todos los equipos incluidos en ella, se requiere una cimentación superficial en un estrato de suelo de soporte adecuado, con una losa de hormigón moldeada para proporcionar una base rígida para la turbina y el generador (Akhilesh Arvind & Gopal, 2015).

La energía eléctrica se produce a partir del generador asíncrono, que también se encuentra dentro de la casa de máquinas. Los costos de toda la obra se realizaron basados en las estructuras calculadas a partir de estos datos dando como resultado una inversión total de \$70.314.676, dentro de este costo se encuentra el costo de instalación de los equipos, el costo de los materiales y accesorios, los cuales pertenecen a los costos directos, además de un porcentaje de costos indirectos

## 14. CONCLUSIONES

Se realizó el análisis de caudal con el fin de saber en qué punto a lo largo de la quebrada había más demanda de caudal, que es a partir de estos puntos donde se evalúa la ubicación óptima de las estructuras de captación, y conducción de la PCH, además se realizó el análisis de la altura topográfica teniendo para cada punto diferentes cabezas de energía, de esta manera, se llegó a la conclusión de que los resultados tanto del caudal como de la altura topográfica permiten generara la potencia requerida para la PCH.

Según el análisis para el requerimiento energético se determinó que se abastecerá energía a una de las 6 casas de la encuesta que se realizó, la cual según el terreno disponible era más factible la casa 7, siendo el consumo de energía diario de 7,73 KW, variando este consumo en las diferentes horas del día, manteniéndose al límite de un PCH según las referencias mencionadas.

Dentro del análisis del sistema hidráulico de la PCH, se tiene que el canal de derivación, el canal de conducción y el desarenador con cámara de carga, son sistemas que permiten el transporte del agua a la turbina de manera segura y controlada, teniendo en cuenta las recomendaciones de los manuales ya nombradas, además dentro de estos sistemas se implementó el protocolo de operación hidráulica con compuertas como nueva tecnología para evitar las crecientes de caudales y la entrada de residuos al sistema.

La implementación del protocolo de compuertas, permite que el arrastre de sedimentos sea controlado, de esta manera asegura la entrada del agua al desarenador con un porcentaje de sedimentos adecuado para el volumen tanto del desarenador como de la cámara de carga; incluso permite tener una revisión en los niveles aguas arriba de las compuertas por medio de la generación del resalto, porque este indica el caudal de entrada el cual asegura la generación de la potencia requerida. Por supuesto la implementación de este sistema a diferencia de otros sistemas (rejillas, canaleta Parshall, vertederos, entre otros), tiene un costo mayor, pero estos otros no sistemas no aseguran el control de lavado de sedimentos ni la revisión del caudal de entrada.

De acuerdo a los costos, si se evalúa este costo respecto a lo que actualmente la casa 7 paga por el costo del servicio, la inversión se recuperaría en más de 20 años, siendo esto un periodo muy largo, que la comunidad no estaría dispuesta a aceptar, que por otro lado una vez recuperada la inversión sería benéfica para la comunidad porque contaría con la generación de energía renovable no convencional pionera en esta zona y reduciría los impactos negativos en el medio ambiente.

## 15. RECOMENDACIONES

Debido a que no se encuentra disponible la curva de caudales de la Quebrada Fucha, no se puede determinar en qué épocas del año tiene variaciones considerables, por lo que esto afectaría la generación de energía, se recomienda hacer un estudio de los niveles extremos de caudal que tiene la quebrada para hacer los cálculos exactos en las épocas correspondientes.

En la parte del sistema de captación del agua existe otra posibilidad la cual es el sistema de rejillas, sin embargo estas no permiten el control de sedimentos a la entrada del sistema de conducción, para esto se recomienda tener en cuenta la disponibilidad del terreno y el caudal de diseño para la generación de la energía.

Para el presupuesto se recomienda realizar cotizaciones con más de 3 proveedores para tener variedad en los productos y costos más bajos, puesto que no todos los materiales se consiguen en la ciudad de Bogotá.

Dentro del sistema hidráulico se recomienda verificar la posibilidad de quitar el desarenador con cámara de carga en vez del sistema de control con la compuerta, porque los dos cumplen objetivos similares, además de tener en cuenta la cantidad y diámetro de las partículas de los sedimentos que lleva la Quebrada Fucha.

## BIBLIOGRAFÍA

- AguaMarket. (2016). *Caudal, Caida Hidraulica*. Obtenido de <http://www.aguamarket.com/diccionario/resultados.asp>
- Akhilesh Arvind, N., & Gopal, D. (2015). Pico-Hydro-Plant for Small Scale Power Generation in Remote Villages. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 59-67.
- Alibaba. (25 de 10 de 2017). *Alibaba*. Obtenido de Micro hydro turbine kaplan: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/micro-hydro-kaplan-turbine-60381399498.html?spm=a2700.8699010.29.181.445f146e8WBMeh>
- Amaya Chicas, F., Hernandez Gordiano, D., & Villegas Cabrera, D. (2009). *Estudio de las micro y mini plantas eléctricas hidráulica*. Universidad del Salvador, Escuela de Ingeniería Eléctrica, San Salvador.
- ambientum.com. (2015). *El portal profesional del medio ambiente*. Obtenido de <http://www.ambientum.com/diccionario/listado/diccionario.asp?letra=i#>
- Baena, C. (22 de 08 de 2013). *SlideShare*. Obtenido de Sistema Hidráulico: <https://es.slideshare.net/carlosbaena95/sistema-hidraulico>
- Blanco Morazan, J. A. (2012). *PROYECTOS PICO HIDROELÉCTRICOS PARA ELECTRIFICACIÓN DE FINCAS CAFETALERAS EN ZONAS AISLADAS*. Honduras, Nicaragua.
- Bohorquez Niño, A., Guerrero Gomez, G., & Cabellos Martinez, M. I. (2016). *MICRO CENTRAL HIDROELÉCTRICA PARA LA INSTITUCIÓN EDUCATIVA SAN ALBERTO No 2 DEL MUNICIPIO DE TOLEDO NORTE DE SANTANDER*. Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña.
- BT Ibrahim, N. (2012). *Modelling of Micro Hydro Electric system design*. Malasia: Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- Cazorla Riera, J., & Merizalde Salas, A. (2013). *Estudio de prefactibilidad técnica económica de una picocentral hidroeléctrica para la hacienda Titaycun, parroquia La Matriz, comunidad Titaycun del Cantón Chambo*. Riobamaba-Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

- Cívico. (1 de Marzo de 2017). *Los Parques de Bogotá Que Funcionan Con Energía Solar*. Obtenido de <https://www.civico.com/bogota/noticias/los-parques-de-bogota-que-funcionaran-con-energia-solar>
- Córdoba Romero, H. (2012). *Protocolo de Operación Hidráulica con Compuertas en Alcantarillados*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Coz, F., Sánchez, T., & Viani, B. (1995). *Manual de mini y microcetrales hidráulicas*. Lima, Perú: ITDG, Intermediate Technology Development Group.
- Cruz Lopez, E. J. (2013). *DIAGNÓSTICO DE ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA LOCALIDAD DE USME A TRAVÉS DE LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE LIBRE DISTRIBUCIÓN*. Universidad Católica de Colombia, Ingeniería Civil, Bogotá.
- Dirección General de Energía. (1998). *Manual de pequeña hidráulica*. Madrid: Comisión Europea.
- EcoInventos. (13 de Octubre de 2011). *Pico-Hydro. Hidroeléctrica casera para generar electricidad*. Obtenido de <http://ecoinventos.com/pico-hydro-hidroelectrica-casera-para-generar-electricidad/>
- El Tiempo. (26 de Diciembre de 2014). *El experimento Para Que Árboles Generen Energía Para Bogotá*. Obtenido de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15020398>
- El Tiempo. (5 de Junio de 2015). *La Energía Natural Que Mueve al Mundo*. Obtenido de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-15901037>
- Elbatran, A., Yaakob, O., & Ahmed, Y. (2014). Operation, performance and economic analysis of low head micro-hydropower turbines for rural and remote areas: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40-48.
- Energía de Bogotá. (s.f.). *Energía Eléctrica*. Obtenido de <http://www.grupoenergiadebogota.com/eeb/index.php/empresa/eeb-y-bogota/energia-electrica>
- Escuela de Ingenieros Militares. (2010). *Administración y Empleo del Equipo*. Bogotá: Escuela de Ingenieros Militares,.

- Eternit. (22 de 03 de 2016). *Coval - Eternit*. Obtenido de Lista de precios Bogotá: [https://coval.com.co/pdfs/intranet/consultas/listasprecios\\_anteriores/eternit\\_bogota/ult\\_eternit\\_bogota\\_060322.pdf](https://coval.com.co/pdfs/intranet/consultas/listasprecios_anteriores/eternit_bogota/ult_eternit_bogota_060322.pdf)
- Guarin Restrepo, J., & Florez Galviz, J. (2013). *Diseño de un Sistema de Generación a Partir de una Picocentral Hidroeléctrica*. Tesis Pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Escuela de Tecnología Mecánica, Pereira.
- Harvey , A., Brown, A., & Hettiarachi, P. (1993). *Micro-Hydro Design Manual*. London: Intermediate Technology Publications.
- IDAE, I. p. (2006). *Minicentrales Hidroeléctricas*. Madrid: Asociación de Periodistas de Información Ambiental, APIA.
- IDRD, I. D. (12 de 2016). *Instituto Distrital de Recreación y Deportes*. Obtenido de Precios de Referencia Diciembre 2016: <https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/APU-PRESUPUESTO%20WEB%20-%20%2819-12-2016%29-1%20%281%29.pdf>
- IREM. (11 de 10 de 2017). Cotización Picco Central Hidroelectrica Usme. Bogotá, Colombia.
- Leon Garcia, J. C. (2013-2016). *Plan Ambiental Local "PAL": Localidad de Usme*. Bogotá.
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (2da ed.). Madrid, España: Ediciones del castillo S.A.
- Ministerio de Ambiente, V. y. (22 de 07 de 2014). Resolución 865 de 2004. Bogotá D.C, Colombia.
- Observatorio de Desarrollo Económico. (2015). *En Usme disminuye la pobreza y la miseria*. Bogotá.
- Ochoa Rubio, T. (2002). *Centrales Hidroeléctricas* (Vol. 2). Colombia: Ediciones Grancolombianas. Recuperado el 10 de 10 de 2017
- Ortiz Flórez, R. (2011). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.

- PAVCO. (01 de 2017). *PAVCO*. Obtenido de Lista de Precios 2017: <https://pavco.com.co/2/acueducto/4-1208-189/i/189>
- Reales Ferreres, X., & Raurell Font , A. (2010). *INSTALLATION OF A NEW HYDROPOWER PLANT IN OCKELBO (SWEDEN)*. University of Gävle.
- Sierra Vargas, F. E., Sierra Alarcon, A. F., & Guerrero Fajardo, C. A. (2011). *Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica*. Artículo, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Simple.net, E. (2016). *Economía domestica*. Obtenido de <http://www.economiasimple.net/economia-domestica>
- Sisa Amaguaya, E. F., & Villarroel Herrera, W. M. (2009). *DISEÑO E INSTALACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA EN LA HACIENDA LA ISABELA*. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Escuela de Ingeniería Mecanica, Riobamba.
- Solano Leon, F., & Bolivar Bernal, C. A. (2015). *Diseño de una Pico Central Hidroeléctrica Para la Generación de Energía en el Bloque A de la Universidad Libre Sede Bosque Popular*. Universidad Libre, Departamento de Ingeniería Mecanica, Bogotá.
- Torres Quintero, E., & Castillo, J. (1995). *Estado actual y perspectivas de las Pequeñas Centrales Hidroelectricas en Colombia*.
- Torres Quintero, E. (s.f.). *Unilibre.edu.co*. Obtenido de <http://www.unilibre.edu.co/revistaingeniolibre/revista-12/ar9.pdf>
- UPME. (s.f.). *Energías Renovables: Descripción, Tecnologías y Usos Finales*. Bogota.
- UPME, U. d. (2015). *ATLAS: Potencial Hidroenergético de Colombia*. Bogotá.

## ANEXOS

### ANEXO 1

#### APÉNDICE 1

#### 9.2 SISTEMA DE CAPTACIÓN

##### 9.2.1 Diseño de la derivación

##### 9.2.1.1 Dimensiones del canal antes de la derivación

$$Q_{avenida} = Q + xQ \quad (5)$$

Dónde:

$Q_{avenida}$  = Caudal máximo de la quebrada ( $m^3/s$ )

$Q$  = Caudal de la quebrada ( $m^3/s$ )

$x$  = Porcentaje de aumento del caudal (adimensional)

Por seguridad se toma como valor máximo de caudal de avenida un 50%

$$Q_{avenida} = 0,506 + (0,50 * 0,506)$$

$$Q_{avenida} = 0,759 m^3/s$$

El área se obtiene de la ecuación:

$$A = \frac{Q_{avenida}}{V_{minima}} \quad (6)$$

$$A = \frac{0,759 m^3/s}{0,3 m/s}$$

$$A = 2,530 m^2$$

Conocida el área transversal, los valores de base y altura del canal transversal, se obtienen mediante un proceso iterativo de la siguiente ecuación:

$$A = y * b \quad (7)$$

$A$  = Sección transversal del canal ( $m^2$ )

$y$  = Tirante o profundidad del agua (m)

$b$  = Solera o fondo de canal (m)

$$A = 1,1 \text{ m} * 2,3 \text{ m}$$

$$A = 2,530 \text{ m}^2$$

### 9.2.1.2 Cálculo de la resistencia de las paredes del canal antes de la derivación

$$P_C = P_A + (\rho * g * h_2) \quad (8)$$

$P_C$  = Presión de fondo del canal ( $N/m^2$ )

$P_A$  = Presión atmosférica ( $N/m^2$ ). Para Bogotá es de 74660,32 Pa

$\rho$  = Densidad del agua ( $Kg/m^3$ ). Véase la Tabla 1

$g$  = Gravedad ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$h_2$  = Altura del nivel del agua (m)

$$P_C = 74660,32 + (999,19 * 9,81 * 1,1)$$

$$P_C = 85442,579 \text{ Pa}$$

$$P_C = 0,871 \text{ Kg/cm}^2$$

### 9.2.1.3 Espesor del canal de derivación.

$$e = 0,10 * h \quad (9)$$

$e$  = Espesor mínimo del canal (m)

$h$  = Altura del canal (m)

$$e = 0,10 * 1,1$$

$$e = 0,11 \text{ m}$$

## 9.3 SISTEMA DE CONDUCCIÓN.

### 9.3.2 Diseño del canal

$$S_C = \frac{h_1 - h_0}{L} \quad (11)$$

Dónde:

$h_1$  = Altura geográfica de la derivación (2700,33091 m)

$h_0$  = Altura geográfica del desarenador (2700,33037 m)

$L$  = Longitud total del canal (5m)

$$S_c = \frac{2700,33091 - 2700,33037 \text{ m}}{5\text{m}}$$

$$S_c = 0,108 \times 10^{-3}$$

Con los valores antes determinados, el radio hidráulico se calcula a partir de la ecuación de la pendiente o ecuación de Manning para canales abiertos:

$$R = \left( \frac{n * V}{\sqrt{S}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (12)$$

$$R = \left( \frac{0,013 * 0,3}{\sqrt{0,108 \times 10^{-3}}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$R = 0,230 \text{ m}$$

El espejo de agua se obtiene de la ecuación:

$$T = b + 2Zy \quad (15)$$

$T =$  Espejo de agua (m)

$b =$  Tirante o profundidad del agua (m)

$y =$  Solera o fondo del canal (m)

$Z =$  Talud o ángulo de inclinación de las paredes de canal

$$T = 0,69\text{m} + 2(0,58)(0,5\text{m})$$

$$T = 1,270 \text{ m}$$

## 9.4 CÁLCULO DE LA COMPUERTA DEL CANAL PRINCIPAL.

### 9.4.1 Cálculo del espesor de la compuerta del canal principal.

La compuerta colocada en las paredes del canal forma una viga apoyada en sus extremos con carga total uniformemente repartida  $P$ , el momento flector máximo es:

$$M = \frac{P * L}{8}$$

Además,

$$M = \frac{R * I}{C}$$

En donde para el rectángulo de la zona considerada se tiene:

$$\frac{I}{C} = \frac{\frac{1}{12} * 0,01 * e^3}{\frac{e}{2}} = \frac{1}{6} * 0,01 * e^2$$

Dónde:

$M$  = Momento flector (psi)

$R$  = Resistencia a tracción (psi)

$C$  = Centro de gravedad

$e$  = Espesor de la plancha de acero (mm)

Luego igualamos las ecuaciones:

$$\frac{P * L}{8} = \frac{R * I}{C}$$

$$\frac{10 * L * t * L}{8} = \frac{1}{6} * 0,01 * e^2 * 40816326$$

Se despeja el espesor de la compuerta (e) de la anterior ecuación:

$$e = \sqrt{\frac{60 * L^2 * t}{8 * 0,01 * 40816326}} \quad (17)$$

Ahora reemplazamos los valores de L y t, que corresponden a la base y la altura de la compuerta:

$$e = \sqrt{\frac{60 * (2,3)^2 * (1,1)}{8 * 0,01 * 40816326}}$$

$$e = 0,0103 \text{ m}$$

$$e = 10,34 \text{ mm} \cong 10,5 \text{ mm}$$

#### 9.4.2 Mecanismo de elevación de la compuerta del canal principal

Para el peso propio de la compuerta se utiliza la siguiente formula:

$$W = \frac{L * An * e * 7,85}{1000} \quad (21)$$

Dónde:

$L = \text{Largo (mm)}$   
 $An = \text{Ancho (mm)}$   
 $e = \text{Espesor (mm)}$

$$W = \frac{2300 * 1100 * 10,5 * 7,85}{1000}$$

$$W = 208,535 \text{ Kg}$$

$$W = 0,209 \text{ Ton}$$

## 9.6 DIMENSIONAMIENTO DEL DESARENADOR CON CÁMARA DE CARGA

Para determinar la velocidad de decantación ( $V_d$ ) se tiene en cuenta la ley de Stokes, como se ve a continuación,

$$V_d = \frac{1}{18} * g * \left( \frac{\rho_a - \rho}{v} \right) * d^2 \quad (25)$$

$\rho_a = \text{Densidad de la arena}$   
 $\rho = \text{Densidad del agua (Vease Tabla 1)}$   
 $v = \text{Viscosidad cinematica del agua (cm}^2/\text{s) (Vease Tabla 1)}$   
 $d = \text{Diametro de la partícula (cm) (Vease Tabla 1),}$

$$V_d = \frac{1}{18} * 981 \text{cm/s}^2 * \left( \frac{2,65 - 0,99919}{0,0115 \text{cm}^2/\text{s}} \right) * (0,001)^2$$

$$V_d = 0,78 \text{ cm/s} = 0,0078 \text{ m/s}$$

La capacidad del tanque colector  $m$ , y frecuencia de velocidad del depósito se obtiene de la ecuación (26):

$$m = Q * T * ST \quad (26)$$

$Q = \text{Caudal de diseño (m}^3/\text{s)}$   
 $T = \text{Período de tiempo de vaciado del tanque, una vez cada 4 meses ; } T$   
 $= 10454400 \text{ s}$   
 $ST = \text{Solidos Totales (Vease Anexo)}$

$$m = 0,127 \text{ m}^3/\text{s} * 10454400 \text{ s} * 0,160 \text{ Kg/m}^3$$

$$m = 211597,056 \text{ Kg}$$

Calculo del volumen de sedimento  $V$ :

$$V = \frac{m}{\rho_a} \quad (27)$$

$m_R = \text{Masa de la arena (Kg)}$

$\rho_a = \text{Densidad de la arena (2650 Kg/m}^3\text{)}$

$$V = \frac{211597,056 \text{ Kg}}{2650 \text{ Kg/m}^3}$$

$$V = 79,848 \text{ m}^3$$

A continuación se halla la profundidad del colector:

$$d_r = \frac{V}{W_d * L_d} \quad (28)$$

$$d_r = \frac{79,848 \text{ m}^3}{4,217 \text{ m} * 7,669 \text{ m}}$$

$$d_r = 2,469 \text{ m}$$

Se determina la longitud de entrada del desarenador con la ecuación (29):

$$\tan \theta = \frac{d_r'}{Le} \quad (29)$$

$$Le = \frac{d_r'}{\tan \theta}$$

$$Le = \frac{2,469 - 0,264}{\tan(30)}$$

$$Le = 3,819 \text{ m}$$

### 9.6.1 Dimensionamiento de la cámara de carga

- Se fija un valor de altura, que evite el ingreso de posibles sedimentos a la tubería de presión. Se recomienda un valor de:

$$0,3 < a_1 < 0,5 \text{ (m)}$$

$$a_1 = 0,4 \text{ m}$$

- Se toma un valor de altura equivalente al diámetro de la tubería de presión

$$a_2 \approx D$$

$$a_2 \approx 0,406 \text{ m}$$

- Para que el torbellino creado por el flujo del caudal no genere cavitación se deja un nivel mínimo equivalente a:

$$0,5D < a_3 < 1,5D$$

- Que como mínimo debe tener un valor de  $a_3 \text{ min} = 0,3 \text{ m}$

$$0,5(0,406) < a_3 < 1,5(0,406)$$

$$0,203 < a_3 < 0,609$$

$$a_3 = 0,4$$

- Por defecto de golpe de ariete se crea una elevación del nivel del agua en el tanque de carga, como seguridad se toma el siguiente valor:

$$a_4 \text{ min} = 0,3 \text{ m}$$

- En función de la altura de conducción  $h_1$ , de la topografía local, de la calidad del agua, de la ubicación del canal y de los conductos forzados, del grande de las compuertas se toma un valor para la cámara de carga  $h_2$  (m)

$$h_2 = 0,05 \text{ m}$$

- Se fija los valores posibles para la velocidad media de la cámara de carga:

$$V_2 = 1,0 - 0,8 - 0,6 \text{ (m/s)}$$

$$V_2 = 0,6 \text{ m/s}$$

- Se determina el ancho del tanque de carga

$$b_2 = \frac{Q}{V_2 * h_2} \text{ (m)} \tag{30}$$

$$b_2 = \frac{0,127 \text{ m}^3/\text{s}}{0,6 \text{ m/s} * 0,05 \text{ m}} \text{ (m)}$$

$$b_2 = 4,217 \text{ m}$$

- Se determina la altura del volumen de agua en el tanque para el arranque

$$h_{2d} = \frac{Q}{7 * b_2 * \sqrt{h_2}} \quad (31)$$

$$h_{2d} = \frac{0,127 \text{ m}^3/\text{s}}{7 * 4,217 \text{ m} * \sqrt{0,05 \text{ m}}}$$

$$h_{2d} = 0,019 \text{ m}$$

- Se determina:

$$h_{2e} = a_1 + a_2 + a_3 + h_{2d} \quad (32)$$

$$h_{2e} = 0,4 + 0,406 + 0,4 + 0,019$$

$$h_{2e} = 1,225 \text{ m}$$

- Se confrontan las alturas  $h_{2c}$  y  $h_2$ , si:

$$h_{2e} > h_2 \quad \text{Los valores tomados son correctos}$$

$$h_{2e} < h_2 \quad \text{Se debe tomar un valor mayor para } h_2 \text{ y recalcular}$$

- Como se cumple la relación se determina la longitud de la cámara de carga

$$L_2 = 0,304 \left( \frac{Q * L * \sqrt{h_2}}{h_{2e} * D^2} \right) \quad (33)$$

$$L_2 = 0,304 \left( \frac{0,127 \text{ m}^3/\text{s} * 72 \text{ m} * \sqrt{0,05}}{1,225 \text{ m} * (0,406)^2} \right)$$

$$L_2 = 3,066 \text{ m}$$

- Se calcula la altura del nivel máximo

$$h_{2e} = \frac{0,25 * Q}{b_2 * \sqrt{h_2}} \quad (34)$$

$$h_{2e} = \frac{0,25 * 0,127 \text{ m}^3/\text{s}}{4,217 \text{ m} * \sqrt{0,05 \text{ m}}}$$

$$h_{2e} = 0,034 \text{ m}$$

- Se determina la altura de la cámara de carga

$$h_{2c} = h_2 + h_{2e} + a_4 \quad (35)$$

$$h_{2c} = 0,05 \text{ m} + 1,225 \text{ m} + 0,4 \text{ m}$$

$$h_{2c} = 1,675 \text{ m}$$

## 9.7 TUBERÍA DE PRESIÓN

### 9.7.1 Calculo del diámetro interno de la tubería de presión

$$D = 1,27 \frac{Q^{0,4268}}{(H_B + h_s)^{0,1423}} \quad (39)$$

Dónde:

$Q =$  Caudal de diseño ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$H_B =$  Altura Bruta (m)

$h_s$

$=$  Altura sobrepresión por golpe de ariete (m). Se recomienda un valor igual a  $0,3H_B$

$$D = 1,27 \frac{(0,127)^{0,4268}}{(8 + (0,3 * 8))^{0,1423}}$$

$$D = 0,377 \text{ m} \approx 377,21\text{mm} \approx 14,85 \text{ in}$$

### 9.7.2. Calculo de la velocidad del agua

El área de la tubería de sección circular es:

$$A = \frac{\pi * d^2}{4} \quad (40)$$

Despejando la velocidad y reemplazando el área de la tubería de sección transversal circular en la ecuación se tiene:

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * d^2} \quad (41)$$

Dónde:

$Q =$  Caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$d =$  Diámetro interior de la tubería (m)

$V =$  Velocidad de circulación del agua (m/s)

Remplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$V = \frac{4 * 0,127}{\pi * 0,356^2}$$

$$V = 1,279 \text{ m/s}$$

### 9.7.3. Calculo de pérdidas en la tubería de presión

#### 9.7.3.1 Calculo de las perdidas primarias por fricción en la tubería

$$h_{friccion} = \frac{f * L * V^2}{2 * g * D} \quad (42)$$

Dónde:

$f =$  Factor de fricción

$L =$  Longitud de la tubería (m),

$D =$  Diámetro de la tubería (m)

$V =$  Velocidad del agua (m/s)

$g =$  Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

El factor de fricción de la tubería de determina mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} + \frac{ks}{3,71 d} \right) \quad (43)$$

Dónde:

$Re =$  Número de Reynolds

$ks =$  Rugosidad absoluta del PVC (Vease Tabla xx)

$d =$  Diámetro de la tubería

$$Re = \frac{V * d}{\nu} \quad (44)$$

$V =$  Velocidad de circulación del agua (m/s)

$\nu =$  Viscosidad cinemática del agua ( $m^2/s$ )(Vease Tabla 8)

Reemplazando los valores

$$Re = \frac{1,279 \text{ m/s} * 0,356 \text{ m}}{1,15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 395416,008$$

$$Re = 395416,008$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left( \frac{2,51}{395416,008 * \sqrt{f}} + \frac{0,0015}{3,71 (0,356)} \right)$$

Se realiza un proceso iterativo para hallar el factor de fricción dando como resultado:

$$f = 0,029$$

De esta manera:

$$h_{friccion} = \frac{f * L * V^2}{2 * g * D}$$

$$h_{friccion} = \frac{0,029 * 72 \text{ m} * (1,279 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2 * 0,356 \text{ m}}$$

$$h_{friccion} = 0,491 \text{ m}$$

### 9.7.3.2 Calculo de las perdidas secundarias por accesorios en la tubería.

$$h_{accesorios} = \frac{k * V^2}{2 * g} \quad (45)$$

Dónde:

$k$  = factor asociado a cada accesorio a utilizar

$V$  = Velocidad del agua entrante (m/s)

$g$  = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

En el proyecto las pérdidas secundarias se producirán por:

- Conexión tubería con cámara de descarga  $k_1$
- En válvulas  $k_2$
- Acoplamientos de la tubería de presión  $k_3$
- Reducción de la tubería  $k_4$
- Codos  $k_5$

*Perdidas por conexión tubería con cámara de descarga:*

Se asume un k de 0,2 según el ingreso a tubería de presión como se muestra en la Figura 11

$$h_{k1} = \frac{k_1 * V^2}{2 * g}$$

$$h_{k1} = \frac{0,2 * (1,279 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{k1} = 0,017 \text{ m}$$

*Perdidas en las válvulas:*

Se asume un k de 0,1 teniendo en cuenta que las válvulas son de compuerta y están totalmente abiertas como se muestra en la Figura 11

$$h_{k2} = \frac{k_2 * V^2}{2 * g}$$

$$h_{k2} = \frac{0,1 * (1,279 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{k2} = 0,008 \text{ m}$$

*Perdidas por acoplamiento de la tubería de presión:*

Se asume un k de 0,2 según el ingreso a tubería de presión como se muestra en la Figura 11

$$h_{k3} = \frac{k_3 * V^2}{2 * g}$$

$$h_{k3} = 15 * \frac{0,2 * (1,279 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{k3} = 0,250 \text{ m}$$

*Perdidas por codos a 45° en la instalación:*

Para el factor d pérdida del codo a 45° se tiene en cuenta la Tabla 19:

$$h_{k4} = \frac{k_2 * V^2}{2 * g}$$

$$h_{k4} = 4 * \frac{0,42 * (1,279 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

$$h_{k4} = 0,140 \text{ m}$$

Se realiza la sumatoria de los valores de las pérdidas que se producen en cada uno de los accesorios:

$$h_{\text{accesorios}} = h_{k1} + h_{k2} + h_{k3} + h_{k4}$$

$$h_{\text{accesorios}} = 0,017 \text{ m} + 0,008 \text{ m} + 0,250 \text{ m} + 0,140 \text{ m}$$

$$h_{\text{accesorios}} = 0,415 \text{ m}$$

## ANEXO 2

### 8.4 EVALUACION DEL RECURSO HIDRICO

Tabla 36. Datos medidos en el punto 3.

3er Punto																				
Localización						N			4°28'56,6"											
						W			74°07'11,8"											
Elevación						m			2698											
Ancho						m			4,17											
Tramo a			Tramo b						Tramo c						Tramo d					
0,5			1			1,5			2			2,5			3			3,6		
Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad	
m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s
0,1	0,1	0,03	0,20	0,4	0,12							0,2	0,9	0,27	0,2	0,3	0,09	0,1	0,3	0,09
0,2	0,1	0,03	0,40	0,2	0,06	0,4	0,5	0,15	0,4	0,7	0,21	0,4	1,1	0,34	0,35	0,8	0,24	0,15	0,6	0,18
			0,48	0,3	0,09	0,6	0,5	0,15	0,6	1,4	0,43	0,6	0,8	0,24						
						0,72	0,5	0,15				0,81	0,6	0,18						

Fuente. Autor

Tabla 37. Datos medidos en el punto 4

4to Punto			
Localización		N	4°28'55,9"
		W	74°07'11,2"
Elevación		m	2697
Ancho		m	5,3

Tramo a			Tramo b			Tramo c			Tramo d			Tramo e																				
0,5			1			1,5			2			2,5			3			3,5			4			4,65								
Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad							
m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s															
0,2	0,3	0,09	0,20	0,7	0,21	0,2	0,8	0,24	0,2	0,7	0,21							0,4	0,8	0,24	0,4	0,7	0,21	0,4	0,5	0,15	0,4	0,3	0,09	0,4	0,4	0,12
0,3	0,5	0,15	0,36	0,7	0,21	0,27	0,8	0,24	0,4	0,7	0,21	0,4	0,8	0,24	0,4	0,7	0,21	0,4	0,5	0,15	0,4	0,3	0,09	0,4	0,4	0,12	0,45	0,4	0,12			
						0,44	0,6	0,18	0,55	0,4	0,12	0,5	0,7	0,21	0,55	0,4	0,12															

Fuente. Autor

Tabla 38. Datos medidos en el punto 5.

5to Punto		
Localización	N	4°28'56,8"
	W	74°07'12"
Elevación	m	2693
Ancho	m	4,5

Tramo a			Tramo b			Tramo c			Tramo d			Tramo e														
0,5			1			1,5			2			2,5			3			3,5			4,25					
Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad				
m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s												
																								0,2	0,3	0,09
0,4	0,2	0,06	0,40	0,2	0,06	0,4	0,3	0,09	0,4	0,3	0,09	0,4	0,3	0,09	0,4	0,3	0,09	0,4	0,3	0,09	0,4	0,3	0,09	0,32	0,3	0,09
0,4	0,2	0,06				0,44	0,3	0,09	0,55	0,3	0,09	0,54	0,3	0,09	0,52	0,3	0,09	0,45	0,3	0,09						

Fuente. Autor.

Tabla 39. Datos medidos en el punto

6to Punto		
Localización	N	4°28'57,1"
	W	74°07'12,2"
Elevación	m	2695
Ancho	m	2,46

Tramo a			Tramo b			Tramo c								
0,5			1			1,5			2			2,23		
Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad		Prof	Velocidad	
m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s	m	f/s	m/s
0,2	1,5	0,46	0,20	2	0,61	0,2	1,5	0,46	0,2	1,6	0,49	0,1	1,4	0,43
0,4	2,6	0,79				0,4	1,5	0,46	0,3	1,6	0,49	0,2	1,3	0,40
						0,5	1,4	0,43						

Fuente. Autor.

## ANEXO 3

### 8.4 EVALUACION DEL RECURSO HIDRICO

Tabla 40. Caudal para el punto 3.

Tramo	Velocidad	Profundidad	Ancho	Area	Caudal
	m/s	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
a	0,07	0,20	1,00	0,24	0,017
b	0,24	0,72	1,00	0,54	0,13
c	0,42	0,81	1,00	0,48	0,20
d	0,09	0,15	1,00	0,18	0,02
Total					0,358

Fuente. Autor

Tabla 41. Caudal para el punto 4.

Tramo	Velocidad	Profundidad	Ancho	Area	Caudal
	m/s	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
a	0,15	0,32	1,00	0,18	0,027
b	0,22	0,27	1,00	0,40	0,09
c	0,23	0,55	1,00	0,47	0,11
d	0,15	0,55	1,00	0,45	0,07
e	0,12	0,45	1,00	0,20	0,02
Total					0,317

Fuente. Autor

Tabla 42. Caudal para el punto 5

Tramo	Velocidad	Profundidad	Ancho	Area	Caudal
	m/s	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
a	0,06	0,44	1,00	0,20	0,012
b	0,09	0,44	1,00	0,48	0,04
c	0,09	0,54	1,00	0,54	0,05
d	0,09	0,45	1,00	0,42	0,04
e	0,09	0,32	1,00	0,16	0,01
Total					0,158

Fuente. Autor

Tabla 43. Caudal para el punto 6

Tramo	Velocidad	Profundidad	Ancho	Area	Caudal
	m/s	m	m	m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /s
a	0,53	0,40	1,00	0,10	0,053
b	0,47	0,50	1,00	0,25	0,12
c	0,43	0,20	1,00	0,15	0,06
Total					0,234

Fuente. Autor

## ANEXO 4

### 9.2 Sistema de captación

#### 9.2.1 Diseño de la derivación

##### 9.2.1.1 Dimensiones del canal antes de la derivación

Tabla 44. Dimensiones del canal de derivación para el punto 1

$Q_{avenida}$	m <sup>3</sup> /s	0,759
Q	m <sup>3</sup> /s	0,506
x		0,5
A	m <sup>2</sup>	2,530
Altura (y)	m	1,1
Base (b)	m	2,3

Fuente. Autor

Tabla 45. Dimensiones del canal de derivación para el punto 3

$Q_{avenida}$	m <sup>3</sup> /s	0,627
Q	m <sup>3</sup> /s	0,418
x		0,5
A	m <sup>2</sup>	2,090
Altura (y)	m	1
Base (b)	m	2,1

Fuente. Autor

##### 9.2.1.2 Cálculo de la resistencia de las paredes del canal antes de la derivación

Tabla 46. Calculo de la presión en las paredes del punto 1

Presión en las paredes		
$P_T$	Pa	85442,579
$P_T$	Kg/cm <sup>2</sup>	0,871
$P_A$	Pa	74660,32
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	999,19
$g$	m/s <sup>2</sup>	9,81
$h_2$	m	1,10

Fuente. Autor

Tabla 47. Calculo de la presión en las paredes del punto 3

Presión en las paredes		
$P_T$	Pa	84462,374
$P_T$	Kg/cm <sup>2</sup>	0,861
$P_A$	Pa	74660,32
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	999,19
$g$	m/s <sup>2</sup>	9,81
$h_2$	m	1,00

Fuente. Autor

### 9.2.1.3 Espesor del canal de derivación

Tabla 48. Espesor de las paredes para el punto 1

Espesor de las paredes		
$e$	m	0,11
$h$	m	1,10

Fuente. Autor

Tabla 49. Espesor de las paredes para el punto 3

Espesor de las paredes		
$e$	m	0,10
$h$	m	1,00

Fuente. Autor

### 9.2.1.4 Dimensiones del canal de salida de la derivación hacia el tanque de presión.

Tabla 50. Dimensiones del canal de derivación para el punto 1

Q	m <sup>3</sup> /s	0,127
A	m <sup>2</sup>	0,423
Altura (y)	m	0,55
Base (b)	m	0,77

Fuente. Autor

Tabla 51. Dimensiones del canal de derivación para el punto 3

Q	m <sup>3</sup> /s	0,105
A	m <sup>2</sup>	0,348
Altura (y)	m	0,5
Base (b)	m	0,7

Fuente. Autor

### 9.3 Sistema de conducción.

#### 9.3.2 Diseño del canal

Tabla 52. Dimensiones del canal para el punto 1

Altura del punto de derivación	m	2700,33
Altura del punto de ingreso al desarenador	m	2700,33
Sc		1,08E-04
L	m	5
R	m	0,230
N		0,013
A	m <sup>2</sup>	0,423
Q	m <sup>3</sup> /s	0,127
Pe	m	1,841
z		0,58
Base (b)	m	0,69
Altura (y)	m	0,50
T	m	1,270

Fuente. Autor

Tabla 53. Dimensiones del canal para el punto 3

Altura del punto de derivación	m	2700,73091
Altura del punto de ingreso al desarenador	m	2700,73037

Sc		1,08E-04
L	m	5
R	m	0,230
N		0,013
A	m <sup>2</sup>	0,348
Q	m <sup>3</sup> /s	0,105
Pe	m	1,515
z		0,58
Base (b)	m	0,59
Altura (y)	m	0,40
T	m	1,054

Fuente. Autor

#### 9.4 Cálculo de la compuerta del canal principal.

##### 9.4.1 Cálculo del espesor de la compuerta del canal principal.

Tabla 54. Espesor de la compuerta principal para el punto 1

Caudal del canal	m <sup>3</sup> /s	0,506
Ancho del canal	m	2,3
Altura Estimada	m	1,1
e	m	0,0103
	mm	10,34
L	m	2,3
t	m	1,1

Fuente. Autor

Tabla 55. Espesor de la compuerta principal para el punto 3

Caudal del canal	m <sup>3</sup> /s	0,417
Ancho del canal	m	2,1
Altura Estimada	m	1
e	m	0,0090
	mm	9,00
L	m	2,1
t	m	1

Fuente. Autor

##### 9.4.2 Mecanismo de elevación de la compuerta del canal principal

Tabla 56. Mecanismo de elevación para la compuerta principal en el punto 1

Mecanismo Elevación		
F	Ton	1,388
F'	Ton	0,971
Area	m <sup>2</sup>	2,53
H	m	0,63
k		0,74
W	Kg	208,535
	Ton	0,209
L	mm	2300
An	mm	1100
e	mm	10,5

Fuente. Autor.

Tabla 57. Mecanismo de elevación para la compuerta principal en el punto 3

Mecanismo Elevación		
F	Ton	1,050
F'	Ton	0,753
Area	m <sup>2</sup>	2,1
H	m	0,58
k		0,74
W	Kg	148,396
	Ton	0,148
L	mm	2100
An	mm	1000
e	mm	9,00

Fuente. Autor.

## 9.5 Cálculo de la compuerta del canal de derivación.

### 9.5.1 Calculo del espesor de la compuerta del canal de derivación.

Tabla 58. Espesor de la compuerta de derivación para el punto 1

Caudal del canal	m <sup>3</sup> /s	0,506
Ancho del canal	m	2,3
Altura Estimada	m	1,1
e	m	0,010
	mm	10,340
L	m	2,3
t	m	1,1
R	Kg/m <sup>2</sup>	40816326

Fuente. Autor

Tabla 59. Espesor de la compuerta de derivación para el punto 3

Caudal del canal	m <sup>3</sup> /s	0,417
Ancho del canal	m	2,1
Altura Estimada	m	1
e	m	0,0090
	mm	9,00
L	m	2,1
t	m	1

Fuente. Autor

### 9.5.2 Mecanismo de elevación de la compuerta del canal de derivación

Tabla 60. Mecanismo de elevación para la compuerta de derivación en el punto 1

Mecanismo Elevación		
F	Ton	0,418
F'	Ton	0,372
Área	m <sup>2</sup>	0,847
H	m	0,63
k		0,74
W	Kg	23,283
	Ton	0,023
L	mm	770
An	mm	1100
e	mm	3,50

Fuente. Autor.

Tabla 61. Mecanismo de elevación para la compuerta de derivación en el punto 3

Mecanismo Elevación		
F	Ton	0,317
F'	Ton	0,284
Área	m <sup>2</sup>	0,7
H	m	0,58
k		0,74
W	Kg	16,488
	Ton	0,016
L	mm	700
An	mm	1000
e	mm	3,00

Fuente. Autor

## 9.6 DIMENSIONAMIENTO DEL DESARENADOR CON CÁMARA DE CARGA

Tabla 62. Cálculos y dimensiones del desarenador en el punto 1 Y 3

Punto 1			Punto 3		
Diseño Desarenador			Diseño Desarenador		
$Q_{dis}$	m <sup>3</sup> /s	0,127	$Q_{dis}$	m <sup>3</sup> /s	0,105
$V_H$	m/s	0,200	$V_H$	m/s	0,200
A	m <sup>2</sup>	0,633	A	m <sup>2</sup>	0,523
$d_d$	m	0,150	$d_d$	m	0,150
$W_d$	m	4,217	$W_d$	m	3,483
$V_d$	m/s	0,008	$V_d$	m/s	0,008
f		2,000	f		2,000
$L_d$	m	7,669	$L_d$	m	7,669
T	s	10454400,000	T	s	10454400,000
ST	mg/L	0,160	ST	mg/L	0,160
m	Kg	211597,056	m	Kg	174797,568
$\rho_{arena}$	Kg/m <sup>3</sup>	2650,000	$\rho_{arena}$	Kg/m <sup>3</sup>	2650,000
V	m <sup>3</sup>	79,848	V	m <sup>3</sup>	65,961
$d_r$	m	2,469	$d_r$	m	2,469
$d_r'$	m	2,205	$d_r'$	m	2,205
$\alpha$		30,000	$\alpha$		30,000
Le	m	3,819	Le	m	3,819

Fuente. Autor

### 10.6.1 Dimensionamiento de la cámara de carga

Tabla 63. Cálculos y dimensiones de la cámara de carga en el punto 1 y 3

Punto 1			Punto 3		
Diseño Camara de Carga			Diseño Camara de Carga		
$a_1$	m	0,400	$a_1$	m	0,400
$a_2$	m	0,356	$a_2$	m	0,356
$a_3$	m	0,400	$a_3$	m	0,400
$a_4$	m	0,400	$a_4$	m	0,400
$h_2$	m	0,050	$h_2$	m	0,050
$V_2$	m/s	0,600	$V_2$	m/s	0,600
$b_2$	m	4,217	$b_2$	m	3,483
$h_{2d}$	m	0,019	$h_{2d}$	m	0,019
$h_{2e}$	m	1,175	$h_{2e}$	m	1,175
L	m	81,000	L	m	58,700
$L_2$	m	4,677	$L_2$	m	2,800
$h_{2e \text{ max}}$	m	0,034	$h_{2e \text{ max}}$	m	0,034
$h_{2c}$	m	1,625	$h_{2c}$	m	1,625

Fuente. Autor

### 9.6.2 Calculo de las paredes de la cámara y el desarenador.

Tabla 64. Cálculos de las paredes de la cámara de carga y desarenador en el punto 1

Punto 1		
Presión en las paredes		
$P_A$	Pa	74660,320
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	999,190
g	m/s <sup>2</sup>	9,810
H	m	2,719
$P_T$	Pa	101313,101
$P_T$	KN/cm <sup>2</sup>	1,033
Espesor de las paredes		
h	m	2,719
e	m	0,272

Fuente. Autor

Tabla 65. Cálculos de las paredes de la cámara de carga y desarenador en el punto 3

<b>Punto 3</b>		
<b>Presión en las paredes</b>		
$P_A$	Pa	74660,320
$\rho$	Kg/m <sup>3</sup>	999,190
$g$	m/s <sup>2</sup>	9,810
$H$	m	2,719
$P_T$	Pa	101313,101
$P_T$	KN/cm <sup>2</sup>	1,033
<b>Espesor de las paredes</b>		
$h$	m	2,719
$e$	m	0,272

Fuente. Autor

### 9.6.5 Vertedero del desarenador

Tabla 66. Cálculos y dimensiones del vertedero del desarenador en el punto 1 y 3

<b>Punto 1</b>			<b>Punto 3</b>		
<b>Vertedero</b>			<b>Vertedero</b>		
$Q_{avenida}$	m <sup>3</sup> /s	0,190	$Q_{avenida}$	m <sup>3</sup> /s	0,157
$Q$	m <sup>3</sup> /s	0,127	$Q$	m <sup>3</sup> /s	0,105
$x$		0,500	$x$		0,500
$Q$ evacuar	m <sup>3</sup> /s	0,063	$Q$ evacuar	m <sup>3</sup> /s	0,052
$C_w$		0,605	$C_w$		0,605
$h_c$	m	0,100	$h_c$	m	0,100
$L_v$	m	3,307	$L_v$	m	2,732

Fuente. Autor

## 9.7 Tubería de presión

### 9.7.1 Calculo del diámetro interno de la tubería de presión.

Tabla 67. Diámetro interno de la tubería en el punto 1 y 3

Punto 1			Punto 3		
Diámetro Tubería			Diámetro Tubería		
Q	m <sup>3</sup> /s	0,127	Q	m <sup>3</sup> /s	0,105
H <sub>s</sub>	m	9,4	H <sub>s</sub>	m	9
d	m	0,369	d	m	0,341
	m	0,356		m	0,356

Fuente. Autor

- Calculo de la velocidad del agua

Tabla 68. Velocidad del agua en la tubería en el punto 1 y 3

Punto 1			Punto 3		
Q	m <sup>3</sup> /s	0,127	Q	m <sup>3</sup> /s	0,105
d	m	0,356	d	m	0,356
V	m/s	1,279	V	m/s	1,052

Fuente. Autor.

- Calculo de pérdidas en la tubería de presión

*Calculo de las perdidas primarias por fricción en la tubería.*

Tabla 69. Perdidas primarias en la tubería en el punto 1 y 3

Punto 1			Punto 3		
Pérdidas Primarias			Pérdidas Primarias		
f	m	0,029	f	m	0,029
L	m	81,000	L	m	58,700
V	m/s	1,279	V	m/s	1,052
g	m/s <sup>2</sup>	9,81	g	m/s <sup>2</sup>	9,81
d	m	0,356	d	m	0,356
h <sub>fricción</sub>	m	0,553	h <sub>fricción</sub>	m	0,272

Fuente. Autor

*Calculo de las perdidas secundarias por accesorios en la tubería*

Tabla 70. Pérdidas secundarias en la tubería en el punto 1 y 3

Punto 1			Punto 3		
Pérdidas Secundarias			Pérdidas Secundarias		
Conexión Tubería-Cámara de Carga			Conexión Tubería-Cámara de Carga		
$h_1$	m	0,017	$h_1$	m	0,011
k		0,2	k		0,2
Válvulas			Válvulas		
$h_2$	m	0,008	$h_2$	m	0,006
k		0,1	k		0,1
Acoplamiento tubería			Acoplamiento tubería		
$h_3$	m	0,250	$h_3$	m	0,169
k		0,2	k		0,2
Codos 45°			Codos 45°		
$h_4$	m	0,140	$h_4$	m	0,095
k		0,42	k		0,42
$h_{\text{accesorios}}$	m	0,415	$h_{\text{accesorios}}$	m	0,281

Fuente. Autor

*Calculo de las pérdidas totales*

Tabla 71. Pérdidas Totales en la tubería en el punto 1 y 3

Punto 1			Punto 3		
Pérdidas Totales			Pérdidas Totales		
$h_{\text{friccion}}$	m	0,553	$h_{\text{friccion}}$	m	0,272
$h_{\text{accesorios}}$	m	0,415	$h_{\text{accesorios}}$	m	0,281
$H_{\text{PT}}$	m	0,968	$H_{\text{PT}}$	m	0,553

Fuente. Autor

*Calculo del porcentaje de pérdidas*

Tabla 72. Porcentaje de pérdidas en la tubería en el punto 1 y 3

Punto 1			Punto 3		
Porcentaje Pérdidas			Porcentaje Pérdidas		
$H_{\text{PT}}$	m	0,968	$H_{\text{PT}}$	m	0,553
$H_s$	m	9,4	$H_s$	m	9
%Pérdidas	%	10,29	%Pérdidas	%	6,14

Fuente. Autor

## ANEXO 5

### Calculo de Sólidos Totales

#### a) Sólidos Totales

$$\text{Sólidos Totales} = \frac{(B - A) * 1000}{\text{ml de muestra}}$$

$B =$  *Peso de la capsula más el peso del residuo (mg)*

$A =$  *Peso de la capsula (mg)*

$$B = 64,692 \text{ gr} \approx 64692 \text{ mg}$$

$$A = 64,683 \text{ gr} \approx 64683 \text{ mg}$$

$$\text{Sólidos Totales} = \frac{(64692 \text{ mg} - 64683 \text{ mg}) * 1000}{100 \text{ ml}}$$

$$\text{Sólidos Totales} = 90 \text{ mg/L}$$

#### b) Sólidos Volátiles y Fijos

$$\text{Sólidos Volatiles} = \frac{(B - C) * 1000}{\text{ml de muestra}}$$

$$\text{Sólidos Fijos} = \frac{(C - A) * 1000}{\text{ml de muestra}}$$

$A =$  *Peso de la capsula (mg)*

$B =$

*Peso de los residuos sólidos más peso de la capsula antes de la calcinación (mg)*

$C =$  *Peso de los residuos sólidos más peso de la capsula (mg)*

$$A = 64,683 \text{ gr} \approx 64683 \text{ mg}$$

$$B = 64,692 \text{ gr} \approx 64692 \text{ mg}$$

$$C = 64,686 \text{ gr} \approx 64686 \text{ mg}$$

$$\text{Sólidos Volatiles} = \frac{(64692 - 64686) * 1000}{100 \text{ ml}}$$

$$\text{Sólidos Volatiles} = 60 \text{ mg/L}$$

$$\text{Sólidos Fijos} = \frac{(64686 - 64683) * 1000}{100 \text{ ml}}$$

$$\text{Sólidos Fijos} = 30 \text{ mg/L}$$

**c) Sólidos Suspendidos Totales**

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales} = \frac{(D - E) * 1000}{\text{ml de muestra}}$$

*D = Peso del papel filtro más el peso de los sólidos retenidos (mg)*

*E = Peso del papel filtro (mg)*

$$D = 0,400 \text{ gr} \approx 400 \text{ mg}$$

$$E = 0,393 \text{ gr} \approx 393 \text{ mg}$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales} = \frac{(400 \text{ mg} - 393 \text{ mg}) * 1000}{100 \text{ ml}}$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales} = 70 \text{ mg/L}$$

**d) Sólidos Suspendidos Volátiles**

$$\text{Sólidos Suspendidos Volátiles} = \frac{(D - F) * 1000}{\text{ml de muestra}}$$

*D = Peso del papel filtro más el peso de los sólidos retenidos (mg)*

*F = Peso del papel filtro más el peso de los sólidos después de calcinarse (mg)*

$$D = 0,400 \text{ gr} \approx 400 \text{ mg}$$

$$F = 0,395 \text{ gr} \approx 395 \text{ mg}$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Volátiles} = \frac{(400 \text{ mg} - 395 \text{ mg}) * 1000}{100 \text{ ml}}$$

$$\text{Sólidos Suspendidos Volátiles} = 50 \text{ mg/L}$$

**e) Total Sólidos**

$$\text{Total Sólidos} = \text{Sólidos Totales} + \text{Sólidos Suspendidos Totales}$$

$$\text{Total Sólidos} = 90 \text{ mg/L} + 70 \text{ mg/L}$$

$$\text{Total Sólidos} = 160 \text{ mg/L}$$

$$\text{Total Sólidos} = 0,16 \text{ Kg/m}^3$$

**f) Especificaciones del papel filtro**

Tabla 73. Especificaciones papel de filtro

<b>GENERAL PURPOSE, QUALITATIVE-TECHNICAL FILTERS</b>			
<b>Grade 3 hw - medium rate of filtration, increased wet strength, plain</b>			
filtration of fine precipitates such as lead dioxide, calcium fluoride, nickel sulphide, zinc sulphide			
Basis Weight	65 g/m <sup>2</sup>		
Filtration velocity:	10 ml / 35 seconds		
Typical Pore Size:	5 - 10 µm		
Similar to:	Whatmann Student Grade, S&S 595, 3002 M-N 615		
<b>Diam.</b>	<b>Code</b>	<b>Grade/Description</b>	<b>Pack of</b>
55 mm	FTR 3.303.055	3 hw / Filter discs.	100
70 mm	FTR 3.303.070	3 hw / Filter discs.	100
90 mm	FTR 3.303.090	3 hw / Filter discs.	100
110 mm	FTR 3.303.110	3 hw / Filter discs.	100
125 mm	FTR 3.303.125	3 hw / Filter discs.	100
150 mm	FTR 3.303.150	3 hw / Filter discs.	100
185 mm	FTR 3.303.185	3 hw / Filter discs.	100
240 mm	FTR 3.303.240	3 hw / Filter discs.	100

Fuente. Boeco Germany. <http://www.boeco.com/kategorie.php?ID=30>

## ANEXO 6

LÁMINAS	Límite elástico		Resistencia a la tracción		% de alargamiento
	(KSI)	(MPa)	(KSI) MIN - MAX	(MPa) MIN - MAX	
ASTM A	36	250	58-80	400-550	20
ASTM - A 131 GR A (espesor < 7mm)	34	234	58 - 71	400 - 490	24
ASTM - A 131 GR A (espesor >= 7mm)	34	234	58 - 71	400 - 490	24
ASTM A - 131GR C	34	235	58-71	400-490	21
ASTM A - 283GR C	30	205	55-75	380-515	22
ASTM A - 285GR C	30	205	55-75	380-515	23
ASTM A - 516GR 70	38	260	70-90	485-620	17
ASTM A - 572GR 50	50	345	65	450	20
ASTM A - 588GR B	50	345	70	485	18
ANTIABRASIVAS AA 400	DUREZA BRINEL 360 Min. 380-400 Typical				

LÁMINAS	C MAX	Mn MIN-MAX	P MAX	S MAX	Si MIN-MAX	Cu MIN-MAX	N MAX	Ni MAX	Cr MIN-MAX	V MIN-MAX
ASTM A36	0.29	0.85 - 1.20	0.04	0.05	0.15 - 0.40	0.20*1				
ASTM - A 131 GR A (espesor < 7mm)	0.18	0.30 - 0.60	0.025	0.03	0.04	0.20				
ASTM - A 131 GR A (espesor >= 7mm)	0.18	0.60 - 0.90	0.015	0.015	0.10 - 0.30	0.20				
ASTM A - 131GR C	0.23		0.035	0.04						
ASTM A - 283GR C	0.24	0.90	0.035	0.04	0.15 - 0.40	0.20*1				
ASTM A - 285GR C	0.28	0.98	0.035	0.035						
ASTM A - 516GR 70	0.31	0.85 - 1.20	0.035	0.035	0.15 - 0.40					
ASTM A - 572GR 50	0.23	1.35	0.04	0.05	0.15 - 0.40					
ASTM A - 588GR B	0.20	0.75 - 1.35	0.04	0.05	0.15 - 0.40	0.20 - 0.40		0.5	0.40-0.70	0.01 - 0.1
ANTIABRASIVAS AA 400	0.20	1.60	0.03	0.03	0.55					