

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Estudio y diseño de una hidroeléctrica pequeña en el
municipio de San Cristóbal Acasaguastlán**

Trabajo de graduación presentado por Pablo Estuardo Ortiz Paiz para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2019

**Estudio y diseño de una hidroeléctrica pequeña en el
municipio de San Cristóbal Acasaguastlán**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



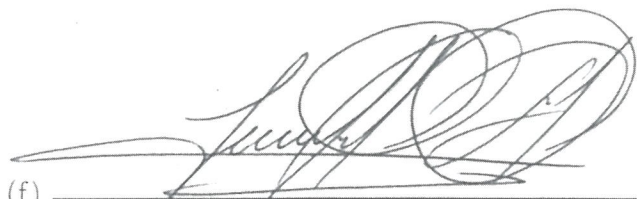
**Estudio y diseño de una hidroeléctrica pequeña en el
municipio de San Cristóbal Acasaguastlán**

Trabajo de graduación presentado por Pablo Estuardo Ortiz Paiz para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil


Guatemala,

2019

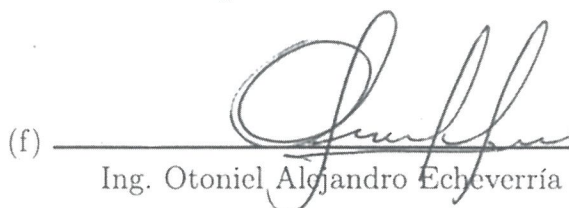
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Luis Carlos Monzón Cerna

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Luis Carlos Monzón Cerna

(f) 
MBA Ing. Roberto Godo Levensen

(f) 
Ing. Otoniel Alejandro Echeverría Castellanos

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de diciembre de 2019.

Lista de figuras	IX
Lista de cuadros	XII
Resumen	XIII
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Justificación	3
3. Objetivos	5
3.1. Objetivo general	5
3.2. Objetivos específicos	5
4. Marco teórico	7
4.1. Historia de las centrales hidroeléctricas en el país	7
4.2. Hidroeléctricas en la actualidad	8
4.3. Zona de estudio	8
4.4. Caracterización de la subcuenca	9
4.4.1. Pendiente media del río Uyús	10
4.4.2. Ecosistema	11
4.4.3. Suelos	12
4.4.4. Uso de la tierra	12
4.5. Evaluación de impacto ambiental del proyecto	12
4.6. Central hidroeléctrica	14
4.7. Energía mecánica	14
4.8. Turbina hidráulica	14
4.9. Generador eléctrico	17
4.9.1. Generadores de corriente alterna (CA)	18
4.10. Reguladores de voltaje	18
4.10.1. Regulador electrónico	19

4.10.2. Reguladores de CC	19
4.10.3. Reguladores de CA	19
4.11. Tipos de central hidroeléctrica	19
4.11.1. Centrales a filo de agua	19
4.11.2. Centrales acopladas a embalse	20
4.11.3. Centrales mareomotrices	22
4.11.4. Centrales mareomotrices sumergidas	22
4.12. Tipos de cimientos	22
4.12.1. Cimientos para edificaciones	22
4.12.2. Cimentación para maquinaria hidráulica	23
4.13. Condiciones para cimientos de turbinas hidráulicas	24
4.14. Obra civil	24
4.14.1. Bocatomas	24
4.14.2. Canales de conducción	25
4.14.3. Aliviadero	25
4.14.4. Desarenadores	25
4.14.5. Tanque de presión	25
4.14.6. Tuberías de presión	26
4.14.7. Sala de máquinas	26
4.14.8. Válvulas	27
4.14.9. Generadores	27
4.15. Rentabilidad	28
4.15.1. Factores	28
4.15.2. Métodos estáticos para el cálculo de rentabilidad	28
4.16. Pequeñas hidroeléctricas	29
4.16.1. Sistema de presa	29
4.16.2. Elección del sitio y medición de parámetros básicos	30
4.16.3. Medición de salto y caudal	30
4.16.4. Elección de turbinas	31
5. Metodología	33
5.1. Descripción de estudios de ingeniería	33
5.2. Descripción del área de estudio	34
5.3. Descripción de los procedimientos para la obtención de datos	36
5.3.1. Medición del salto de agua	36
5.3.2. Determinación del caudal de diseño	36
5.3.3. Determinación de los caudales de crecida	38
5.4. Dimensionamiento de obras civiles	43
5.4.1. Bocatoma de fondo	43
5.4.2. Dimensionamiento del desarenador de flujo horizontal	48
5.4.3. Dimensionamiento del canal de conducción	52
5.4.4. Dimensionamiento de aliviaderos y ubicación en el canal	53
5.4.5. Dimensionamiento de la cámara de carga	55
5.4.6. Dimensionamiento de la tubería de presión	56
5.5. Cálculo de la potencia nominal	59
5.5.1. Cálculo de la potencia bruta	60
5.5.2. Cálculo de pérdida de potencia por conducción	60
5.5.3. Cálculo de potencia efectiva	61

5.5.4. Potencia nominal	61
6. Análisis de resultados	63
6.1. Cálculo de la demanda energética en el municipio	63
6.1.1. Horizonte de planificación	63
6.1.2. Demanda residencial	64
6.1.3. Demanda del alumbrado público	64
6.2. Estudio de consumo energético del municipio	65
6.2.1. Población actual	65
6.2.2. Población según horizonte de planificación	65
6.2.3. Consumo de energía residencial	65
6.2.4. Consumo de alumbrado público	67
6.3. Estudio hidrológico	68
6.3.1. Caudales medios mensuales	68
6.3.2. Caudal de diseño	69
6.3.3. Tormenta de diseño e hidrograma efectivo	70
6.4. Dimensionamiento de las obras civiles	79
6.4.1. Bocatoma de fondo	79
6.4.2. Desarenador de flujo horizontal	83
6.4.3. Canal de conducción abierto	86
6.4.4. Aliviadero del canal de conducción	88
6.4.5. Dimensionamiento de la cámara de carga	88
6.4.6. Predimensionamiento del tanque	89
6.4.7. Dimensionamiento de la tubería de presión	90
6.5. Determinación de la potencia nominal	91
6.5.1. Cálculo de pérdidas en la tubería forzada	92
6.5.2. Cálculo de potencia neta	92
6.6. Elección y dimensionamiento de la turbina hidráulica	93
6.6.1. Elección de turbina	93
6.6.2. Velocidad de rotación	94
6.6.3. Velocidad del chorro a la salida del inyector	94
6.6.4. Diámetro del inyector	94
6.6.5. Diámetro del rodete	94
6.6.6. Altura de montaje requerida	95
6.6.7. Dimensionamiento de las cucharas de la turbina	95
6.7. Costo de inversión, costos de operación, ingresos y rentabilidad	95
6.7.1. Costos de inversión	96
6.7.2. Costos de operación	99
6.7.3. Ingresos	99
6.7.4. Recuperación de inversión	101
6.8. Demanda del municipio	101
7. Discusión	103
8. Conclusiones	105
9. Recomendaciones	107
10. Bibliografía	109

11. Anexos	111
11.1. Mapas de la zona de estudio	111
11.1.1. Perfil de la tubería forzada	111
11.1.2. Mapa topográfico (elevaciones a cada 10 m)	112
11.2. Planos de las obras civiles	113
11.2.1. Planos de la toma	113
11.2.2. Planos de la cámara de presión	117
11.2.3. Planos del desarenador	120
12. Glosario	125

Lista de figuras

1.	Presas para centrales hidroeléctricas en Guatemala	9
2.	Elevación máxima del río Uyús	10
3.	Elevación mínima del río Uyús	11
4.	Clasificación según listado taxativo	13
5.	Turbina Pelton	15
6.	Turbina Francis	16
7.	Turbina Kaplan	16
8.	Turbina Turgo	16
9.	Turbina Michell-Banki	17
10.	Nomograma de turbinas	31
11.	Curva de aplicación de turbinas	31
12.	Subcuenca del río Uyús	34
13.	Mapa de irregularidades	35
14.	Curvas de nivel del área de estudio	35
15.	Ejemplo de un hietograma	39
16.	Hidrograma sintético adimensional	43
17.	Curva de demanda residencial diaria	66
18.	Lámpara tipo canasta	67
19.	Cuadales diarios registrados entre 1995 y 2003	68
20.	Curva de duración de caudales 1995-2003	69
21.	Hidrograma de crecida	73
22.	Hidrograma unitario	75
23.	Hidrograma efectivo	78
24.	Curva de elección de turbina hidráulica	93
25.	Tarifas de la CNEE para enero de 2019	99
26.	Integración de costos para Baja Tensión Simple	100

Lista de cuadros

1.	Capacidad instalada en Guatemala	8
2.	Cuerpos de agua de San Cristóbal	10
3.	Pendiente media del cauce	11
4.	Clasificación de centrales hidroeléctricas según la potencia instalada	29
5.	Datos del histograma adimensional	42
6.	Coefficiente de ajuste K	57
7.	Coefficiente de ajuste C	58
8.	Caudales medios mensuales del río Uyús para el período 1995-2003	68
9.	Caudales característicos río Uyús	69
10.	Caudales esperados para el período considerado	69
11.	Precipitación horaria	71
12.	Coefficiente de escorrentía	71
13.	Caudales de crecida	72
14.	Datos del hidrograma unitario	74
15.	Datos de hidrograma base	76
16.	Caudales efectivos de la tormenta de diseño	77
17.	Velocidad máxima permisible en suelos	87
18.	Constante de capacidad de un tanque de carga	89
19.	Costo de la toma	96
20.	Costo del refuerzo de la toma	96
21.	Costo de zanjeo	96
22.	Costo del tanque o cámara de presión	96
23.	Costo del refuerzo de la cámara	96
24.	Costo de zanjeo	96
25.	Costo del desarenador	97
26.	Costo del refuerzo del desarenador (varillas #3)	97
27.	Costo del refuerzo del desarenador (varillas #5)	97
28.	Costo de zanjeo	97
29.	Costo del canal	97
30.	Costo de zanjeo	97
31.	Costo de tubería forzada	98

32.	Costo de codos de 45°	98
33.	Ficha técnica del grupo generador	98

El propósito de este trabajo es estudiar si es factible construir y poner en marcha una pequeña central hidroeléctrica, tomando en cuenta las características hídricas y geológicas de un sitio determinado.

Un proyecto hidroeléctrico busca generar energía eléctrica a partir de la energía potencial que posee el caudal de un afluente. Además, la hidroeléctrica debe operar sin interrumpir el caudal de las cotas inferiores a la toma de agua, y sin que la construcción del embalse conlleve un movimiento de tierras que afecte al medio ambiente de manera negativa.

Por lo tanto, es importante que en nuestro país puedan desarrollarse proyectos hidroeléctricos pequeños, pues para estos no es indispensable un embalse de grandes dimensiones, siendo una alternativa válida para las hidroeléctricas que utilizan presas para regular el caudal.

Este trabajo de graduación busca demostrar la factibilidad de la construcción de una hidroeléctrica a nivel de perfil en el municipio de San Cristóbal Acasaguastlán en el departamento de El Progreso, que sea capaz de satisfacer toda o al menos gran parte de la demanda eléctrica del mismo y generar rentabilidad al ser conectada a la Red Eléctrica Nacional.

Para ello se hará un estudio hídrico para determinar la potencia máxima provocada por el salto hidráulico y así diseñar una obra civil capaz de aprovechar eficientemente dicho potencial.

La obra civil se diseñará a partir de las características del afluente, tales como caudal máximo, precipitación y escurrimiento.

The purpose of an hydroelectric power plant is to transform a river´s potential energy into electricity. Furthermore, the power plant must be capable of doing such task without interrupting the water´s flow at the lower section of the river, even if a dam is required, as it is known that the interruption of a river´s flow can cause damage to the ecosystem.

Given that, it is important to develop small power plants as these do not need dams to regulate the water flow, as they are a valid substitute to traditional power plants that regulate flow using dams.

This study´s aim is to demonstrate the feasibility of building a power plant in the municipality of San Cristóbal Acasaguastlán in the department of El Progreso, capable of covering its entire power demand or at least a portion of it, and generate income if connected to the national electric system.

For this goal, a water study must be done to establish the maximum power available, and design the civil works for the power plant to function efficiently.

The civil works will be designed to fit the water study results, such as maximum flow, rainfall rate and runoff.

El principal objetivo de este trabajo es mostrar una forma viable de explotar los recursos naturales disponibles con el fin de responder al constante crecimiento de la demanda de energía eléctrica a nivel nacional. Guatemala posee muchos ríos y montañas que pueden ser aprovechados para construir centrales hidroeléctricas, conocidas por ser fuentes de energía renovable muy eficientes.

Sin embargo, en nuestro país la construcción de una central hidroeléctrica es visto con recelo, pues es común enterarse gracias a los medios de comunicación la cantidad de disturbios que causa este tipo de proyectos. Esto se debe en parte a la falta de diálogo entre los desarrolladores de los proyectos y los pobladores, así como una deficiencia en la planificación de estos.

Es por esta razón que es importante apostar por proyectos hidroeléctricos más pequeños que los tradicionales, y demostrar que estos pueden llegar a ser rentables y que causan menos impacto.

Este trabajo pretende realizar un estudio para determinar si es rentable construir una hidroeléctrica en el municipio de San Cristóbal Acasaguastlán, el cual se encuentra en la zona geográfica conocida como "valle del Motagua", lugar que se caracteriza por ser sumamente seco debido a su escasa precipitación.

El recurso considerado para el estudio es el río Uyús, el cual tiene su nacimiento a una altura de poco menos de dos mil metros sobre el nivel del mar.

Para evaluar la rentabilidad de construir una central hidroeléctrica pequeña en este sitio, se hicieron estudios topográficos e hidrológicos para así diseñar las obras civiles necesarias para el funcionamiento de la misma. Paralelamente, se calculó la potencia nominal de la central hidroeléctrica propuesta para estimar los costos de inversión y el tiempo de retorno de la inversión.

Seguidamente, se determinó que es rentable construir una pequeña central hidroeléctrica siempre y cuando se venda la energía producida directamente a la empresa que distribuye

la energía en el oriente del país, pues el tiempo de retorno es aceptable.

También se determinó que la hidroeléctrica no es capaz de cubrir la demanda de energía residencial ni de alumbrado público del municipio de San Cristóbal.

Con los datos obtenidos a partir de los estudios de prefactibilidad previamente mencionados, se demuestra que es posible explotar recursos naturales en nuevos sitios.

Según el informe estadístico de generación eléctrica, publicado por el Ministerio de Energía y Minas –MEM- en el 2016, las centrales hidroeléctricas componen el 37 % de la matriz energética de Guatemala. Además de ser la fuente de energía renovable más rentable en el país, es la fuente de energía más utilizada.

Sin embargo, a pesar de que se ha demostrado que este tipo de generación de energía eléctrica es beneficioso tanto para los guatemaltecos, quienes pueden comprar la energía eléctrica, como para los inversionistas desarrolladores de esta clase de proyectos. Las hidroeléctricas son proyectos complejos de realizar debido a la sensibilidad del medio ambiente ante movimientos de tierra tan grandes como el de las hidroeléctricas.

Es por ello que se debe demostrar que es factible construir pequeñas centrales hidroeléctricas en lugares remotos a los focos de desarrollo del país, capaces de satisfacer la demanda eléctrica de poblados poco desarrollados, y así fomentar la pequeña industria.

3.1. Objetivo general

Demostrar la viabilidad de la construcción de una central hidroeléctrica pequeña a nivel de perfil en el municipio de San Cristóbal Acasaguastlán, para cubrir gran parte de la demanda eléctrica local, así como generar beneficios económicos al ser conectada a la Red Eléctrica Nacional.

3.2. Objetivos específicos

- Analizar la demanda eléctrica a satisfacer en el municipio de estudio
- Evaluar las características hídricas del sitio por medio de estudios hidrológicos.
- Diseñar la obra civil necesaria para el funcionamiento de la central hidroeléctrica.
- Realizar un presupuesto del costo para implementar la central hidroeléctrica utilizando un software BIM.

4.1. Historia de las centrales hidroeléctricas en el país

El territorio guatemalteco posee una gran cantidad de ríos caudalosos que hacen posible la generación de energía utilizando centrales hidroeléctricas.

La primera central hidroeléctrica en el país se instaló en la finca El Zapote en 1884. Un año después, se instaló la hidroeléctrica Palín, la cual podía operar hasta 732 kW. Esta central suministraba energía eléctrica a los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez y Escuintla.

A finales de la década de 1920, se empezó a desarrollar el proyecto conocido como Ferrocarril de Los Altos. Para suministrar energía a este proyecto, se construyó la hidroeléctrica Santa María, la cual eventualmente pasaría a ser parte del Estado al desaparecer el sistema de ferrocarril.

Debido a la necesidad de suministrar energía eléctrica al interior del país, se utilizó la hidroeléctrica Santa María una vez más. Para ello, el Estado desarrolló una primigenia red eléctrica nacional a cargo del Departamento de Electrificación Nacional, antecesor del moderno Instituto Nacional de Electrificación.

Debido a la creciente demanda del público guatemalteco y del desarrollo industrial de energía en los siguientes años, el Estado inicia la construcción de la hidroeléctrica Chixoy en 1976.

La construcción de la central hidroeléctrica Chixoy finalizó en 1985, con una potencia instalada de 300 MW. Este proyecto hidroeléctrico fue y sigue siendo el más grande hasta ahora.

4.2. Hidroeléctricas en la actualidad

Actualmente, la generación de energía por medio de centrales hidroeléctricas es la más utilizada en Guatemala, pues se cuenta con una potencia instalada de 1437.7 MW en el 2017, según el Ministerio de Energía y Minas (MEM). La otra fuente de generación eléctrica más utilizada en el país es la de biomasa, con 1090.8 MW de potencia instalada.

Otro dato que considerar sobre la energía hidráulica es que esta forma la base de la matriz energética en el país, debido a la capacidad de las centrales hidroeléctricas de producir energía inmediatamente, a diferencia de las otras tecnologías, que necesitan a veces horas para empezar a producir energía.

Cuadro 1: Capacidad instalada en Guatemala

Tecnología	Generación (MW)
Hidráulica	1437.7
Eólica	75.9
Solar Fotovoltaica	92.5
Geotérmica	49.2
Carbón	584.7
Búnker/Diesel	747.0
Biomasa	1090.8

Fuente: Ministerio de Energía y Minas

El potencial hídrico del país se encuentra en las zonas montañosas, en donde existen ríos de grandes caudales. La franja transversal del norte, que forma parte de los departamentos de Quiché, Baja Verapaz y Alta Verapaz, es una zona rica en recursos hídricos que han sido aprovechados para construir centrales hidroeléctricas.

Otra área que posee este tipo de recurso es la meseta central del país o altiplano. Debido a esto, la mayoría de las centrales hidroeléctricas en Guatemala se encuentran distribuidas en estas dos zonas.

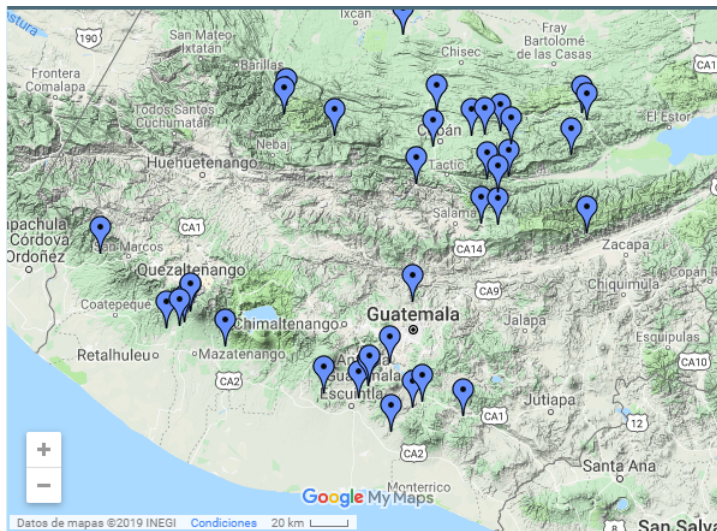
4.3. Zona de estudio

Las dos zonas donde se concentra la mayor parte de proyectos hidroeléctricos en el país son la franja transversal y el Altiplano. Es poco común que existan proyectos fuera de estas regiones, debido a la aparente escasez de recurso hídrico en ellas.

Este trabajo de graduación propone estudiar la viabilidad de la construcción y operación de una hidroeléctrica pequeña en el departamento de El Progreso, el cual está ubicado en la región denominada “Corredor Seco”, específicamente en el valle de río Motagua.

El municipio de interés en este trabajo es San Cristóbal Acasaguastlán. Este municipio tiene una extensión de 124 kilómetros cuadrados, y tiene una población aproximada de 7,387 habitantes, según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Este municipio está conformado por un pueblo, cinco aldeas y catorce caseríos.

Figura 1: Presas para centrales hidroeléctricas en Guatemala



Fuente: Ministerio de Energía y Minas

San Cristóbal Acasaguastlán forma parte de la cuenca del río Motagua, y tiene la peculiaridad de estar a las faldas de la Sierra de las Minas. El municipio está ubicado cerca de las cuencas del río Polochic y del río Salinas.

Una aldea de este municipio, llamada San Luis Buenavista, se encuentra a una elevación promedio de 600 m.s.n.m.. Cerca de la misma fluye el río Uyús, que, debido a la topografía montañosa de la zona, tiene un cauce con varios tramos empinados que poseen cierto potencial hidráulico, debido a la diferencia de alturas y caudal.

Este río sigue su curso bajando la Sierra de Las Minas hasta finalmente desembocar en el río Motagua.

4.4. Caracterización de la subcuenca

La cuenca del río Motagua tiene una extensión de 15,190 km², siendo una de las más grandes del país. Esta se compone de 563 subcuencas, siendo una de ellas la del río Uyús.

Tanto el municipio de San Cristóbal Acasaguastlán como el de San Agustín Acasaguastlán forman parte de la subcuenca del río Uyús. Según el reporte de Ríos y cuencas de la Secretaría General de Planificación y Programación de la Presidencia -SEGEPLAN-, publicado en 2001, San Cristóbal toma aproximadamente 54.92 km² de la subcuenca, mientras que San Agustín toma los 4.03 km² restantes, para un total de 58.95 km² que posee la misma.

Cuadro 2: Cuerpos de agua de San Cristóbal

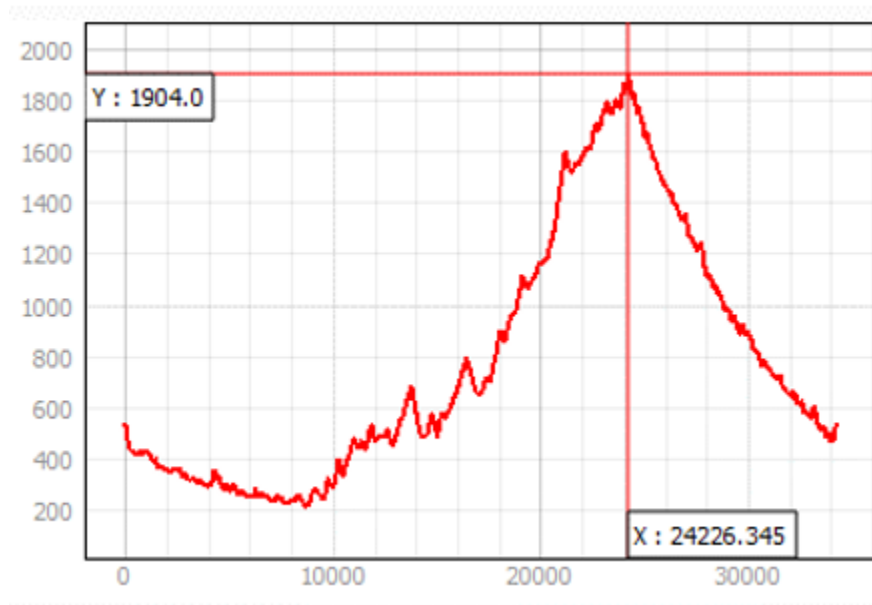
Cuerpo de agua	Cantidad
Ríos	4
Riachuelos	2
Quebradas	25

Fuente: elaboración propia

4.4.1. Pendiente media del río Uyús

Para los estudios de hidrología que se presentan más adelante, es necesario calcular la pendiente media del cauce a estudiar. Esta se obtiene determinando las alturas máximas y mínimas que alcanza el recorrido del río, y dividiendo esta diferencia de alturas entre la longitud del cauce.

Figura 2: Elevación máxima del río Uyús



Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura anterior, la elevación máxima del río Uyús se da a 1904 m sobre el nivel del mar, lo que coincide con la ubicación de la subcuenca en las faldas de la Sierra de las Minas.

Como se observa en la figura anterior, la elevación mínima del río Uyús se da a 219 m.s.n.m. Una diferencia de elevaciones de más de 1000 m se da una distancia horizontal de 20 km, lo cual indica que el terreno es bastante pronunciado.

Figura 3: Elevación mínima del río Uyús



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3: Pendiente media del cauce

Altura máxima	1904	m
Altura mínima	219	m
Largo del cauce	9803.43	m
Pendiente media	0.21	m/m

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Ecosistema

A lo largo del río Uyús se tiene una extensión de árboles que se conoce como bosque ribereño. El crecimiento de arboles y matorrales que caracterizan este tipo de ecosistema es posible gracias a la presencia de grandes cuerpos de agua como lo son los ríos y arroyos.

Debido a la presencia perenne del río Uyús, se logra desarrollar vegetación que no es común en un ecosistema semiárido.

Composición florística del bosque de ribera

De acuerdo a estudios que se han hecho en la ribera del río Uyús, esta cuenta con una riqueza florística integrada por 22 familias, 30 géneros y 32 especies, el estrato arbustivo sugiere una variedad que se integra por 9 familia, 11 géneros y 11 especies, mientras que el estrato herbáceo está compuesto por 10 familias, 13 géneros y 13 especies [1]

4.4.3. Suelos

A lo largo del cauce del río Uyús, el suelo se compone mayormente de arcilla y arena en varias combinaciones, como lo son:

- Arcillo arenoso
- Arena franca
- Franco arcillo arenoso
- Franco arcilloso
- Franco arenoso

4.4.4. Uso de la tierra

El uso de la tierra esta dividido de la siguiente manera [1]:

- 66 % está ocupado por arbustos y matorrales.
- 17 % lo componen bosques latifoliados.
- 11 % lo ocupan siembras de café.
- 3 % se ocupa para la siembra de granos básicos.
- 2 % lo componen bosques coníferos.
- 1 % son bosques de ribera.
- el resto es siembra de aguacate.

4.5. Evaluación de impacto ambiental del proyecto

Parte de la planificación de un proyecto es la presentación de un Estudio de Impacto Ambiental -EIA-.

En la República de Guatemala, el ente que establece la manera de realizar los EIA por ley es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales -MARN-.

Para la realización de cualquier proyecto o actividad que esté regulada en el Listado Taxativo, el MARN establece que la parte interesada debe contratar a un Consultor Ambiental registrado en el mismo.

El Listado Taxativo del MARN se utiliza para clasificar cualquier tipo de proyecto o actividad de acuerdo al impacto que tenga en el medio ambiente. Es común que proyectos como ingenios azucareros o actividades agropecuarias tengan que realizar un estudio de impacto ambiental según su clasificación en el Listado Taxativo.

Para todos los EIA, sin importar su categoría en el Listado Taxativo, el Ministerio de Ambiente pide los siguientes requisitos generales, los cuales se encuentran publicados en su portal web en la sección de Estudios de Evaluación de Impacto Ambiental:

- Contratar a un Consultor Ambiental registrado en el MARN
- Contar con todos los Documentos Legales de la Empresa y/o representante legal
- Documento(s) original(es) del informe técnico según la Guía de Términos de Referencia proporcionados por el MARN.
- Constancia de publicación en un Diario de mayor circulación (no Diario de Centroamérica) en el tamaño de 2 x 4 pulgadas.

Además, si la zona de estudio se utilizan idiomas mayas, la publicación anterior debe ser en dicho(s) idioma(s). La información multilingüe se puede obtener en el Instituto Nacional de Estadística.

Clasificación del proyecto según el Listado Taxativo

Figura 4: Clasificación según listado taxativo

SECCIÓN "E"		SUMINISTRO DE AGUA, EVACUACION DE AGUAS RESIDUALES, GESTION DE DESECHOS Y DESCONTAMINACIÓN			
DIVISION 36		CAPTACION, TRATAMIENTO Y DISTRIBUCION DE AGUA			
GRUPO 360					
CATEGORIAS DE PROYECTOS, OBRAS, INDUSTRIAS O ACTIVIDADES		A	B1	B2	C
DESCRIPCION	CLASE	De Alto Impacto Ambiental Potencial o Riesgo Ambiental	De Alto a Moderado Impacto Ambiental Potencial	De Moderado a Bajo Impacto Ambiental Potencial	De Bajo Impacto Ambiental Potencial
546 Diseño, construcción y operación de proyectos derivados de las concesiones y autorizaciones de agua, siendo la fuente: ríos cercanos.	3600	Todos			

Fuente: Acuerdo ministerial No. 199-2016

Como se aprecia en la figura anterior, un proyecto como el de este estudio, al operar utilizando un río cercano, debe clasificarse como proyecto de Clase A (alto impacto ambiental potencial o riesgo ambiental).

Para proyectos de Clase A, el MARN establece que en función de su naturaleza, existen dos tipos de instrumentos ambientales: predictivos y correctivos.

El instrumento predictivo se considera en el Estudio de Evaluación de Impacto Ambiental. Este permite identificar y predecir los efectos sobre el medio ambiente producidos por la actividad de un proyecto, obra o industria.

El instrumento correctivo se considera en el Diagnóstico Ambiental, cuyo objetivo es determinar las acciones necesarias para mitigar impactos ambientales adversos. Los anteriores estudios los debe realizar un consultor ambiental que se encuentre acreditado por este ministerio.

Los estudios que se deben presentar al Ministerio de Ambiente se pueden encontrar en la página de internet de esta institución.

4.6. Central hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica es una instalación que produce electricidad a partir de la energía potencial del agua; el nivel del agua debe estar ubicado en un eje superior al eje de la hidroeléctrica. El agua se puede embalsar utilizando una presa, o utilizando cualquier otro tipo de depósito.

Para producir electricidad, se debe conducir el agua mediante conductos especiales llamados tubería forzada, la cual produce un flujo de agua a alta presión que se dispara hacia unas turbinas. Las turbinas empiezan a generar rotación, que se transmite hacia un dispositivo llamado generador el cual es capaz de generar una corriente eléctrica alterna.

La corriente desarrollada por los generadores es alta, pero de tensión baja. Por ello, debe transportarse hacia una estación eléctrica en donde se reduce la corriente y se aumenta la tensión.

Finalmente, la corriente se conduce nuevamente hacia una subestación, en donde se disminuye considerablemente la tensión y ya puede ser distribuida para uso doméstico e industrial.

4.7. Energía mecánica

La energía mecánica está definida como la capacidad de un cuerpo de realizar trabajo mecánico. La energía mecánica se compone principalmente de dos distintas energías: potencial gravitatoria y cinética.

- Energía potencial: es la energía que se asocia a la ubicación de un cuerpo cuando este está dentro del alcance de algún campo de fuerzas, como campo gravitatorio, campo electromagnético, entre otros.
- Energía cinética: es la energía que se asocia al movimiento de un cuerpo.

4.8. Turbina hidráulica

Una turbina hidráulica está compuesta por una rueda que gira alrededor de un eje debido al contacto con un fluido en movimiento, produciendo trabajo de flecha.

Las turbinas hidráulicas se dividen en dos grupos:

- Turbinas de impulso: El fluido es enviado por medio de una tobera, de tal manera que la energía mecánica se convierte en energía cinética. Este chorro de agua impacta contra las aspas de la turbina, que tienen forma de cubo, que permiten transferir la energía al eje. La turbina mas moderna que existe fue diseñada por Lester A. Pelton en 1878. La turbina Turgo también se considera de impulso.
- Turbinas de reacción: El fluido entra a alta presión de forma tangencial, y gira hacia el rodete debido a los álabes conforme va pasando por la carcasa que tiene forma de espiral, llamada voluta, hasta llegar a las compuertas de admisión con una alta velocidad tangencial. Este impulso se distribuye entre el fluido y el rodete provocando una caída de presión. Estas turbinas siempre trabajan sumergidas en el agua. Las turbinas Francis, Kaplan y Michell-Banki se consideran turbinas de reacción.

Principales turbinas existentes

Las principales turbinas utilizadas en las centrales hidroeléctricas [2] son las siguientes:

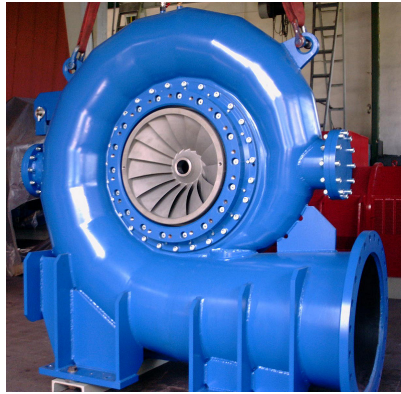
- Turbina Pelton: es una turbomáquina capaz de convertir la energía cinética de un fluido en energía mecánica rotacional. Su diseño permite obtener energía en sistemas donde se tienen grandes saltos hidráulicos y caudal bajo. Su eficiencia es alta (entre 30-90 o/o del caudal máximo). Está considerada como una turbina de impulso.

Figura 5: Turbina Pelton



- Turbina Francis: es otro tipo de turbomáquina capaz de operar en un gran rango de saltos hidráulicos y caudales variados. Su eficiencia es alta entre el 60 y el 100 del caudal máximo. Esta y las turbinas que serán descritas abajo se consideran turbinas de reacción.

Figura 6: Turbina Francis



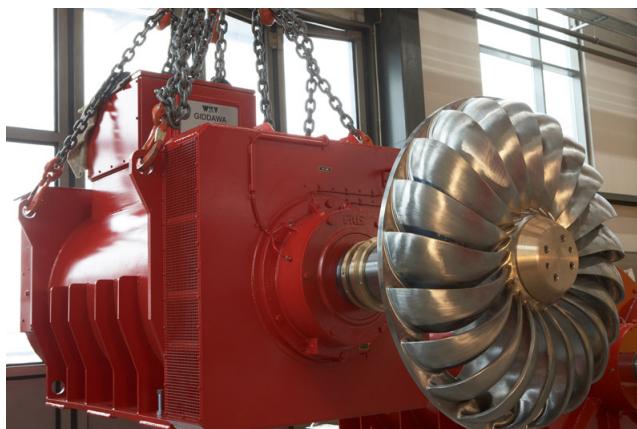
- Turbina Kaplan: se emplean en saltos de altura pequeña (<50 m), con caudales medios y grandes.

Figura 7: Turbina Kaplan



- Turbina Turgo: esta turbina opera de manera similar a la turbina Pelton, ya que se trata de una modificación de esta para operar con caudales similares, pero con menos altura (<50 m).

Figura 8: Turbina Turgo



- Turbina Michell-Banki: se trata de una turbina cuyo rango de aplicación esta entre el de las turbinas Pelton y las Francis. Su geometría facilita su fabricación y es la turbina de más bajo costo.

Figura 9: Turbina Michell-Banki



4.9. Generador eléctrico

El generador eléctrico es una máquina que puede convertir el trabajo mecánico en electricidad y viceversa, siendo consideradas como máquinas reversibles.

Los generadores logran producir electricidad a partir del movimiento rotacional suministrado ya sea por un motor o una turbina mediante la generación de un campo magnético, concepto descrito en la Ley de Faraday.

Para calcular la potencia generada por un generador eléctrico, se utiliza la siguiente ecuación general:

$$P = T * w / 7.04P \quad (1)$$

Donde:

P= potencia generada (W)

T= momento de torsión (lb*ft)

w = velocidad angular (rev/min)

La velocidad angular de la turbina afecta al voltaje de salida del generador, por lo tanto, es común instalar reguladores de voltaje para mantener un funcionamiento adecuado en el generador en caso de que se aumente la demanda de potencia.

4.9.1. Generadores de corriente alterna (CA)

Estos generadores convierten la energía mecánica en electricidad de corriente alterna. Existen dos clases de generadores de CA, las cuales son sincrónicas y las de inducción.

Los generadores sincrónicos funcionan mediante una corriente de campo suministrada por una fuente externa de corriente continua (CC), mientras que los generadores de inducción obtienen su corriente de campo mediante inducción magnética.

Generador sincrónico

Si, en un generador sincrónico, se aplica al embobinado del rotor una corriente continua, se producirá un campo magnético en el rotor, entonces, el rotor del generador se impulsará por medio de un motor primario, lo cual producirá un campo magnético rotatorio dentro de la máquina.

Este campo magnético rotatorio, inducirá un sistema trifásico de voltajes dentro del embobinado del estator del generador. El rotor de un generador sincrónico es esencialmente un gran electroimán.

Los polos magnéticos del rotor pueden ser de construcción saliente o no saliente. Los rotores de polo no saliente se usan normalmente para rotores de dos y cuatro polos, mientras que los de polo saliente se utilizan normalmente en rotores de cuatro o más polos [3].

Generador de inducción

Es un dispositivo que únicamente tiene embobinados amortiguadores se conoce cómo máquina de inducción. Estas máquinas se llaman así porque el voltaje del rotor es inducido en el embobinado del mismo, en lugar de conectarse físicamente por medio de conductores. La característica de un motor de inducción es que no se necesita corriente de campo de CC para funcionar [3].

4.10. Reguladores de voltaje

Reguladores es otro nombre para designar a los convertidores directos de Corriente continua (CC) y Corriente alterna (CA) que tienen la misma frecuencia.

En generadores de CC de pequeña Potencia se utilizaban vibradores mecánicos y conjuntos de convertidores rotativos. En generadores de CA, se empleaban transformadores de tomas, así como auto transformadores de relación.

Sin embargo, con el desarrollo de los Semiconductores se han ido implementando nuevas tecnologías para los reguladores de voltaje, como el moderno regulador electrónico.

Independientemente de su tipo, los reguladores de voltaje funcionan como un interruptor que bloquea o permite el paso de energía eléctrica del Generador.

4.10.1. Regulador electrónico

Los Reguladores comúnmente emplean circuitos que provocan que la tensión de salida sea inferior a la tensión de entrada, pero hay algunos que funcionan como elevadores de tensión, utilizando un circuito de mando. Este circuito de mando genera señales a los Transistores/Tiristores, empleando una fase y secuencia apropiadas [3].

4.10.2. Reguladores de CC

Como su nombre indica, estos reguladores se emplean en generadores de corriente continua. Existen dos tipos de reguladores de CC:

- Reguladores disipativos: en estos, la potencia de la fuente o generador es superior a la consumida por la carga. Su funcionamiento es sencillo y su fiabilidad es alta. Se emplean cuando la potencia es baja ($<100\text{kW}$).
- Reguladores no disipativos: en estos, la potencia del generador es un poco mas grande que la consumida por la carga, siendo su eficiencia superior a la de los reguladores disipativos.

4.10.3. Reguladores de CA

Estos reguladores son más simples en cuanto a funcionamiento que los reguladores de CC. Los métodos de control se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Control de fase: el control se realiza en cada semiciclo, permitiendo el paso de una fracción de este.
- Control integral: el control permite el paso del semiciclo entero, no una fracción.

4.11. Tipos de central hidroeléctrica

La capacidad de generación de una hidroeléctrica depende de la diferencia de alturas entre la bocatoma y la sala de máquinas, así como de la eficiencia de la turbina.

Las hidroeléctricas se pueden dividir en distintos tipos según la fuente donde se obtiene el agua.

4.11.1. Centrales a filo de agua

Este tipo de centrales obtienen el agua directamente del río empleando una obra civil conocida como bocatoma, la cual esta diseñada para obtener un caudal específico, el cual es transportado por medio de obras de conducción hacia la tubería de presión. El caudal que

no se utiliza sigue el rumbo del cauce. Este tipo de centrales generalmente están compuestas por las siguientes obras civiles [4]:

- Bocatoma: estructura de concreto que se compone de una galería que permite el paso de un caudal específico. La entrada a dicha galería está protegida por una rejilla, la cual impide el paso de objetos que el río arrastre.
- Desarenador: esta estructura permite sedimentar los sólidos que se encuentran disueltos en el agua y que con el tiempo pueden dañar los componentes de la central.
- Canal de conducción: como su nombre indica, esta obra se encarga de conducir el agua de la captación hacia la tubería de presión.
- Cámara de presión: esta obra civil se utiliza para reducir las cargas irregulares que posee el agua antes de entrar a la tubería forzada o de presión. Estas cargas, si no se disipan, pueden provocar el fenómeno conocido como golpe de ariete en la tubería.
- Tubería forzada o de presión: se trata de una tubería de sección llena, la cual conduce el agua hacia la sala de máquinas y está sometida a las presiones estática y dinámica que ejerce el agua. Se puede construir empleando diversos materiales, pero los más utilizados son acero y policloruro de vinilo (PVC).
- Sala de máquinas: esta es la denominación que se le da al lugar donde se encuentra el grupo generador de la central hidroeléctrica. El grupo generador se compone de la turbina hidráulica y el generador de corriente. Aquí también se pueden encontrar dispositivos reguladores de voltaje, bancos de baterías, y sistemas de seguridad adicionales, entre otros.

4.11.2. Centrales acopladas a embalse

Estas centrales obtienen el agua de uno o varios embalses. Están conectadas a los embalses mediante tuberías forzadas que mantienen un caudal casi constante, y la producción de electricidad se regula mediante válvulas [4]. Hay varias configuraciones según el medio para este tipo de hidroeléctrica:

Centrales fluyentes

Un brazo del río se conduce a través de un canal y una tubería hacia la turbina. Luego de atravesar la turbina, el agua es devuelta al cauce principal del río. Los requisitos para el funcionamiento de estas centrales es tener un caudal grande en cualquier época del año y un salto considerable entre el canal y la turbina.

Están compuestas por:

- Azud: estructura que permite elevar el agua para que esta alcance la entrada de la bocatoma.
- Toma: estructura que extrae un caudal específico.

- Canal de derivación: canal que conduce el agua sustraída de un cuerpo de agua hacia un tanque de presión.
- Cámara de carga: cámara que permite que la tubería de presión trabaje a sección llena.
- Tubería forzada: conduce el agua a presión hacia la casa de máquinas.
- Sala de máquinas: instalación donde se encuentran los equipos electromecánicos de una central hidroeléctrica.
- Canal de descarga: canal que devuelve el agua empleada por las turbinas al cauce principal.

Centrales a pie de presa

Están ubicadas por debajo de las unidades de almacenamiento de agua, o simplemente en la cota baja, lugar donde el agua es conducida mediante una tubería con pendiente.

Entre sus componentes están:

- Embalse: estructura de hormigón o tierra que detiene el flujo de agua de un cauce para acumularlo.
- Rejas de filtro: evitan la entrada de objetos sólidos a las obras civiles.
- Tubería forzada
- Turbina hidráulica
- Eje
- Alternador
- Transformadores

Centrales reversibles o de bombeo

Generan energía de manera similar a las centrales de flujo, pero tienen la característica de estar equipadas con equipo de bombeo que devuelven el caudal hacia un punto intermedio entre la zona de captación del agua y la sala de máquinas, de tal manera que se puede repetir el ciclo de la central hidroeléctrica cuando no se tiene demanda alta de energía eléctrica.

Entre sus componentes se encuentran:

- Embalse
- Presa
- Galería conductiva
- Tubería forzada

4.11.3. Centrales mareomotrices

Utilizan el flujo de las mareas. Estas también utilizan una presa que limita la entrada y salida de marea en la costa. Se produce energía cuando la marea entra, y también cuando esta sale [4].

4.11.4. Centrales mareomotrices sumergidas

Estas centrales funcionan debido al movimiento de las corrientes submarinas. Un concepto similar a este tipo de centrales existe también para los ríos, en donde las turbinas funcionan con el flujo de este.

4.12. Tipos de cimientos

La cimentación es la parte de una estructura que transmite todas las cargas que actúan en una edificación hacia el suelo. Las cargas que deben soportar las cimentaciones son estáticas. Esto es porque se consideran así en el diseño y análisis de la edificación.

4.12.1. Cimientos para edificaciones

Cimiento corrido

Este tipo de cimiento se utiliza para muros de mampostería o elementos que son longitudinales y continuos. La carga que se aplica es distribuida.

Zapatas aisladas

Reciben las cargas de un elemento columna. Estas son extensamente usadas en sistemas de marcos estructurales cuyas columnas no están tan separadas.

Zapatas combinadas

Soportan las cargas de dos o más columnas. Son utilizadas cuando varias zapatas aisladas quedarían traslapadas entre sí.

Losa de cimentación

Se trata de una losa de concreto reforzado de área considerable que debe soportar muros y columnas. Se usan cuando la capacidad del suelo del estudio indica que esta es baja, o simplemente que las cargas son muy grandes, y no se utilizan pilotes de cimentación.

Pilotes de cimentación

Cuando el estrato resistente del suelo está muy profundo, se utilizan estos elementos. Los pilotes pueden ser barrenados o hincados. Los barrenados son pilotes de metal que una vez enterrados, funcionan como encofrados del concreto líquido. Los hincados simplemente están cavados en el suelo.

4.12.2. Cimentación para maquinaria hidráulica

Tipo bloque

Se colocan cerca de la rasante para hacer la diferencia de elevación entre la máquina, las fuerzas dinámicas y el centro de gravedad del sistema compuesto por la turbina y la cimentación, con el fin de determinar el centro de masa cercano a la rasante.

Tipo bloque combinado

Se utilizan para soportar equipo combinado. En este tipo de cimentación es importante determinar el centro de masa cercano al nivel del suelo.

Tipo marco

Estos soportes son elevados, que son comúnmente utilizados para grandes turbinas. La losa de esta estructura se diseña para ser flexible.

Tipo marco con aisladores

Los aisladores se utilizan para mitigar el efecto de las acciones dinámicas. Estos se deben colocar en la parte superior de la columna.

Cimentación montada en resortes

Las bombas pueden ser colocadas sobre resortes para mitigar las fuerzas térmicas de las tuberías de conexión. Su función es similar a los marcos con aisladores.

Bloques de inercia en la estructura

Los bloques de inercia se utilizan para modificar las frecuencias naturales ajenas a las velocidades de operación de las máquinas, y resistir las amplitudes al aumentar la fuerza inercial.

4.13. Condiciones para cimientos de turbinas hidráulicas

Generalmente, las cimentaciones para las turbinas hidráulicas deben ser diseñadas considerando especificaciones especiales de los códigos [4].

Sin embargo, deben cumplir con los siguientes requisitos:

1. Los esfuerzos dinámicos de operación de las turbinas, más otros esfuerzos externos, no deben superar los límites permisibles del material del que esté hecho la cimentación.
2. El suelo debe soportar toda clase de esfuerzos transmitidos por la superficie de contacto –a través de pilotes- sin experimentar asentamientos no previstos.
3. El movimiento de los cimientos o del suelo, para cualquier combinación de cargas, modo de vibración y velocidades de operación, no deben ser sensibles en inmediaciones de la edificación ni sensibles para las personas que estén cerca.

4.14. Obra civil

4.14.1. Bocatomas

Las bocatomas consisten en estructuras que se localizan en la entrada de un canal para que el agua pueda acceder a este.

La función de las bocatomas es captar la corriente de agua y reducir la concentración de sedimentos hasta donde sea posible. También puede funcionar como una medida de seguridad contra impactos o bloqueos causados por la entrada accidental de gravas o sedimentos [5].

Partes de la bocatoma

- Dique: permite cerrar el paso del río, logrando que el agua que se encuentre debajo de la cota de la cresta entre a la conducción
- Rejilla: no permite que ingresen sólidos flotantes demasiado gruesos.
- Desripador: capta los sólidos que logren entrar al canal de conducción.
- Transición de entrada al canal: conecta el desripador con el canal.
- Zampeado y colchón al pie de azud: evita que se erosione la zona del pozo de quietamiento al mitigar la energía cinética del agua cuando cae al azud.
- Compuerta de purga: permite mantener limpia el área de la rejilla.

4.14.2. Canales de conducción

Esta obra civil permite conducir el agua captada en la bocatoma hasta el lugar donde empieza la caída. En pocas palabras, une la bocatoma con el tanque de presión.

La velocidad del agua en el canal debe ser entre 0.7 m/s a 2.0 m/s para evitar sedimentación en el canal y erosión [5].

La sección transversal ideal es semicircular, pero la construcción de esta sección no es práctica, por lo que se opta por usar secciones trapezoidales.

4.14.3. Aliviadero

El aliviadero se utiliza para devolver al cauce principal del río el agua que, de no ser evacuada, puede llegar a saturar los canales de conducción.

Sin el aliviadero, existe el riesgo de que se aumente el caudal en los canales, provocando que se supere la altura máxima de las paredes del canal.

El agua erosiona las bases de los canales, cuya reparación puede ser económicamente costosa. Puede haber varios aliviaderos en un solo canal.

4.14.4. Desarenadores

Esta estructura permite sedimentar los sólidos suspendidos en el canal.

Para lograr que el desarenador funcione, se debe reducir la velocidad del agua en un punto dado al variar la pendiente del canal.

Tipos de desarenadores

- Desarenadores de lavado intermitente
- Desarenador de cámara doble
- Desarenadores de lavado continuo

4.14.5. Tanque de presión

Esta estructura conecta un sistema de baja presión con un sistema de alta presión.

Esta cámara debe cumplir con los siguientes parámetros:

- Tener un volumen de agua de reserva suficiente para que las turbinas puedan operar adecuadamente en las horas de mayor demanda.

- Impedir la entrada de elementos sólidos a las tuberías de presión.
- Sedimentar los sólidos suspendidos en el canal y consecuentemente permitir su eliminación.
- Evacuar el exceso de agua cuando el caudal consumido por las turbinas es menor al caudal de diseño.
- Evitar la entrada de aire a las tuberías de presión.

4.14.6. Tuberías de presión

Permiten transportar el agua de baja presión hacia la turbina.

Esta obra hidráulica es la que más gastos representa en la ejecución de una hidroeléctrica, por lo que su optimización debe ser prioritaria.

Para reducir los costos de mantenimiento de estas tuberías, se recomienda instalarlas sobre soportes y anclajes, con cimientos adecuados y sobre pendientes estabilizadas [5].

Materiales empleados

- Acero comercial
- Policloruro de vinilo (PVC)
- Hierro dúctil centrifugado
- Resina de poliéster con fibra de vidrio reforzado
- Polietileno de alta densidad

4.14.7. Sala de máquinas

Esta estructura debe contener todo el equipo mecánico y eléctrico con el que se transforme la energía cinética a energía eléctrica.

La sala de máquinas se diseña en base a la posición que tendrá el eje de las turbinas, ya sea horizontal o vertical.

Equipo mínimo requerido

Entre el equipo necesario en una sala de máquinas podemos encontrar los siguientes [5]:

- Empalme entre tubería de presión y la entrada a la válvula: permite ajustar el diámetro de la tubería de presión con el de la entrada a la válvula.

- Válvula general: ubicado entre la tubería de presión y la turbina, puede bloquear el paso del caudal.
- Turbina: transforma la energía cinética en energía eléctrica junto con el generador. La turbina debe disponer de un regulador que permite ajustar el caudal de acuerdo con la demanda eléctrica.
- Generador: junto con la turbina, produce energía eléctrica a partir del movimiento de las aspas de la turbina.
- Voltaje de inercia: compensa el momento de inercia entre la turbina y el generador.
- Subestación: se utiliza para canalizar el voltaje producido en la hidroeléctrica.
- Puente grúa: se utiliza para extraer o colocar la turbina si se requieren reparaciones.
- Canal de salida: un tubo difusor devuelve el agua utilizada por la turbina al cauce principal.

4.14.8. Válvulas

Las válvulas se utilizan para cerrar totalmente el paso del agua hacia las turbinas.

Los tipos de válvula más empleados son:

- Válvula mariposa
- Válvula de compuerta
- Válvula esférica

4.14.9. Generadores

El generador es un dispositivo rotativo que recibe el trabajo de flecha de la turbina y lo convierte en energía eléctrica.

Alternadores

Estos generadores son síncronos, y están equipados con un controlador de tensión y tienen bobinas reforzadas, con el fin de soportar las velocidades excesivas de la flecha.

Generadores de inducción

Estos motores de inducción operan como generadores independientes o bien en paralelo con un alternador.

4.15. Rentabilidad

4.15.1. Factores

Los factores a tomar en cuenta para un análisis de rentabilidad de un proyecto hidreléctrico son los que se describen a continuación [5]:

- Tasa de descuento: se utiliza para calcular la rentabilidad de inversiones como tasa de interés, para tener los flujos de egresos e ingresos en un determinado punto en el tiempo.
- Tasa general de inflación y tasa de interés real: la estabilidad monetaria no será confiable si la tasa de inflación supera el 30, por lo que la tasa de interés real de mercado se debe fijar para que abarque una retribución por el capital prestado y para poder compensar la pérdida de poder de adquisición producto del período considerado por causa de inflación.
- Vida útil de la central: este valor es utilizado para el análisis de rentabilidad.
- Gestión de inversión: representan la cantidad de inversiones básicas para ejecutar el proyecto.
- Valor de liquidación: este es el valor residual de la central después de un tiempo determinado de vida útil. Para calcularlo, se debe suponer una depreciación lineal.

4.15.2. Métodos estáticos para el cálculo de rentabilidad

Cálculo comparativos de costos

Se utiliza para escoger entre varias alternativas de generación, tomando en cuenta los costos.

Método de comparación de anualidades de gastos

Consiste en transformar los gastos de inversión durante la vida útil del proyecto en pagos anuales de magnitud constante por medio de un factor de recuperación, denominado FR, el cual depende de la tasa de descuento y la cantidad de años de explotación.

Cálculo de rentabilidad

Se relaciona la utilidad promedio que se obtiene por período en un proyecto de inversión con el capital inmovilizado promedio.

Cálculo del período estático de amortización

Utilizando este método se determina en qué momento se recupera el capital invertido mediante retornos anuales. Este punto de amortización se logra cuando la resta entre ingresos y egresos es cero.

4.16. Pequeñas hidroeléctricas

Según la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial -UNIDO, por sus siglas en inglés-, toda aquella central hidroeléctrica con una potencia instalada de menos de 10 MW debe clasificarse como minihidráulica.

A su vez, la minihidráulica se puede dividir en las siguientes categorías según su potencia:

Cuadro 4: Clasificación de centrales hidroeléctricas según la potencia instalada

Clasificación	Potencia
Picocentral	<5kW
Microcentral	<100kW
Minicentral	<1000kW
Pequeña central	<10000kW

Fuente: UNIDO

Las hidroeléctricas pueden o no conectarse a la red eléctrica nacional, según el objetivo. Para este estudio, se busca determinar si una hidroeléctrica pequeña puede conectarse a la red eléctrica nacional y generar beneficios económicos.

Según lo mencionado en el párrafo anterior, se tienen dos tipos de sistemas de conexión en las hidroeléctricas:

- Sistema off-grid: estos sistemas no están conectados a la red nacional. Estos casi siempre son sistemas que producen potencia exclusivamente para suministrar electricidad de manera local.
- Sistema on-grid: estos sistemas ceden su excedente de energía a la red nacional.

4.16.1. Sistema de presa

Se da un sistema de presa cuando se bloquea el flujo de un río para aumentar la cantidad de agua disponible en una zona. En hidroeléctricas, esto se hace por dos motivos. El primero es garantizar un caudal suficiente para mantener alta la eficiencia de las turbinas, y el segundo es conservar agua durante los períodos secos.

4.16.2. Elección del sitio y medición de parámetros básicos

La elección del lugar donde se instalará una central hidroeléctrica depende de los siguientes aspectos:

- Poseer terrenos adecuados
- Accesibilidad del sitio
- Medición de salto y caudal

Una vez se ha determinado que el sitio posee los anteriores requisitos, se toman mediciones del caudal a utilizar y del salto para poder calcular la potencia utilizable del sistema:

$$P_t = Q * H * g * n_t * n_g * n_c \quad (2)$$

Donde:

P_t = potencia teórica (W)

g = aceleración gravitacional (m/s²)

Q = caudal medio (m³/s)

H = diferencia de alturas entre la bocatoma y la sala de máquinas (m)

n_t = eficiencia de la turbina

n_g = eficiencia del generador

n_c = eficiencia de la tubería forzada

4.16.3. Medición de salto y caudal

Existen métodos empíricos para medir el caudal de un río. Se puede, mediante puntos, determinar la sección hídrica y calcular el área mediante el producto entre el ancho del canal de agua a cielo abierto y la altura media de la corriente. A su vez, se debe medir la velocidad de la corriente utilizando un flotador, y multiplicar finalmente los valores obtenidos.

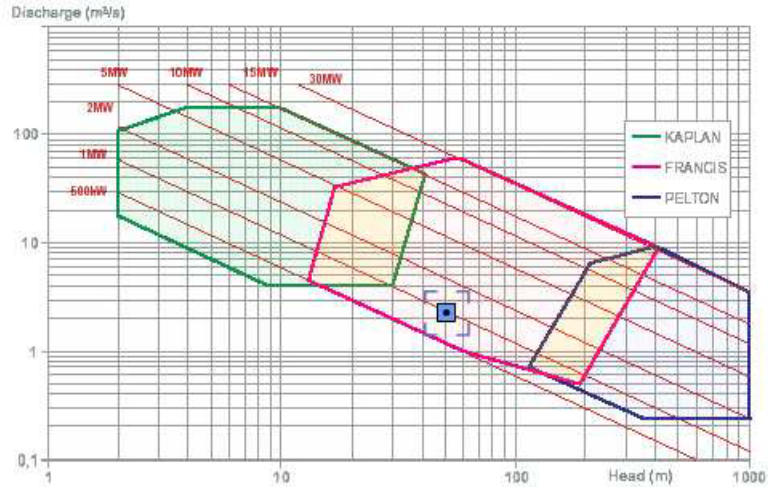
La altura del salto hidráulico se puede obtener directamente utilizando un altímetro. La medición del caudal puede ser compleja ya que se necesita un estudio del régimen del curso de agua.

Para potencias mayores a 10 kW, se debe realizar un estudio hidrológico. Este estudio permite calcular el caudal de la sección a utilizar, ya sea mediante medición directa -aforo- o utilizando datos hidrológicos previamente disponibles. También es imperativo generar una curva de duración de caudales, la cual muestra la probabilidad de que se de cierto caudal en el período estudiado.

4.16.4. Elección de turbinas

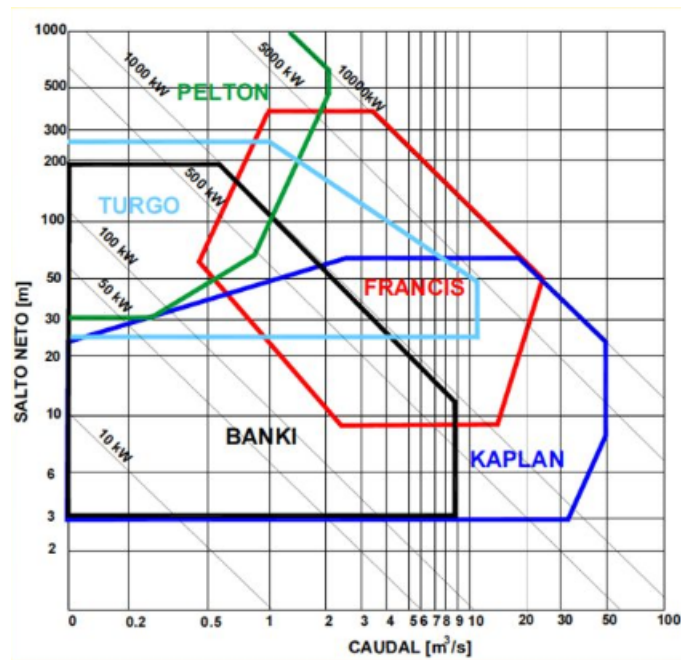
Es posible utilizar normogramas para determinar el tipo de turbina a utilizar para un sistema hídrico determinado. El normograma sirve para extrapolar el tipo de turbina necesario y su tamaño en términos de la potencia media.

Figura 10: Nomograma de turbinas



También se pueden utilizar curvas de eficiencia para determinar que turbina es la más eficiente para el sistema diseñado, en función del salto y del caudal de diseño.

Figura 11: Curva de aplicación de turbinas



En este capítulo se describirán los métodos empleados para realizar el estudio de factibilidad previo a la implementación de una central hidroeléctrica pequeña en el municipio de San Cristóbal Acasaguastlán.

5.1. Descripción de estudios de ingeniería

El método propuesto consiste en dimensionar las obras civiles requeridas para que una central hidroeléctrica a filo de agua pueda operar utilizando el río Uyús, el cual está ubicado en el municipio mencionado previamente.

Para dimensionar las obras civiles, se deben hacer tres estudios básicos. Estos estudios se detallan a continuación:

- Estudio cartográfico: este estudio consiste en generar mapas cartográficos para evaluar características de la zona de estudio como longitud del cauce, tipo de terreno, poblados, accesos, y otros. Con este estudio también se pueden obtener perímetros y áreas para poder realizar el estudio hidrológico.
- Estudio topográfico: este estudio permite conocer las características del terreno, que pueden ser elevaciones y pendientes. Con este estudio se pueden determinar saltos hidráulicos potenciales en la zona de estudio, así como la ubicación de las obras civiles.
- Estudio hidrológico: este estudio permite conocer las características hídricas de la zona de estudio, con las cuales se pueden elaborar curvas de duración, hidrogramas de crecidas y otros datos estadísticos que tienen como finalidad determinar los caudales característicos del río, y el caudal de diseño para la central hidroeléctrica.

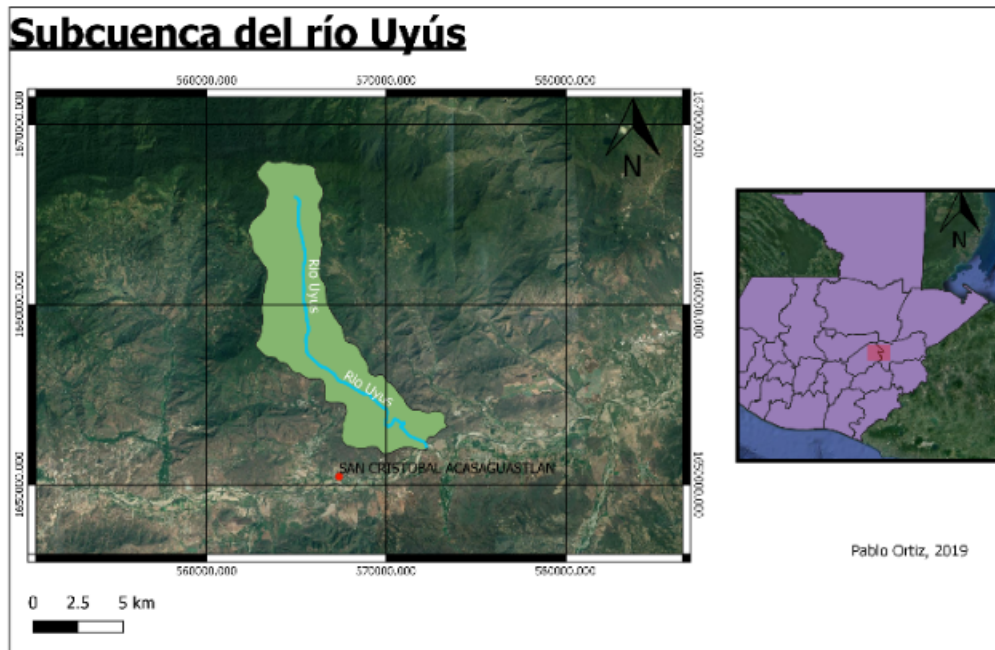
Una vez realizados los estudios anteriores, se deben dimensionar las obras civiles para calcular los costos de inversión.

Con el caudal de diseño y el salto, se puede determinar la potencia efectiva de la central para calcular la generación, y si es el caso, el precio de venta según las tarifas del Administrador del Mercado Mayorista (AMM) al conectar la central a la red nacional para comparar los beneficios con los costos de inversión, para finalmente determinar la viabilidad del proyecto.

5.2. Descripción del área de estudio

Se pretende hacer una captación de agua en el río Uyús para hacer funcionar la hidroeléctrica. Este río está ubicado en el municipio de San Cristóbal Acasaguastlán, El Progreso. Forma parte de la cuenca del río Motagua como una subcuenca.

Figura 12: Subcuenca del río Uyús



Fuente: Elaboración propia

El cauce del río Uyús atraviesa un terreno bastante pronunciado, pues su pendiente media es de 21 %. El cauce está rodeado de cerros, y prácticamente solo en la parte alta se encuentran terrenos relativamente planos. Esto se puede apreciar en el siguiente mapa de irregularidades:

Figura 13: Mapa de irregularidades

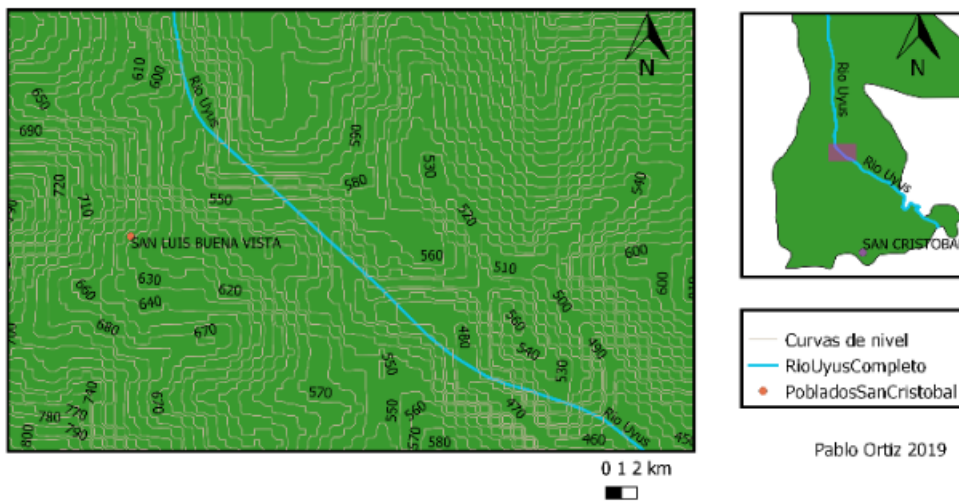


Fuente: Elaboración propia

La topografía de la zona de estudio indica que existen diferencias de elevaciones de hasta 50 metros en distancias menores a 1km. Las elevaciones se pueden apreciar en la siguiente figura:

Figura 14: Curvas de nivel del área de estudio

Curvas de nivel (10m)



Fuente: Elaboración propia

5.3. Descripción de los procedimientos para la obtención de datos

5.3.1. Medición del salto de agua

La medición del salto de agua se realizó utilizando dos programas de computación: QGIS 3.4 y Autodesk Civil 3D 2019 Metric. Con estos programas, se elaboraron las curvas de nivel del área de estudio a partir de un Modelo de Elevación Digital -DEM, por sus siglas en inglés- utilizando Civil 3D. A estas curvas de nivel se les generó una vista de perfil para determinar las cotas de elevación del terreno y determinar el salto.

Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital utilizado lo generó el Instituto Geográfico Nacional para todo el territorio guatemalteco. Utilizando QGIS 3.4, se delimitó la subcuenca del río Uyús, y se cortó el DEM del territorio nacional para que solo se incluyera la subcuenca. Una vez hecho esto, se agregaron también las capas vectoriales del río y de otros datos como caminos y poblados a QGIS para obtener referencias para hacer las curvas de nivel.

Curvas de nivel

Una vez que se tuviera el DEM de la subcuenca, este se exportó a Civil 3D. Con ayuda de este programa, se hicieron varias elevaciones de perfil, hasta encontrar un tramo donde la pendiente no superara el 70 %. Finalmente, se realizó un perfil de elevación con una pendiente de 62 % en una sección no muy irregular.

Con este perfil se determinó el salto hidráulico necesario para poder determinar la potencia efectiva de la central propuesta.

5.3.2. Determinación del caudal de diseño

El método para encontrar los caudales característicos de un río dependerá de los datos disponibles, dándose tres posibles escenarios [6].

Método 1: Se conocen los caudales anuales

Este método aplica si se tienen registros anuales de los caudales de por lo menos 5 años. Para este método, se elaboran las siguientes gráficas y curvas:

- Hidrograma instantáneo: esta curva se genera con los caudales medios mensuales para el período de retorno considerado. Con esta curva se determinan los caudales máximo, medio y mínimo. A estos tres caudales se les conoce como caudales característicos.

- Curva de duración de caudales: esta curva es producto de asociar un caudal específico con una probabilidad de excedencia. El caudal de diseño será el caudal que tenga una probabilidad de excedencia del 90 %.

Método 2: Se desconocen los caudales anuales, pero se tienen registros de precipitación para la subcuenca

Este método aplica si no se tiene suficiente información acerca de los caudales, pero sí se tienen datos de precipitación de la zona de estudio. Es importante mencionar que se necesita al menos tener registros de los caudales de mínimo un año.

En este método se utilizan los datos de precipitación de estaciones meteorológicas para determinar los caudales característicos anuales del recurso hídrico a utilizar.

Con los datos de precipitaciones se pueden trabajar con uno de los siguientes tres métodos descritos a continuación:

- Método aritmético: este método es eficaz cuando las estaciones meteorológicas se encuentran en la misma subcuenca, o la diferencia entre el promedio de los registros acumulados entre las estaciones no supera el 10 %.

$$P = \frac{1}{n} * \sum P_i \quad (3)$$

Donde:

n = número de estaciones.

P_i = precipitación en la estación.

- Método de polígonos de Thiessen: este método consiste en delimitar un polígono que representa el área de influencia de una estación meteorológica. Los polígonos se trazan uniendo todas las estaciones con líneas rectas para formar los perímetros de cada polígono. La precipitación se determina así:

$$P = \frac{\sum P_i * A_i}{A_t} \quad (4)$$

Donde:

P_i = precipitación de la estación

A_i = área del polígono de la estación

A_t = área total

- Método de las isolíneas o líneas equivalentes: en este método se realiza un procedimiento análogo al de las curvas de elevación utilizadas en topografía, pero en vez de realizar las curvas solamente con datos de elevación, se hacen también con datos de precipitación.

Para encontrar la precipitación se utiliza la misma ecuación que utiliza el método de polígonos de Thiessen:

$$P = \frac{\sum P_i * A_i}{A_t} \quad (5)$$

Donde:

P_i = precipitación entre isolíneas

A_i = área entre isolíneas

A_t = área total

Caudal máximo

Este caudal se produce cuando los caudales aumentan rápidamente en un tiempo muy corto, el cual es causado por lluvias intensas.

Para determinar el caudal de diseño, se toma el 2 % del caudal máximo obtenido a partir del hidrograma efectivo, el cual se detallará más adelante.

Método 3: Se tienen datos de una cuenca adyacente

Este método se utiliza cuando no se tienen datos de los caudales ni de la precipitación. En este caso, se utilizan los datos de una cuenca o subcuenca paralela, transponiéndose los datos deseados.

- Transposición de caudales: se determina un coeficiente determinado por la similitud entre las características de las dos cuencas de la siguiente manera:

$$C = \frac{A_1 * (P_1 - E_1)}{A_2 * (P_2 - E_2)} \quad (6)$$

Donde:

A_1 = área de drenaje en la zona de la bocatoma

A_2 = área de drenaje de la zona de la estación

P_1 = precipitación media de la cuenca de drenaje en la zona de la toma

P_2 = precipitación media de la cuenca de drenaje en la zona de la estación

E_1 = evapotranspiración de la cuenca en la zona de la bocatoma

E_2 = evapotranspiración de la cuenca en la zona de la estación

5.3.3. Determinación de los caudales de crecida

Además de determinar los caudales característicos del río, así como el caudal de diseño, se deben determinar los caudales de crecida de tormenta para el diseño de las obras civiles.

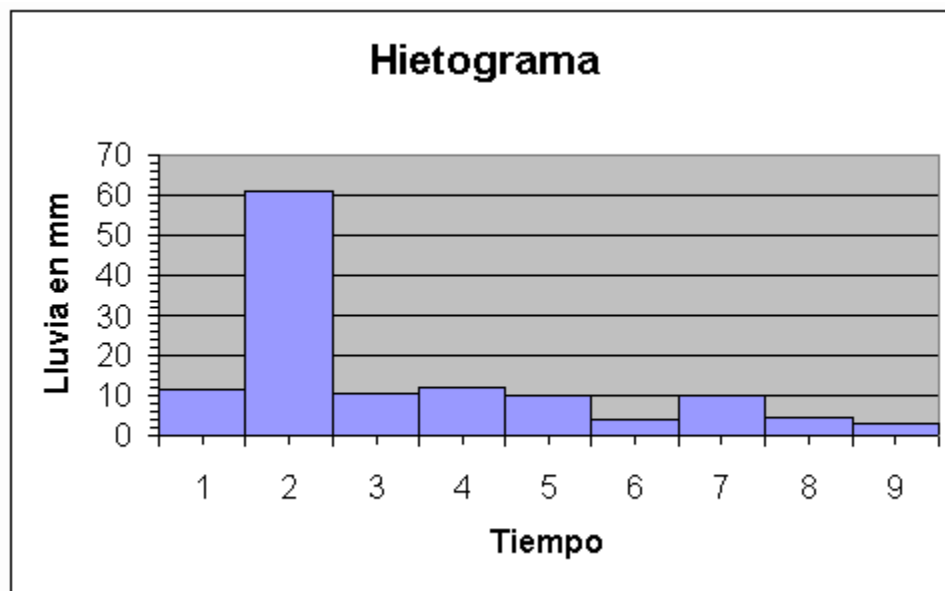
Los caudales de crecida se determinan elaborando hietogramas e hidrogramas a partir de una tormenta de diseño. El método empleado para la elaboración de los hidrogramas en este trabajo de graduación se describe a continuación:

Hietograma

El hietograma es un registro de las precipitaciones registradas en una estación meteorológica para una tormenta de diseño. Generalmente, la tormenta de diseño se determina utilizando métodos estadísticos, pero también se pueden utilizar los datos de una tormenta real.

En el caso de este estudio, se tomaron los datos de precipitación registrados por la estación meteorológica del INSIVUMEH "Los Albores", para el 30 de mayo de 2010, fecha en la cual la tormenta tropical *Agatha* se encontraba en el territorio nacional.

Figura 15: Ejemplo de un hietograma



Fuente: Vallarino y Cuesta, 2000

Hidrograma de crecida

El hidrograma de crecida representa el caudal pico que se produciría debido a la precipitación de la tormenta de diseño. Este caudal se calcula utilizando la fórmula del método racional [7]:

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6} \quad (7)$$

Donde:

C = coeficiente de escorrentía

I = intensidad de precipitación (mm/h)

A = área de la superficie de la cuenca (km²)

Hidrograma unitario

El hidrograma unitario se utiliza para calcular la precipitación efectiva en la subcuenca.

Este hidrograma permite calcular el volumen acumulado de lluvia en función del tiempo. Para encontrar el volumen acumulado, se encuentra el área bajo la curva del hidrograma de crecida [8].

La ecuación para encontrar la precipitación efectiva es la siguiente:

$$P_e = \frac{A_c}{V_a * 1000} \quad (8)$$

Donde:

P_e = precipitación efectiva (mm)

A_c = área superficial de la subcuenca (km²)

V_a = volumen acumulado (m³)

Hidrograma triangular sintético (SCS)

El hidrograma triangular sintético permite graficar el caudal máximo o punta que se puede dar en la subcuenca según los registros de precipitación y las características de la cuenca.

Las características de la cuenca, como el largo del cauce y la pendiente media del mismo, influyen en el tiempo de concentración, el cual es el tiempo que se necesita para que todos los puntos superficiales de la subcuenca aporten simultáneamente al caudal en la parte baja del cauce [8].

Para elaborar este hidrograma, se deben calcular los siguientes parámetros:

- Tiempo de concentración (t_c)

$$t_c = 0.000325 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (9)$$

Donde:

t_c = tiempo de concentración (horas)

L = longitud del cauce (m)

S = pendiente media del cauce (m/m)

Luego, se calcula el tiempo de retención o retardo (t_r) con la siguiente ecuación:

$$t_r = 0.6t_c \quad (10)$$

Una vez hecho esto, se calcula la duración de la lluvia (d_e) con la ecuación siguiente:

$$d_e = 2 * \sqrt{t_c} \quad (11)$$

El tiempo pico (t_p) se puede calcular de la siguiente forma, utilizando la siguiente ecuación:

$$t_p = \frac{d_e}{2} + t_r \quad (12)$$

Para obtener el tiempo base (t_b), se utiliza la ecuación siguiente:

$$t_b = \frac{8}{3} * t_p \quad (13)$$

Finalmente, el caudal pico (Q_p) se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_p = 0.208 * \frac{A_c}{t_p} \quad (14)$$

Con todos los valores anteriores, se grafica el hidrograma triangular sintético de la siguiente forma:

Hidrograma unitario adimensional

Este hidrograma sirve para darle forma de hidrograma real al hidrograma triangular sintético, el cual tiene forma triangular [8].

Los datos de este hidrograma siempre son los siguientes:

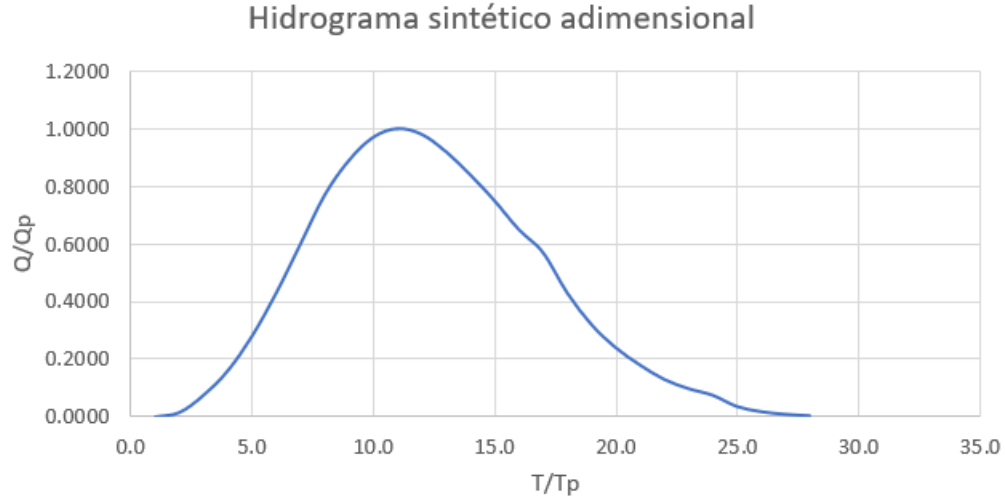
Cuadro 5: Datos del histograma adimensional

$\frac{T}{t_p}$	$\frac{Q}{Q_p}$
0.0	0.0000
0.1	0.015
0.2	0.075
0.3	0.160
0.4	0.280
0.5	0.430
0.6	0.600
0.7	0.770
0.8	0.890
0.9	0.970
1.0	1.000
1.1	0.980
1.2	0.920
1.3	0.840
1.4	0.750
1.5	0.650
1.6	0.570
1.8	0.430
2.0	0.320
2.2	0.240
2.4	0.180
2.6	0.130
2.8	0.098
3.0	0.075
3.5	0.036
4.0	0.018
4.5	0.009
5.0	0.004

Fuente: Campos, 2016

Con los datos anteriores se grafica el hidrograma adimensional, el cual siempre tiene la misma forma:

Figura 16: Hidrograma sintético adimensional



Fuente: Campos, 2016

Hidrograma efectivo

El hidrograma efectivo se genera multiplicando cada una de las celdas de la tabla por T_p y Q_p respectivamente, generando la tabla base para construir el hidrograma efectivo.

Una vez que se tiene la nueva tabla, se procede a multiplicar todas las celdas de la columna de caudales (Q) por el valor que se obtuvo anteriormente de precipitación efectiva (P_e).

Finalmente, se obtiene una tabla final con la que se grafica el hidrograma efectivo, el cual muestra el caudal máximo para la tormenta de diseño.

5.4. Dimensionamiento de obras civiles

El dimensionamiento de las obras civiles mínimas requeridas para la operación de una central hidroeléctrica pequeña tiene como objetivo determinar parte de los costos de inversión y mantenimiento que tendrá durante su vida útil.

El dimensionamiento de las obras civiles implica conocer el comportamiento del río en función de su régimen de caudales, para así poder aumentar su eficiencia y evitar deterioros en las mismas que impliquen un alza en sus costos de mantenimiento.

5.4.1. Bocatoma de fondo

Esta obra civil tiene como función captar un caudal específico de agua. Además de aplicarse en centrales hidroeléctricas, también se puede aplicar en obras de captación de

agua generales.

La bocatoma garantiza que el agua tomada tenga un caudal constante. Por otro lado, cuenta con una rejilla que evita el paso de objetos sólidos.

La bocatoma debe ubicarse en los tramos rectos del cauce del río, utilizando los estudios topográfico y cartográfico.

Una bocatoma de fondo, que es la que será diseñada en este trabajo de graduación, esta compuesta por los siguientes elementos [9]:

- Muros laterales: estos conducen el río hacia la rejilla, además de proteger los alrededores de la toma de crecidas. Se construyen con concreto.
- Canal colector: este recibe el agua que pasa por la rejilla y conduce el agua hacia la cámara de recolección. Por razones económicas, su sección transversal se construye rectangular, con una pendiente de no mas de 14%, para mantener una velocidad adecuada en la que no se produzca sedimentación.
- Cámara de recolección: su sección, de preferencia, debe ser rectangular. A sus laterales posee un vertedero de excesos que elimina el agua sobrante del sistema, la cual se conduce de nuevo al cauce principal.

Cálculo de la lámina de agua de diseño

$$H = \left(\frac{Q_d}{1.84L}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

Donde:

H = altura lámina de agua (m)

Q_d = caudal de diseño ($\frac{m^3}{s}$)

L = ancho del río (m)

Velocidad del río sobre la entrada

$$V_r = \left(\frac{Q_d}{L * H}\right) \quad (16)$$

Donde:

V_r = velocidad a la entrada ($\frac{m}{s}$)

Ancho del canal colector

Para el diseño de estos elementos se pueden utilizar las ecuaciones de H. Babbitt siempre y cuando se cumpla la siguiente condición:

$$0.3m/s < V_r < 3m/s \quad (17)$$

Las ecuaciones de H. Babbitt son las siguientes:

$$X_s = 0.36V_r^{\frac{2}{3}} + 0.60H^{\frac{4}{7}} \quad (18)$$

$$X_i = 0.18V_r^{\frac{4}{7}} + 0.74H^{\frac{3}{4}} \quad (19)$$

$$B = X_s + 0.10 \quad (20)$$

Donde:

X_s = alcance del filo superior (m)

X_i = alcance del filo inferior (m)

B = ancho del canal colector (m)

Longitud de la rejilla y número de orificios

El área neta de la rejilla se calcula con:

$$A_n = \frac{Q_d}{0.9V_b} \quad (21)$$

Donde:

A_n = área neta de la rejilla (m^2)

V_b = velocidad del agua entre barrotes (m/s)

La longitud de la rejilla se calcula con la expresión siguiente:

$$L_r = \left(\frac{a+b}{a}\right) \frac{A_n}{B} \quad (22)$$

Donde:

a = separación entre barrotes (m)

b = diámetro de cada barrote (m)

El número de orificios se calcula con la expresión:

$$N = \frac{A_n}{a * B} \quad (23)$$

Donde:

N = número de orificios en la rejilla

El área neta se puede volver a calcular de la siguiente forma:

$$A_n = a * B * N \quad (24)$$

La velocidad entre barrotes se puede volver a calcular de la siguiente manera:

$$V_b = \frac{Q_d}{0.9 * A_n} \quad (25)$$

Niveles del agua en el canal de aducción

Los niveles del agua en el canal de aducción se calculan con las siguientes ecuaciones:

- Aguas abajo

$$h_e = h_c = \left(\frac{Q_d^2}{gB^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

Donde:

h_e = altura aguas abajo (m)

g = aceleración gravitacional ($\frac{m}{s^2}$)

- Aguas arriba

$$L_{canal} = L_r + \epsilon \quad (27)$$

Donde:

L_{canal} = largo del canal (m)

ϵ = espesor del muro (m)

$$h_o = \left[2h_e^2 + \left(h_e - \frac{iL_{canal}}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{2}{3}iL_{canal} \quad (28)$$

Donde:

h_o = Altura aguas arriba (m)

i = pendiente del canal

Altura total de los muros del canal de aducción

$$H_o = h_o + B.L. \quad (29)$$

Donde:

H_o = altura muro aguas arriba (m)

$B.L$ = borde libre (m)

$$H_e = H_o + iL_{canal} \quad (30)$$

H_e = altura del muro aguas abajo (m)

Velocidad del agua al final del canal

$$V_e = \frac{Q_d}{Bh_e} \quad (31)$$

Diseño de la cámara de recolección

$$X_s = 0.36V_e^{\frac{2}{3}} + 0.60h_e^{\frac{4}{7}} \quad (32)$$

$$X_i = 0.18V_e^{\frac{4}{7}} + 0.74h_e^{\frac{3}{4}} \quad (33)$$

$$B_{camara} = X_s + \epsilon \quad (34)$$

Donde:

B_{camara} = ancho de la cámara de recolección (m)

Cálculo de altura de los muros de contención

$$H_{muros} = \left(\frac{Q_{max}}{1.84L}\right)^{\frac{2}{3}} + 0.4 \quad (35)$$

Donde:

H_{muros} = altura de los muros de contención (m)

Q_{max} = caudal máximo del río ($\frac{m^3}{s}$)

Cálculo del caudal de excesos

Se debe encontrar una lámina de agua al inicio de la toma, pero esta vez con el caudal medio del río:

$$H_g = \left(\frac{Q_{med}}{1.84L}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (36)$$

Donde:

Q_{med} = caudal medio del río ($\frac{m^3}{s}$)

Con este dato se encuentra el caudal de capacidad del canal de recolección (Q_{cap})

$$Q_{cap} = C_d * A_{neta} * \sqrt{2gH_g} \quad (37)$$

Donde:

Q_{cap} = caudal de capacidad del canal ($\frac{m^3}{s}$)

C_d = coeficiente de descarga

A_{neta} = área neta de la rejilla (m^2)

Se procede a encontrar el caudal de excesos:

$$Q_{exc} = Q_{cap} - Q_d \quad (38)$$

Donde:

Q_{exc} = caudal de excesos ($\frac{m^3}{s}$)

Condiciones en el vertedero de excesos

$$H_{exc} = \left(\frac{Q_{exc}}{1.84B_{camara}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (39)$$

Donde:

H_{exc} = tirante del caudal de excesos (m)

$$V_{exc} = \frac{Q_{exc}}{H_{exc}B_{camara}} \quad (40)$$

Donde:

V_{exc} = velocidad del caudal de excesos ($\frac{m}{s}$)

$$X_s = 0.36V_{exc}^{\frac{2}{3}} + 0.60h_{exc}^{\frac{4}{7}} \quad (41)$$

5.4.2. Dimensionamiento del desarenador de flujo horizontal

El desarenador es una estructura que restringe la velocidad de un flujo a un rango de velocidades específicas, con el fin de permitir la sedimentación de las partículas sólidas que el agua lleva disuelta [9].

Para diseñar este tipo de obra civil es necesario conocer el tipo de flujo de la lámina de agua entrante utilizando el número de Reynolds:

$$R_e = \frac{V_s * d}{\nu} \quad (42)$$

Donde:

Re = número de Reynolds

V_s = velocidad de sedimentación ($\frac{m}{s}$)

d = diámetro de una partícula sedimentable (m)

ν = viscosidad cinemática ($\frac{m^2}{s}$)

Con la ecuación anterior se debe determinar si el flujo es laminar ($Re < 1$), turbulento ($Re > 2000$) o transitorio.

El método consiste en ir suponiendo el tipo de flujo, y comprobar mediante las fórmulas que se describirán a continuación.

Para utilizar la fórmula de Reynolds, se debe primero contar con la velocidad de sedimentación (V_s), la cual se encuentra con la siguiente expresión si se supone que el flujo es laminar:

$$V_s = \frac{(S - 1)gd^2}{18\nu} \quad (43)$$

Donde:

S = densidad relativa de la arena

g = aceleración gravitacional ($\frac{m}{s^2}$)

Si el resultado del número de Reynolds no coincide con la suposición anterior, se procede a utilizar otra ecuación para V_s , en donde se supone que el flujo es turbulento:

$$V_s = \sqrt{2.66 * g * d * (S - 1)} \quad (44)$$

Si después de hacer las suposiciones anteriores se obtiene que el flujo no es ni laminar ni turbulento, entonces el flujo se considera como transitorio o de transición, lo cual implica que se debe hacer un nuevo procedimiento para encontrar V_s .

Este procedimiento implica encontrar la velocidad de sedimentación utilizando la fórmula de Reynolds más las siguientes ecuaciones:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (45)$$

Donde:

C_d = coeficiente de arrastre

$$V_s = \sqrt{\frac{4gd(S - 1)}{3C_d}} \quad (46)$$

Este método consiste en asumir inicialmente un valor arbitrario de V_s , luego utilizar las ecuaciones descritas anteriormente en sucesión, hasta que el nuevo valor de V_s no cambie.

Este valor, y el C_d respectivo serán los parámetros que definirán la geometría del desarenador.

Velocidad de arrastre

Se procede ahora a calcular la velocidad de arrastre (V_d), la cual también se denota como (V_h).

$$V_h = \frac{Q_{max}}{A_{trans}} \quad (47)$$

Donde:

V_h = velocidad de arrastre horizontal ($\frac{m}{s}$)

Q_{max} = caudal máximo de entrada ($\frac{m^3}{s}$)

A_{trans} = área de la lámina de agua en transición (m^2)

$$V_d = 44\sqrt{d} \quad (48)$$

Donde:

V_d = velocidad de arrastre ($\frac{m}{s}$)

d = diámetro de la partícula (mm)

Con este valor se encuentra el de A_{trans} , utilizando la expresión siguiente:

$$\frac{Q_{max}}{V_h} \quad (49)$$

Largo del canal sedimentador

A partir de aquí, se debe encontrar la longitud del canal de sedimentación utilizando el mayor resultado obtenido de las siguientes dos expresiones:

$$L = \frac{V_d * h}{V_s - 0.04V_d} \quad (50)$$

Donde:

L = largo del sedimentador (m)

$$15h < L < 25h \quad (51)$$

Donde:

h = tirante de agua en el sedimentador (m)

Es importante destacar que ambas ecuaciones están en términos de h , variable que define el tirante de agua en el sedimentador.

Ancho del canal de sedimentación

El ancho del canal se puede calcular utilizando la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{A_{trans}}{h} \quad (52)$$

Donde:

β = ancho del canal de sedimentación (m)

Largo del alerón de entrada

Para calcular el valor del alerón, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$I = \frac{B - B_{canal}}{2 \tan \theta} \quad (53)$$

Donde:

B_{canal} = ancho del canal de conducción (m)

θ = ángulo del alerón respecto a la horizontal.

El valor del ángulo θ , para un desarenador de flujo horizontal, se toma constante como $12^{\circ}30'$

Tiempo de retención

Como último paso, se debe encontrar el tiempo de retención (T_s) y el tiempo de desplazamiento (T_d) utilizando las siguientes ecuaciones:

$$T_d = \frac{L}{V_d} \quad (54)$$

Donde:

T_d = tiempo de retención (s)

$$T_s = \frac{h}{V_s} \quad (55)$$

Donde:

T_s = tiempo de desplazamiento (s)

Una vez determinados estos valores, se debe cumplir con:

$$T_d > T_s \quad (56)$$

De no cumplirse esta condición, se debe suponer otro valor para el tirante de agua h hasta que se cumpla.

5.4.3. Dimensionamiento del canal de conducción

El canal de conducción debe permitir el paso del agua desde la toma del río hacia la cámara de presión. El tipo de canal de conducción a utilizar será de tipo abierto, el cual se dimensiona siguiendo los siguientes procedimientos [9].

Condiciones iniciales

Para poder dimensionar un canal de conducción, es necesario asumir ciertos valores iniciales para poder revisar que la velocidad de flujo no supere la velocidad máxima permitida, la cual está definida por el material a utilizar para el canal.

Los valores a asumir son los siguientes:

Q_d = caudal de diseño ($\frac{m^3}{s}$)

V = velocidad de conducción ($\frac{m}{s}$)

b = ancho del canal de conducción (m)

d = tirante del canal de conducción (m)

El método para diseñar el canal de conducción simplificado se basa en las ecuaciones de Chézy.

Dimensionamiento de la sección del canal

Con los datos anteriormente asumidos, se procede a encontrar los siguientes parámetros:

$$A = b * d \quad (57)$$

Donde:

A = sección requerida para el canal (m^2)

$$P = b + 2d \quad (58)$$

Donde:

P = perímetro mojado (m)

$$R = \frac{A}{P} \quad (59)$$

Donde:

R = radio hidráulico (m)

Una vez encontrados los datos anteriores, se necesita determinar algunos valores que dependen del material elegido para el canal:

V_{max} = velocidad máxima permitida en el canal

n = parámetro de rugosidad de Manning para el concreto

i = gradiente del canal

Con estos valores se determina la velocidad real en el canal (V_{real}):

$$V_{real} = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * \sqrt{i} \quad (60)$$

Donde:

V_{real} = velocidad real en el canal ($\frac{m}{s}$)

Se debe verificar que se cumpla la siguiente condición:

$$V_{real} < V_{max} \quad (61)$$

De no cumplirse esta condición, se deben revisar de nuevo los parámetros asumidos en un inicio.

5.4.4. Dimensionamiento de aliviaderos y ubicacion en el canal

El canal de conducción, al ser a cielo abierto, debe de contar con aliviaderos para evacuar el exceso de agua provocado por el escurrimiento del agua de lluvia. Estos aliviaderos se deben colocar cada cierta distancia para aumentar la eficiencia del sistema y evitar crecidas no contempladas en el dimensionamiento del canal.

Para dimensionar los aliviaderos, se deben tomar en cuenta las ecuaciones de Chézy y de Manning, pero esta vez con el caudal máximo esperado, en sustitución del caudal de diseño.

Radio hidráulico

El radio hidráulico se puede calcular con la siguiente expresión:

$$R = \left(\frac{V_{max} * n}{i^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (62)$$

Donde:

R = radio hidráulico (m)

V_{max} = velocidad máxima permisible ($\frac{m}{s}$)

n = parámetro de rugosidad de Manning

i = gradiente del canal

Dimensionamiento de la sección y la altura del tirante

Para calcular la sección requerida por el tirante, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$S = \frac{Q_{max}}{\frac{1}{n} * \sqrt{R^{\frac{4}{3}} * i}} \quad (63)$$

Donde:

S = sección del tirante (m^2)

Q_{max} = caudal máximo esperado ($\frac{m^3}{s}$)

Finalmente, se calcula el tirante provocado por el caudal máximo:

$$H = \frac{S}{B} \quad (64)$$

Donde:

H = tirante del caudal máximo (m)

B = ancho del canal de conducción (m)

Determinación de la altura de seguridad

La altura de seguridad se determina con la siguiente expresión:

$$SH = i * L + H + 0.05 \quad (65)$$

Donde:

SH = altura de seguridad (m)

L = longitud entre aliviaderos (m)

Esta será a altura del encauce del canal.

5.4.5. Dimensionamiento de la cámara de carga

Esta obra civil se utiliza para acumular un volumen de agua que sirve como reserva, además de asegurar que la entrada al sistema de conducción a presión este sumergida. También evita la entrada de aire a la tubería de presión [9].

Otra función que tiene esta obra civil es eliminar cualquier sólido antes de que entre a la tubería de presión, y sedimentar cualquier partícula que el desarenador principal no haya podido.

El ancho de la entrada de la cámara de carga es el mismo que el ancho del canal de conducción, al igual que el tirante.

Volumen necesario para el tanque de carga

Para encontrar el volúmen requerido por el tanque de carga, se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$V_t = \frac{0.693 * Q_d^2}{A * i * g} \quad (66)$$

Donde:

V_t = volumen del tanque de carga ($\frac{m^3}{s}$)

A = área del canal de conducción (m^2)

g = aceleración gravitacional ($\frac{m}{s^2}$)

i = gradiente del canal de conducción

Dimensionamiento del tanque de carga

$$H = \frac{V_t}{300} + K \quad (67)$$

Donde:

H = profundidad del tanque de almacenamiento (m)

K = constante de capacidad

$$\sqrt{\frac{V_t}{H}} \quad (68)$$

Donde:

B = ancho del tanque de almacenamiento (m)

Estas dimensiones garantizan que el agua se almacene y puede ser conducida a la tubería de presión.

5.4.6. Dimensionamiento de la tubería de presión

La tubería de presión es el elemento más crítico en el diseño de una central hidroeléctrica, pues debido a su longitud, el precio de instalación puede ser mas alto incluso que el de las obras civiles [9].

Por otro lado, su diseño es muy delicado pues la integridad de la tubería de presión se puede ver afectada por el golpe de ariete, además de tener que soportar las presiones estática y dinámica propias del agua.

El dimensionamiento de una tubería de presión simplificado se efectúa a partir del siguiente procedimiento.

Calculo del diámetro requerido por la tubería

Se comienza calculando la carga estática del agua que debe soportar la tubería:

$$H_e = C_{sup} - C_{inf} \quad (69)$$

Donde:

H_e = carga estática del agua (m)

C_{sup} = cota piezométrica superior (m)

C_{inf} = cota piezométrica inferior (m)

Luego, se calcula la presión hidroestática:

$$P = \frac{\rho * g * H_e}{1 * 10^6} \quad (70)$$

Donde:

P = presión hidroestática ($\frac{kN}{mm^2}$)

ρ = densidad del agua ($\frac{kg}{m^3}$)

g = aceleración gravitacional ($\frac{m}{s^2}$)

Luego, se calcula la velocidad media del agua a lo largo de la tubería:

$$V = 0.125 * \sqrt{2 * g * H_e} \quad (71)$$

El diametro para la tubería, según estas condiciones, será:

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q_{tanque}}{3.14 * V}} \quad (72)$$

Donde:

D = diámetro de la tubería requerido (m)

Q_{tanque} = caudal de seguridad que podría salir del tanque ($\frac{m^3}{s}$)

Con el diámetro de la tubería se procede a calcular el golpe de ariete.

Cálculo del golpe de ariete

Para encontrar la carga provocada por el golpe de ariete, se efectúa el procedimiento siguiente [10]:

$$k = \frac{10^{10}}{\epsilon} \quad (73)$$

Donde:

k = coeficiente representativo de elasticidad del material de la conducción

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + \frac{kD}{e}}} \quad (74)$$

Donde:

a = celeridad de la conducción ($\frac{m}{s}$)

D = diámetro de la tubería (mm)

e = espesor de la tubería en función de la presión hidroestática (mm)

A partir de las siguientes tablas se encuentran los parámetros de ajuste C y K que servirán más adelante:

Cuadro 6: Coeficiente de ajuste K

L(m)	K
<500	2
500	1.75
500<L<1500	1.5
1500	1.25
>1500	1

Fuente: Quintero, 2009

Cuadro 7: Coeficiente de ajuste C

i	C
20 %	1
25 %	0.8
30 %	0.6
40 %	0.4
50 %	0

Fuente: Quintero, 2009

Se procede a encontrar el tiempo de parada del agua (T):

$$T = C + \frac{K * L * V}{g * H_e} \quad (75)$$

Donde:

T = tiempo de parada del agua (s)

L_r = longitud real de la tubería (m)

Se calcula la longitud crítica de la instalación:

$$L_c = \frac{aT}{2} \quad (76)$$

Donde:

L_c = longitud crítica de la instalación (m)

Con todos los datos anteriores, se puede determinar si en el sistema se tiene impulsión corta o larga, y a partir del tipo de impulsión se determina si se puede utilizar la fórmula de Michaud.

Para determinar el tipo de impulsión, se debe hacer la siguiente revisión:

Se tendrá impulsión corta si:

$$L_r < L_c \quad (77)$$

De lo contrario, se asume que hay impulsión larga.

Si se tiene una impulsión corta, se debe revisar la siguiente condición:

$$T > \frac{2L_r}{a} \quad (78)$$

De cumplirse esta condición, se procede a aplicar la fórmula de Michaud para calcular la carga provocada por el golpe de ariete:

$$\Delta H = \frac{2LV}{gT} \quad (79)$$

Donde:

ΔH = carga por golpe de ariete (m)

Si por el contrario, lo que se tiene es impulsión larga, se debe revisar la siguiente condición:

$$T < \frac{2L_r}{a} \quad (80)$$

De cumplirse esta condición, se aplica la fórmula de Allievi para calcular el golpe de ariete:

$$\Delta H = \frac{aV}{g} \quad (81)$$

Finalmente, la carga por golpe de ariete se suma a la carga estática del agua para obtener un nuevo espesor en la tubería, el cual está en función de la presión hidroestática.

$$P_t = \frac{\rho * g * (H_e + \Delta H)}{1 * 10^6} \quad (82)$$

Donde:

P_t = presión total en la tubería ($\frac{kN}{mm^2}$)

El espesor final de la tubería se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$e = \frac{P_t * D}{2 * \sigma_f * k_f} \quad (83)$$

Donde:

e = espesor final de la tubería de presión (mm)

D = diámetro interno de la tubería (mm)

σ_f = resistencia a tracción del material empleado para la tubería ($\frac{kg}{cm^2}$)

k_f = factor de reducción de esfuerzos

5.5. Cálculo de la potencia nominal

La potencia nominal de una central hidroeléctrica se calcula a partir de la potencia bruta (P_b), la cual está en función del caudal de diseño (asumido a partir de la curva de duración de caudales) y del salto hidráulico que se calculó mediante el estudio topográfico [2].

A la potencia bruta se le restan todas las pérdidas de potencia debido a las eficiencias del grupo generador y de la tubería forzada.

La potencia nominal es la potencia máxima que puede generar la central hidroeléctrica a lo largo de su vida útil.

5.5.1. Cálculo de la potencia bruta

La potencia bruta se calcula con la siguiente expresión:

$$P_b = \rho * Q_d * \Delta Z * g \quad (84)$$

Donde:

P_b = potencia bruta (W)

ρ = densidad del agua ($\frac{kg}{m^3}$)

Q_d = caudal de diseño ($\frac{m^3}{s}$)

ΔZ = diferencia de alturas entre las cotas piezométricas (m)

g = aceleración gravitacional ($\frac{m}{s^2}$)

5.5.2. Cálculo de pérdida de potencia por conducción

Las pérdidas de carga que se dan en una tubería pueden ser de dos tipos: por fricción y localizadas. Las pérdidas localizadas se dan por cambios súbitos en la geometría de la tubería, así como por el uso de accesorios como codos y válvulas [11].

El método a utilizar para calcular las pérdidas por fricción (h_f) se basa en la ecuación propuesta por Hassen-Williams:

$$h_f = \frac{1743.811 * L_r * Q_d^{1.852}}{D^{4.871} * C^{1.852}} \quad (85)$$

Donde:

h_f = pérdidas de carga por fricción en la tubería (m)

L_r = largo de la tubería forzada (m)

Q_d = caudal de diseño ($\frac{l}{s}$)

D = diámetro interno de la tubería de presión (pulg)

C = Coeficiente de Hassen-Williams para el material utilizado

Para calcular las pérdidas localizadas (h_l), se utilizará la siguiente expresión:

$$h_l = k \frac{V^2}{2 * g} \quad (86)$$

Donde:

h_l = pérdidas localizadas (m)

V = velocidad media en la tubería forzada ($\frac{m}{s}$)

k = factor de cambio de geometría y dirección

Con los datos anteriores, se puede encontrar la potencia perdida por el sistema debido al paso del caudal por la tubería de presión:

$$P_l = \rho * Q_d * (h_f + h_l) * g \quad (87)$$

5.5.3. Cálculo de potencia efectiva

La potencia efectiva (P_e) es la diferencia entre la potencia bruta (P_b) y la potencia de pérdidas (P_l):

$$P_e = P_b - P_l \quad (88)$$

5.5.4. Potencia nominal

La potencia nominal es la potencia efectiva (P_e) multiplicada por la eficiencia del grupo generador (turbina-generador).

$$P_n = P_e * \eta_t * \eta_g \quad (89)$$

Donde:

η_t = eficiencia de la turbina

η_g = eficiencia del generador

6.1. Cálculo de la demanda energética en el municipio

El propósito del diseño de una hidroeléctrica en el río Uyús es determinar la viabilidad de su implementación, y verificar si la potencia producida podría cubrir la demanda energética domiciliar/residencial del municipio de San Cristóbal Acasaguastlán. Esto quiere decir que se analizarán las conexiones denominadas como Baja Tensión Simple -BTS- o Tensión Simple -TS-, las cuales son conexiones que brindan dos líneas de 120 voltios cada una.

Para ello, se debe calcular de una forma aproximada la demanda domiciliar en el municipio.

6.1.1. Horizonte de planificación

Es importante tomar en cuenta que la población está en constante crecimiento, por lo que se debe establecer un horizonte de planificación en años, para poder garantizar la posible viabilidad del proyecto durante su vida útil.

Para calcular la población esperada al final del horizonte de planificación, se puede utilizar la ecuación de crecimiento exponencial de una población:

$$P = P_a(1 + r)^n \quad (90)$$

Donde:

P = población proyectada para el período elegido

P_a = población actual

r = tasa de crecimiento poblacional

n = duración del período (años)

6.1.2. Demanda residencial

Para fines prácticos, el método empleado para calcular la demanda de energía eléctrica domiciliar consistió en la visita de cuatro diferentes hogares en San Cristóbal Acasaguastlán para poder identificar los electrodomésticos y otros dispositivos con que contaba cada vivienda.

Se entrevistó a las familias para determinar el tiempo de uso de cada uno de los aparatos eléctricos a partir de patrones de uso, y estos resultados se tabularon y se procesaron.

Para determinar el consumo, se dividieron los requerimientos eléctricos en fuerza e iluminación. Los electrodomésticos y otros dispositivos se incluyeron en fuerza, mientras que las luminarias se incluyeron en el otro grupo.

Una vez identificados los diferentes aparatos eléctricos y los tiempos de uso, se pudo calcular la energía consumida por cada uno de ellos, utilizando la expresión:

$$E = P * t \tag{91}$$

Donde:

E = consumo de energía ($W * hr$)

P = potencia del equipo (W)

t = tiempo de uso (hr)

A partir de las potencias de los equipos y del tiempo de uso, se elabora así una gráfica que se conoce como curva de demanda diaria, con la cual se determina la carga pico (P_a), la cual representa la demanda máxima de un hogar en un determinado momento.

6.1.3. Demanda del alumbrado público

El alumbrado público es una de las demandas más grandes de energía en el municipio, a pesar de solo tener como función la iluminación de los espacios públicos. Además, su consumo energético promedio tiene una gran incertidumbre debido a la dificultad de medirlo con precisión.

En Guatemala, según el Código Municipal, el precio del alumbrado público lo fijan las municipalidades y no la Comisión Nacional de Energía Eléctrica -CNEE-, por lo que es un dato de difícil acceso. Además, el consumo real muchas veces se ve afectado por conexiones ilegales, manipulaciones en contadores, y otras acciones.

Es por esta razón que, para fines de este estudio, el método empleado se basó en estimar la cantidad de postes de alumbrado público, y conociendo la potencia de sus luminarias, así como el tiempo que estas están trabajando, para obtener un consumo aproximado.

6.2. Estudio de consumo energético del municipio

6.2.1. Población actual

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, el municipio de San Cristóbal Acasaguastlán tiene una población total -para el año 2016- de **7,387 habitantes**.

6.2.2. Población según horizonte de planificación

El horizonte de planificación para la central hidroeléctrica propuesta se tomará de 15 años.

Utilizando la ecuación (90), se estima que la población proyectada en 15 años, teniendo que la tasa de crecimiento poblacional anual en el departamento de El Progreso es 2.24 %, según datos del Plan de desarrollo de SEGEPLAN será:

$$P = 7,387(1 + 0.0224)^{15} = 10,298 \quad (92)$$

6.2.3. Consumo de energía residencial

El consumo energético de todos los equipos eléctricos y de la iluminación residencial se calcularon según 7.5.2, permitiendo la elaboración de la siguiente curva de demanda diaria:

Figura 17: Curva de demanda residencial diaria



Fuente: Elaboración propia

Con la figura anterior, podemos determinar que la carga pico (P_a) es de $7,415W$. Esta es la potencia máxima que se consume en un hogar durante un día específico.

Consumo de energía actual

La demanda total es la sumatoria del consumo de cada aparato eléctrico que se utiliza a diariamente en un hogar.

Se determinó que, en promedio, un hogar consume $22.97 kW * h$ diariamente, lo cual indica un consumo medio mensual de **$712.18 kW * h$** .

Para simplificar esta estimación, se asumió que en cada vivienda habitan 5 personas. Al ser la población actual de 7,387 habitantes, se tiene un total de 1478 viviendas.

De estos datos, se determinó que el consumo medio mensual total en el municipio es de **$1.05 GW * h$**

Consumo de energía proyectado

Para calcular la demanda proyectada en el horizonte de planificación de 15 años, se aplicó el mismo procedimiento, pero esta vez utilizando la población proyectada de 10,543 habitantes.

El resultado del consumo medio mensual total proyectado será de **$1.501 GW * h$** .

6.2.4. Consumo de alumbrado público

Se asumió que todas las luminarias de los postes de alumbrado público en el municipio son de tipo canasta, con una potencia nominal de 125W. Se consideró este tipo de lámpara pues es la más común en el municipio.

Figura 18: Lámpara tipo canasta



Debido a la ausencia de información acerca de la cantidad de puntos de alumbrado público que existen en el municipio, se asumió que existen 0.5 puntos de alumbrado público por vivienda, según lo sugerido por el Código Municipal.

Anteriormente, se estimó que en la actualidad hay en el municipio cerca de 1478 viviendas, por lo que se tienen 739 puntos de alumbrado público, de 125W cada uno.

Demanda actual

Se determinó que el alumbrado público trabaja de las 18:00h a las 6:00h, un total de 12 horas. La demanda mensual media de alumbrado público sería el producto de 739 puntos, 125W, 12 horas y 30 días al mes, es decir, **33 MW * h**.

Demanda según población proyectada

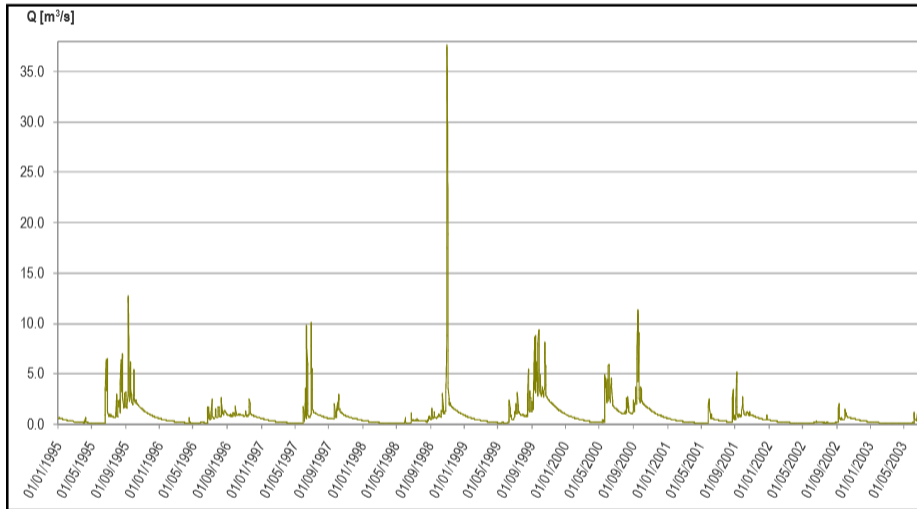
Teniendo constantes las horas de funcionamiento y la potencia de las luminarias, se tiene proyectado que el consumo de energía de las luminarias en 15 años será el producto de 1029 puntos de alumbrado, 125W, 12 horas y 30 días al mes, lo que da como resultado **46.0 MW*h**.

6.3. Estudio hidrológico

6.3.1. Caudales medios mensuales

Los datos para elaborar los caudales medios mensuales del río Uyús se obtuvieron de un estudio anterior realizado en su subcuenca [12], los cuales se presentan a continuación:

Figura 19: Cuadales diarios registrados entre 1995 y 2003



Fuente: Morales, 2010

A partir de la gráfica anterior se calculan los caudales medios mensuales presentados en la siguiente tabla:

Cuadro 8: Caudales medios mensuales del río Uyús para el período 1995-2003

Mes	Caudal medio mensual ($\frac{m^3}{s}$)
Enero	0.15
Febrero	0.15
Marzo	0.40
Abril	1.40
Mayo	2.80
Junio	6.10
Julio	2.90
Agosto	5.40
Septiembre	7.10
Octubre	3.70
Noviembre	0.90
Diciembre	0.20

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos datos se calculan los caudales característicos del río:

Cuadro 9: Caudales característicos río Uyús

Caudal aguas bajas	0.15	$(\frac{m^3}{s})$
Caudal aguas medias	3.60	$(\frac{m^3}{s})$
Caudal aguas altas	7.10	$(\frac{m^3}{s})$

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. Caudal de diseño

Los caudales esperados para el período considerado son los siguientes:

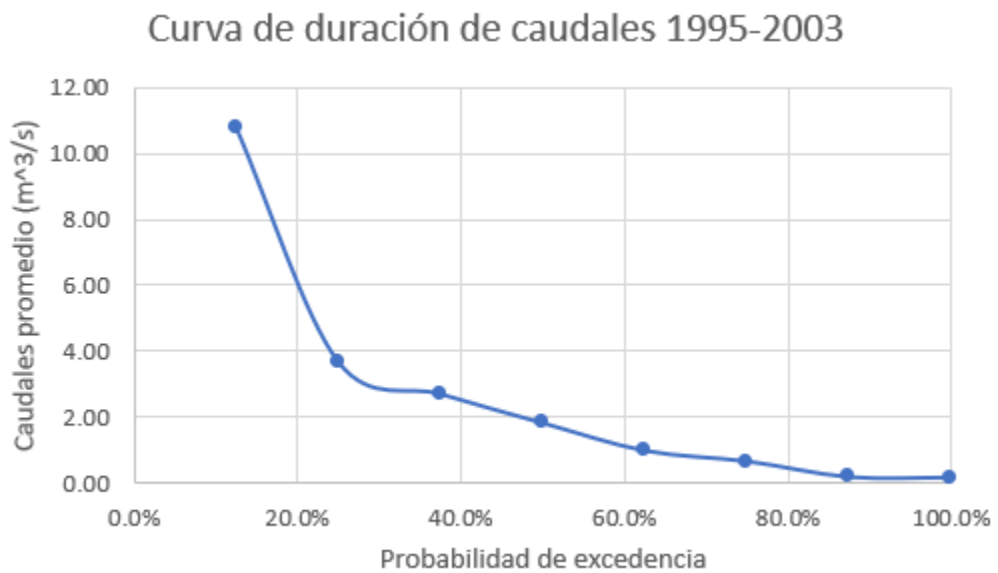
Cuadro 10: Caudales esperados para el período considerado

Probabilidad de excedencia	Caudal medio $(\frac{m^3}{s})$
12.5 %	10.78
25.0 %	3.66
37.5 %	2.68
50.0 %	1.8
62.5 %	0.96
75.0 %	0.63
87.5 %	0.16
100.0 %	0.15

Fuente: Elaboración propia

Con los datos anteriormente presentados, se procede a graficar la curva de duración de caudales, la cual muestra la probabilidad de excedencia de un determinado caudal:

Figura 20: Curva de duración de caudales 1995-2003



Fuente: Elaboración propia

El caudal de diseño (Q_d) para el dimensionamiento de la central hidroeléctrica será el Q_{90} en la curva de duración.

Con ayuda de la curva, se elige el Q_{90} o caudal con una probabilidad de excedencia de 90%, el cual es:

$$Q_{90} = 0.17 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_d = Q_{90}$$

6.3.3. Tormenta de diseño e hidrograma efectivo

Datos de precipitación en estación "Los Albores"

En cualquier proyecto que esté ubicado cerca de un cuerpo de agua se debe calcular la posible crecida máxima para evitar construir en zonas vulnerables a esta, debido a una precipitación elevada en un período corto.

Usualmente, las crecidas se calculan generando una tormenta de diseño que se genera con datos obtenidos con métodos estadísticos (Chow, Maidment y Mays, 1994), sin embargo, muchas veces esto no es posible debido a la ausencia de datos de precipitación horaria.

En ausencia de datos suficientes para calcular una tormenta de diseño por métodos estadísticos, se optará por utilizar datos generados por la estación meteorológica "Los Albores" del INSIVUMEH, el día 30 de mayo de 2010, pues en esta fecha la zona de estudio recibió al máximo la tormenta tropical Agatha, debido a que esta ha sido la más cercana en magnitud al huracán Mitch. Se sabe que ambas tormentas causaron crecidas imprevistas en la mayoría de los ríos del país.

Con los datos de las precipitaciones del período de retorno, se debe elaborar un hidrograma efectivo, el cual se grafica tomando en cuenta las características de la cuenca, como el área, la pendiente media del cauce y el tipo de suelo.

Para generar los diferentes hidrogramas necesarios, se utilizaron los siguientes datos de precipitación horaria registrados en la estación meteorológica "Los Albores" el 30 de mayo de 2010:

Cuadro 11: Precipitación horaria

Hora	P (mm)	Hora	P (mm)	Hora	P (mm)	Hora	P (mm)
0.5	1.4	6.5	2.3	12.5	4.7	18.5	0.3
1	1.6	7	2.7	13	4.3	19	0.2
1.5	1.2	7.5	3.6	13.5	3.2	19.5	0.1
2	1	8	4.7	14	2.7	20	0
2.5	0.9	8.5	5.6	14.5	2.1	20.5	0
3	1.2	9	6.8	15	1.1	21	0.5
3.5	1.1	9.5	7.5	15.5	1.1	21.5	0.2
4	0.8	10	7.8	16	0.8	22	0.3
4.5	1	10.5	8.4	16.5	0.7	22.5	0.5
5	1.2	11	8.1	17	0.6	23	0.3
5.5	1.4	11.5	7.7	17.5	0.6	23.5	0.1
6	1.6	12	7.1	18	0.4	24	0

Fuente: Elaboración propia

Hidrograma de crecida

Para graficar el hidrograma de crecida, se debe conocer el valor del coeficiente de escorrentía, el cual está en función de tipo de suelo y la pendiente del terreno.

Cuadro 12: Coeficiente de escorrentía

Topografía y vegetación	Tipo de suelo		
	Tierra arenosa	Limo arcilloso	Arcilla pesada
Bosques			
Plano	0.1	0.3	0.4
Ondulado	0.25	0.35	0.5
Pronunciado	0.3	0.5	0.6
Pradera			
Plano	0.1	0.3	0.4
Ondulado	0.16	0.36	0.55
Pronunciado	0.22	0.42	0.6
Terrenos de cultivo			
Plano	0.3	0.5	0.6
Ondulado	0.4	0.6	0.7
Pronunciado	0.52	0.72	0.82

Fuente: Campos, 2016

Por lo tanto, sabiendo que el suelo de la zona de estudio se compone principalmente de limos y arcillas, que el terreno es pronunciado y que su vegetación se compone principalmente de bosque de ribera, se consideró un coeficiente de escorrentía de 0.5.

El hidrograma de crecida se genera calculando el caudal generado cada hora del día debido a la escorrentía superficial utilizando la fórmula antes descrita, y comparándolo contra el tiempo en horas.

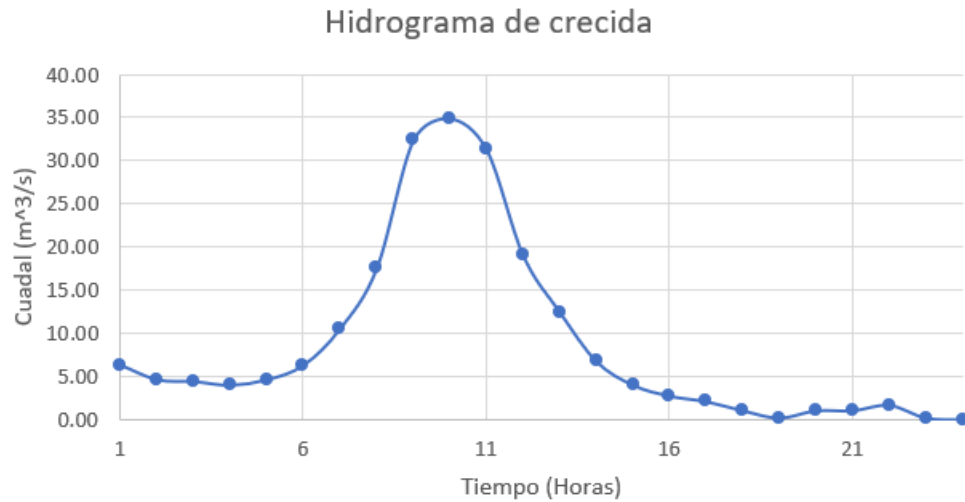
Los datos obtenidos de crecida son los siguientes:

Cuadro 13: Caudales de crecida

T (horas)	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)
1	6.36
2	4.66
3	4.45
4	4.03
5	4.66
6	6.36
7	10.59
8	17.59
9	32.42
10	34.96
11	31.36
12	19.07
13	12.50
14	6.78
15	4.03
16	2.75
17	2.12
18	1.06
19	0.21
20	1.06
21	1.06
22	1.70
23	0.21
24	0.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Hidrograma de crecida



Fuente: Elaboración propia

A partir de la gráfica anterior, se puede observar que el caudal pico del hidrograma general es de aproximadamente $35 \left(\frac{m^3}{s}\right)$.

Este hidrograma permite calcular el volumen acumulado de lluvia en función del tiempo, para así calcular la precipitación efectiva.

La precipitación efectiva obtenida fue de:

$$P_e = 13.76mm$$

El hidrograma anterior es el acercamiento más general a la escorrentía, pero no considera las características de la subcuenca. Por esto, se debe calcular la precipitación efectiva para ajustar el hidrograma de crecida según los parámetros de la subcuenca a estudiar.

Hidrograma unitario

El hidrograma unitario se construye a partir de la precipitación efectiva. Este hidrograma permite conocer el caudal de escorrentía que se generará en una tormenta de igual duración a la considerada en el hidrograma anterior.

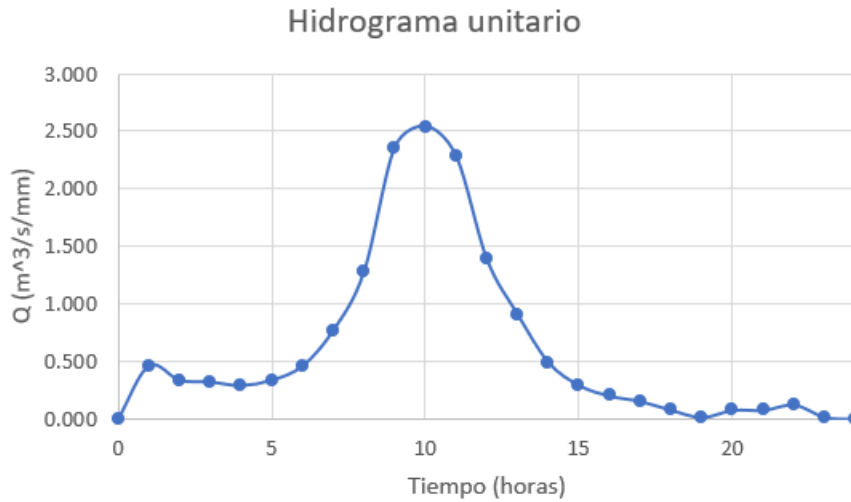
Los datos obtenidos para el hidrograma unitario son los siguientes:

Cuadro 14: Datos del hidrograma unitario

Tiempo (horas)	Caudal ($\frac{m^3}{s}/mm$)
0	0.00
1	0.46
2	0.34
3	0.32
4	0.29
5	0.33
6	0.46
7	0.77
8	1.28
9	2.35
10	2.54
11	2.28
12	1.38
13	0.90
14	0.49
15	0.29
16	0.20
17	0.15
18	0.07
19	0.02
20	0.07
21	0.07
22	0.12
23	0.01
24	0.00

Fuente: Elaboración propia

Figura 22: Hidrograma unitario



Fuente: Elaboración propia

Hidrograma triangular sintético

Los datos que definen el hidrograma triangular sintético son los siguientes:

- Area de la cuenca = $54.93km^2$
- Longitud del río = $9.806km^2$
- Pendiente media del cauce = $0.21\frac{m}{m}$
- Tiempo de concentración (T_c) = $3.44hrs$
- Tiempo de retención (T_r) = $2.06hrs$
- Duración efectiva de la lluvia (D_e) = $3.71hrs$
- Tiempo pico (T_p) = $3.92hrs$
- Tiempo base (T_b) = $10.44hrs$
- Caudal pico (Q_p) = $2.92\frac{m^3}{s}$

Hidrograma efectivo

El hidrograma efectivo se genera a partir del hidrograma base. Los datos obtenidos para el hidrograma base son los siguientes:

Cuadro 15: Datos de hidrograma base

T (hrs)	Q
0.00	0.00
0.39	0.04
0.78	0.22
1.18	0.47
1.57	0.82
1.96	1.26
2.35	1.75
2.74	2.25
3.14	2.60
3.53	2.83
3.92	2.92
4.31	2.86
4.70	2.69
5.10	2.45
5.49	2.19
5.88	1.90
6.27	1.66
7.06	1.26
7.84	0.93
8.62	0.70
9.41	0.53
10.19	0.38
10.98	0.29
11.76	0.22
13.72	0.11
15.68	0.05
17.64	0.03
19.60	0.01

Fuente: Elaboración propia

A partir del hidrograma base, se generó el hidrograma efectivo. Los datos del hidrograma efectivo son los siguientes:

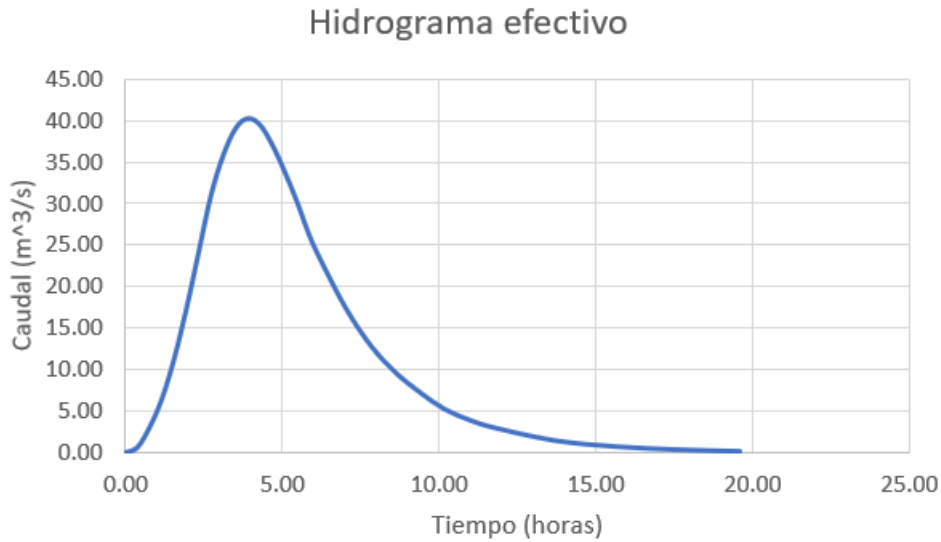
Cuadro 16: Caudales efectivos de la tormenta de diseño

T (hrs)	Q
0.00	0.00
0.39	0.60
0.78	3.01
1.18	6.43
1.57	11.25
1.96	17.28
2.35	24.11
2.74	30.94
3.14	35.76
3.53	38.97
3.92	40.18
4.31	39.38
4.70	36.96
5.10	33.75
5.49	30.13
5.88	26.12
6.27	22.90
7.06	17.28
7.84	12.86
8.62	9.64
9.41	7.23
10.19	5.22
10.98	3.94
11.76	3.01
13.72	1.45
15.68	0.72
17.64	0.36
19.60	0.16

Fuente: Elaboración propia

Con los datos anteriores se genera el hidrograma efectivo de diseño:

Figura 23: Hidrograma efectivo



Fuente: Elaboración propia

El caudal máximo para la tormenta de diseño es de:

$$Q_e = 40.2 \frac{m^3}{s}$$

Este caudal tiene dos aplicaciones para el diseño de una central hidroeléctrica:

- La crecida que se da en un río durante una precipitación intensa está en función del caudal Q_e y la velocidad media del río. Con las ecuaciones de Chézy-Manning es posible calcular el tirante máximo. Conocer este dato permite ubicar las obras civiles, en especial la bocatoma, de tal manera que no se vea afectada por posibles inundaciones.
- El caudal de diseño para una central hidroeléctrica se puede calcular como el 2% de Q_e .

Discusión sobre el caudal de diseño

Si se utiliza el caudal máximo por la tormenta de diseño (Q_e) para calcular el caudal de diseño (Q_d), tendríamos que:

$$Q_d = 0.02 * 40.2 \frac{m^3}{s} = 0.80 \frac{m^3}{s}$$

Este valor es significativamente mayor al obtenido a partir de la curva de duración. Es importante mencionar que para evaluar la viabilidad de un proyecto hidroeléctrico es

recomendable ser lo mas conservador posible, pues si el caudal aprovechable en realidad es menor al caudal de diseño, puede que los costos de inversión y los ingresos calculados no sean precisos.

Es por esta razón que para evaluar la viabilidad de una hidroeléctrica a filo de agua en el río Uyús se utilizará el caudal de diseño obtenido a partir de la curva de duración de caudales, pues este es resultado de datos generados a partir de aforos.

6.4. Dimensionamiento de las obras civiles

6.4.1. Bocatoma de fondo

Datos iniciales

- Caudal de diseño (Q_d) = $0.17 \frac{m^3}{s}$
- Caudal de estiaje ($Q_{estiaje}$) = $0.15 \frac{m^3}{s}$
- Caudal máximo (Q_{max}) = $7.1 \frac{m^3}{s}$
- Ancho del río en el tramo seleccionado = $4m$

Lámina de agua y velocidad

$$H = 0.08m$$

$$V_r = 0.52 \frac{m}{s}$$

Revisión para determinar aplicabilidad de las ecuaciones de H. Babbit:

$$0.3 < 0.52 < 3 \frac{m}{s}$$

Dimensionamiento de rejilla y del canal de aducción

Para la entrada a la toma se tienen:

$$X_s = 0.38m$$

$$X_i = 0.24m$$

$$B = 0.48m$$

Este valor se debe aproximar, por lo que en realidad se tendrá que:

$$B = 0.5m$$

Para la rejilla se tienen los siguientes valores:

$$b = 0.0254m$$

$$a = 0.05m$$

La velocidad entre barrotes supuesta es:

$$V_b = 0.4 \frac{m}{s}$$

El area neta para este dato es de:

$$A_n = 0.47m^2$$

$$L_r = 1.42m$$

Este valor se debe aproximar, por lo que en realidad se tiene que:

$$L_r = 1.5m$$

Se debe volver a calcular el área neta:

$$A_n = 0.50m^2$$

El número de orificios obtenidos fue de:

$$N = 19$$

Cada orificio tendrá 2 pulgadas o bien 5 cm de separación.

El área neta final es de:

$$A_n = 0.47m^2$$

La velocidad real entre barrotes es de:

$$V_b = 0.40 \frac{m}{s}$$

Por lo que la velocidad asumida era correcta.

Niveles de agua en el canal de aducción

Nivel de aguas abajo es de:

$$h_e = h_c = 0.228m$$

El espesor de muro se asumirá de 30 cm.

El largo del canal es:

$$L_e = 1.72m$$

La pendiente del canal se asumirá de 3%.

El nivel de aguas arriba es de:

$$h_o = 0.35m$$

Altura de los muros del canal de aducción

Se dejará un borde libre de 25 cm, por lo que la altura del muro es:

$$H_o = 0.6m$$

La altura total de los muros será de:

$$H_e = 0.65m$$

La velocidad al final del canal será:

$$V_e = 1.49 \frac{m}{s}$$

Esta velocidad cumple con:

$$0.3 \frac{m}{s} < 1.49 < 3 \frac{m}{s}$$

Dimensionamiento de la cámara de recolección

$$X_s = 0.73m$$

$$X_i = 0.47$$

El ancho de la cámara será:

$$B_{camara} = 1.03m$$

Altura de los muros de contención

Para los muros, se asumirá un borde libre de 40 cm.

La altura de la lámina o tirante en la garganta es de:

$$H = 0.98m$$

La altura total para los muros de contención será de:

$$H_t = 1.38m$$

Cálculo del caudal de excesos

El tirante en la garganta, para el caudal máximo de $7.1 \frac{m^3}{s}$, será de:

$$H_g = 0.623m$$

El caudal de captación es:

$$Q_{cap} = 0.5 \frac{m^3}{s}$$

El caudal de excesos es de:

$$Q_{exc} = 0.33 \frac{m^3}{s}$$

Los tirantes del vertedero de excesos son los siguientes:

$$H_{exc} = 0.31m$$

$$V_{exc} = 1.02 \frac{m}{s}$$

$$X_s = 0.67m$$

Por lo tanto, la localización aguas abajo del vertedero de excesos estará a 0.98 m

Cotas piezométricas

El fondo del río está ubicado en la cota 663.7 msnm

Láminas sobre la presa

- Diseño = 663.781 msnm
- Máxima = 664.676 msnm
- Media = 664.323 msnm
- Corona sobre muros de contención = 665.076 msnm

Canal de aducción

- Fondo aguas arriba = 663.100 msnm
- Fondo aguas abajo = 663.048 msnm
- Lámina aguas arriba = 663.450 msnm
- Lámina aguas abajo = 663.276 msnm

Cámara de recolección

- Lámina de agua = 662.798 msnm
- Cresta del vertedero de excesos = 662.489 msnm
- Fondo = 661.113 msnm

6.4.2. Desarenador de flujo horizontal

Datos iniciales:

- Gravedad específica de la arena (G_s) = 2.65
- Densidad de la arena (ρ) = $2650 \frac{kg}{m^3}$
- Diametro de la partícula (d) = $0.0002m$
- Temperatura del agua (T) = $20^\circ C$

- Viscosidad del agua (ν) = $1.01 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$
- Ancho del canal de conducción (b) = $1.3m$
- Caudal de diseño (Q_d) = $0.17 \frac{m^3}{s}$

Verificación del tipo de flujo

La velocidad de sedimentación para un flujo laminar es de:

$$V_s = 0.04 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto, el número de Reynolds es:

$$R_e = 7.05$$

$$R_e > 1$$

Por lo tanto, el flujo no es laminar.

La velocidad de sedimentación para un flujo turbulento es de:

$$V_s = 0.092 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto, el número de Reynolds es:

$$R_e = 18.26$$

$$R_e < 2000$$

Con esto se verifica que el flujo tampoco turbulento.

De acuerdo al método descrito en la sección 5.3.2, en la cual se menciona que el valor de C_d debe acercarse a 1, y que el valor V_d se mantenga constante, se obtuvieron los siguientes resultados:

Los valores obtenidos fueron de:

$$V_s = 0.07 \frac{m}{s}$$

$$C_d = 0.99$$

Velocidad de arrastre

$$V_d = 0.2 \frac{m}{s}$$

$$A_{trans} = 0.86m^2$$

Largo del canal desarenador

Se asume un tirante de:

$$h = 0.4m$$

Se establece la siguiente relación:

$$L = 15h$$

Por lo tanto, el largo del canal desarenador con un factor de seguridad de 1.5, será de:

$$L = 9m$$

Ancho del desarenador

El ancho del desarenador será de:

$$B = 2.2m$$

El ángulo (θ) para el alerón de la entrada se asume de $12^\circ 30'$.

Largo del alerón de entrada

El largo del alerón de entrada será de:

$$I = 1.9m$$

Tiempo de retención

El tiempo de desplazamiento será de:

$$T_d = 45.73s$$

El tiempo de retención será de:

$$T_s = 6.06s$$

Se tiene que:

$$45.73s > 6.06s$$

Por lo tanto se cumple la condición que $T_s < T_d$, lo que indica que el dimensionamiento del desarenador es adecuado.

6.4.3. Canal de conducción abierto

Datos iniciales

- Caudal de diseño ($Q_d = 0.17 \frac{m^3}{s}$)
- Velocidad de conducción asumida ($V = 3 \frac{m}{s}$)
- Ancho del canal ($b = 1.3m$)
- Tirante del canal ($d = 0.5m$)

Dimensionamiento de la sección

La sección requerida es de:

$$A = 0.65m^2$$

El perímetro mojado es de:

$$P = 2.3m$$

Por lo tanto, el radio hidráulico es de:

$$R_h = 0.28m$$

Propiedades del material

El material propuesto es concreto simple no revestido.

Cuadro 17: Velocidad máxima permisible en suelos

Tipo de suelo	Velocidad máxima (m/s)	
	Agua limpia	Material en suspensión
Lodo	0.10	0.15
Barro suelto	0.15	0.20
Arena fina (0.02-0.2 mm)	0.30	0.40
Arena media (0.2-0.5 mm)	0.35	0.50
Limo arcilloso	0.40	0.60
Arena gruesa (2-5 mm)	0.45	0.65
Grava muy arenosa	0.60	0.80
Limo compacto (natural)	0.70	1.00
Grava media (5-20 mm)	0.80	1.15
Tierra arcillosa grasosa	1.00	1.30
Grava gruesa, piedras (20-50 mm)	1.40	1.60
Piedras (50-75 mm)	1.70	1.80
Cantos rodados (75-100 mm)	1.90	2.00
Césped/prado, bien radicado	1.80	1.80
Tipo de revestimiento		
Concreto (materia en suspensión, mucha arena)	-	2.00
Concreto (agua sin arena)	4.0	
Mampostería con piedras sentadas y mortero	5.0	

Fuente: Carcelén, 1985

- La velocidad máxima permisible para el concreto, a partir de la tabla anterior, es de $4\frac{m}{s}$.
- El parámetro de rugosidad de Manning (n) para el concreto es de 0.013.
- El gradiente del canal (i) se tomará de 0.005

Velocidad del agua en el canal

A partir de los datos anteriores, se tiene que la velocidad real en el canal es de:

$$V_r = 2.3\frac{m}{s}$$

La velocidad real, por lo tanto, no supera a la velocidad máxima permisible, confirmando que el dimensionamiento del canal es adecuado.

6.4.4. Aliviadero del canal de conducción

Los aliviaderos de un canal de conducción se deben diseñar de manera que cuando el tirante de excesos alcance la altura del aliviadero, el agua sea evacuada del canal.

Los datos iniciales que se tienen para calcular la altura de la pared del canal son los siguientes:

- Caudal máximo (Q_{max}) = $7.1 \frac{m^3}{s}$
- Ancho del canal (B) = $1.3m$
- Gradiente (i) = 0.005
- Parámetro de rugosidad de Manning (n) = 0.013
- Longitud entre aliviaderos (L) = $5m$

Cálculo del radio hidráulico

El radio hidráulico para los datos anteriores es de:

$$R_h = 0.63m$$

Cálculo de la sección y la altura del tirante

La sección requerida por el canal es de:

$$S = 1.78m^2$$

La altura del tirante será de:

$$H = 1.37m$$

Altura de seguridad

Por lo tanto, los aliviaderos el canal deben estar ubicados a menos de la altura del tirante (H), es decir, entre 0.5 m (que es el tirante del caudal de diseño) y 1.37 m.

6.4.5. Dimensionamiento de la cámara de carga

Para el dimensionamiento de la cámara de carga, se debe considerar un caudal mayor al de diseño, pues es probable que debido a las lluvias entre más agua de la considerada en el canal.

Para el dimensionamiento de la cámara de carga se tienen los siguientes datos iniciales:

- Caudal de entrada (Q_b) = $1 \frac{m^3}{s}$
- Pendiente del canal (i) = 0.005
- Área del canal de conducción (A) = $0.65m^2$

Volumen requerido por el tanque de carga

El volumen del tanque de carga será:

$$V_t = 21.74m^3$$

La constante de capacidad del tanque se obtiene de la siguiente tabla:

Cuadro 18: Constante de capacidad de un tanque de carga

V (cientos de m3)	k
<3	2.0
4-6	1.8
7-9	1.5
10-13	1.3
14-16	1.0
>17	0.7

Fuente: Quintero, 2009

Debido a que el volumen requerido por el tanque de carga es menor a $300 m^3$, se elige un valor de k igual a 2.

6.4.6. Predimensionamiento del tanque

La profundidad total del tanque de almacenamiento es:

$$HCC = 2.1m$$

El ancho del tanque es de:

$$B = 3.2m$$

La longitud es de:

$$L = 3.2m$$

6.4.7. Dimensionamiento de la tubería de presión

Para el diseño de la tubería de presión se requieren los siguientes datos iniciales:

- Caudal pico (Q_d) = $0.2 \frac{m^3}{s}$
- Cota piezométrica de la salida de la cámara = 664 msnm
- Cota piezométrica de la sala de máquinas = 644 msnm
- Longitud total de la tubería (L) = 221 m

Es importante mencionar que se utilizó un caudal de $0.2 \frac{m^3}{s}$ por motivos de seguridad, para garantizar que si por alguna razón se tuviera una mala instalación en la tubería, esta pueda aguantar una carga mayor a la de diseño.

Dimensionamiento de la tubería

La presión que debe soportar la tubería en términos de carga es:

$$H_e = 20mca$$

La presión en términos de fuerza es:

$$P = 0.196 \frac{kN}{mm^2}$$

La velocidad media del agua en la tubería es de:

$$2.48 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto, el diámetro necesario para la tubería es de:

$$D = 0.32m$$

El espesor de la tubería, sin contar la carga por golpe de ariete, es de:

$$\epsilon = 7mm$$

Cálculo de la carga provocada por golpe de ariete

Sabiendo que el módulo de elasticidad del PVC es de:

$$E = 3 * 10^8$$

Se obtiene el coeficiente representativo k :

$$k = 33.33$$

La celeridad de la conducción es de:

$$a = 249 \frac{m}{s}$$

El tiempo de parada del agua es de:

$$T = 5.58s$$

La longitud crítica de la instalación es de:

$$L_c = 695.25m$$

Basándose en el método descrito en la sección 5.3.6, se obtiene la carga por golpe de ariete aplicando la ecuación de Michaud:

$$\Delta H = 20m$$

De esta forma, se obtiene un nuevo espesor de tubería:

$$\epsilon = 14mm$$

6.5. Determinación de la potencia nominal

Para determinar la potencia nominal de la central hidroeléctrica propuesta, se deben considerar los siguientes datos:

- Caudal de diseño (Q_d) = $0.17 \frac{m^3}{s}$
- Longitud de la tubería (L) = 221 m

- Diámetro de la tubería de presión (D) = 33 cm
- Velocidad promedio en la tubería (V) = $2.48 \frac{m}{s}$
- Diferencia de alturas (ΔZ) = 20 m
- Densidad del agua (ρ) = $1000 \frac{kg}{m^3}$
- Aceleración gravitatoria (g) = $9.81 \frac{m}{s^2}$

6.5.1. Cálculo de pérdidas en la tubería forzada

Utilizando la ecuación de Hassen-Williams, y sabiendo que el PVC tiene un coeficiente de Hassen-Williams de 140, se procede a calcular las pérdidas en la tubería forzada.

La pérdida de cargas por fricción es de:

$$h_f = 2.17m$$

Asumiendo que se necesitarán 7 codos de 45° para cambiar la dirección de la tubería según el perfil topográfico de la zona de estudio, y que el diámetro de la tubería no cambiará a lo largo del recorrido, se calculan las pérdidas localizadas:

$$h_l = 0.43m$$

Con esto, se determina la pérdida de carga total en la tubería forzada:

$$h_f + h_l = 2.61m$$

6.5.2. Cálculo de potencia neta

La potencia bruta del sistema propuesto es de:

$$P_b = 33,354W$$

La potencia que se pierde debido a la tubería forzada es de:

$$P_l = 4354.91W$$

Por lo tanto, la potencia efectiva del sistema propuesto es de:

$$P_e = 28,999.1W$$

Para encontrar la potencia nominal del sistema propuesto, se deben tomar en cuenta las eficiencias del grupo generador.

Eficiencia de la turbina:

$$\eta_t = 0.90$$

Eficiencia del generador:

$$\eta_g = 0.90$$

Por lo tanto, la potencia nominal del sistema propuesto es:

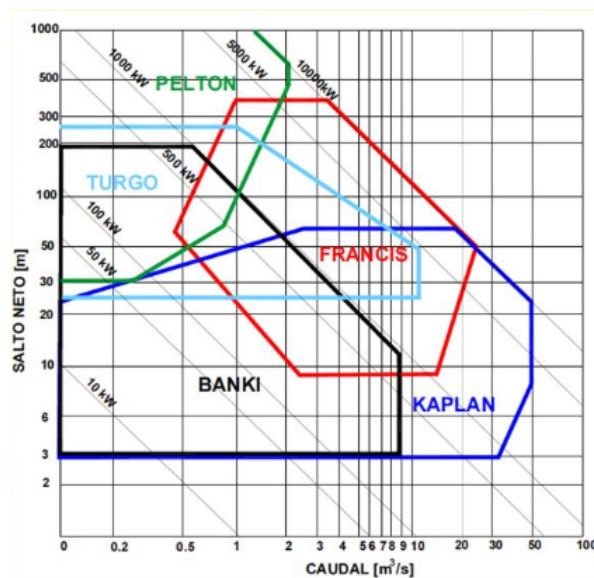
$$P_n = 23,489.26W$$

6.6. Elección y dimensionamiento de la turbina hidráulica

6.6.1. Elección de turbina

La elección del tipo de turbina se hace según la siguiente gráfica, donde el tipo de turbina está en función del salto hidráulico y el caudal de diseño:

Figura 24: Curva de elección de turbina hidráulica



Fuente: Cengel, 2009

6.6.2. Velocidad de rotación

Para turbinas pequeñas, se puede asumir las revoluciones por minuto mínimas que deben alcanzar las turbinas hidráulicas. En este caso, se asumirá que las revoluciones por minuto mínimas de la turbinas es de 2000 rpm.

Por lo tanto, la velocidad de rotación (N_q) sería:

$$N_q = \frac{2000rpm * \sqrt{0.17 \frac{m^3}{s}}}{(20m)^{\frac{3}{4}}} = 87.2rpm$$

6.6.3. Velocidad del chorro a la salida del inyector

Teniendo que el coeficiente de velocidad para turbinas lentas (ϕ) es de 0.97, se encuentra la velocidad de salida en los inyectores:

$$C = 0.97 * \sqrt{2 * 9.81 \frac{m}{s^2} * 20m} = 19.21m/s \quad (93)$$

6.6.4. Diámetro del inyector

Se debe dividir el caudal de diseño (Q_d) dentro del número de inyectores que se tendrá. El número propuesto es 2 inyectores.

El caudal dividido es:

$$Q_p = 0.085 \frac{m^3}{s}$$

El diámetro de cada inyector será:

$$d = 0.55 * \sqrt{\frac{0.085 \frac{m^3}{s}}{\sqrt{20m}}} * 1000 = 75.83mm$$

6.6.5. Diámetro del rodete

El diámetro del rodete se determina de la siguiente manera:

$$\frac{39 * \sqrt{20m}}{2000rpm} * 1000 = 87.2cm$$

6.6.6. Altura de montaje requerida

La altura mínima de montaje para la turbina se determina de la siguiente forma:

$$H_m = \frac{10 * 75.83mm}{1000} + \left(\frac{20m}{2000rpm}\right)$$

6.6.7. Dimensionamiento de las cucharas de la turbina

Las dimensiones de las cucharas de la turbina dependen del diámetro del inyector, por lo que se pueden calcular de la siguiente manera:

- Ancho de la cuchara (b) = $2.8 * 75.83 \text{ mm} = 212.3 \text{ mm}$
- Altura de la cuchara (h) = $2.8 * 75.83 \text{ mm} = 212.3 \text{ mm}$
- Espesor de la cuchara (b) = $0.8 * 75.83 \text{ mm} = 60.7 \text{ mm}$

6.7. Costo de inversión, costos de operación, ingresos y rentabilidad

Una vez dimensionadas las obras civiles y la turbina, así como calculada la potencia nominal de la hidroeléctrica planteada, se procede a calcular los costos de inversión, o en otras palabras, el costo que tendría la construcción de las obras civiles y la compra de la maquinaria. Además, se deben establecer los costos de operación -iluminación y mantenimiento-. Por último, se deben estimar los ingresos producidos por la venta de la energía generada por la central.

Para calcular el costo de la bocatoma, del desarenador y del tanque de presión, se utilizó el programa de computación Autodesk Revit 2019, con el cual se hicieron modelos de construcción de las obras civiles requeridas, para así obtener los precios de acuerdo a los volúmenes de concreto reforzado necesarios.

Los precios de los materiales de construcción se pueden incrementar cuando se emplean en proyectos ubicados en sitios de difícil acceso, como en el caso de la hidroeléctrica diseñada en este estudio, pues el transporte es más difícil.

Es por esta razón que para este estudio, se hizo una cotización con maestros de obra locales, quienes han trabajado en proyectos similares como el del Proyecto Hidroeléctrico Pasabien, fijando un precio promedio de Q. 2650.00 para el metro cúbico de concreto. Este precio incluye transporte e instalación.

Las varillas de acero de refuerzo consideradas fueron varillas #5 y #3 (sistema inglés), las cuales se venden en longitudes de 20 pies con un precio aproximado de Q.97.00 y Q.75.00 respectivamente, con transporte incluido.

6.7.1. Costos de inversión

Bocatoma de fondo

Los costos para construir la bocatoma se presentan en la siguiente tabla:

Cuadro 19: Costo de la toma

Descripción	Volumen (m^3)	Costo por m^3 (Q)	Costo de obra (Q)
Toma de fondo	60.46	2,650	160,219

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 20: Costo del refuerzo de la toma

Descripción	Designación	Costo unidad (Q)	Costo refuerzo (Q)
Varillas de refuerzo	#5	97.00	45,721.40

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 21: Costo de zanjeo

Descripción	Volumen (m^3)	Costo m^3 (Q)	Costo total (Q)
Zanjeo	126.5	400	50,600

Fuente: Elaboración propia

El costo de excavar la tierra para construir la bocatoma se incrementa hasta Q.400 por metro cubico debido a la necesidad de utilizar retroexcavadora.

Tanque de presión

Cuadro 22: Costo del tanque o cámara de presión

Descripción	Volumen (m^3)	Costo por m^3 (Q)	Costo de obra (Q)
Tanque de presión	14.33	2,650	37, 974.50

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 23: Costo del refuerzo de la cámara

Descripción	Designación	Costo unidad (Q)	Costo refuerzo (Q)
Varillas de refuerzo	#5	97.00	11,084.70

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 24: Costo de zanjeo

Descripción	Volumen (m^3)	Costo m^3 (Q)	Costo total (Q)
Zanjeo	50.06	400	20,024

Fuente: Elaboración propia

Desarenador

Cuadro 25: Costo del desarenador

Descripción	Volumen (m^3)	Costo por m^3 (Q)	Costo de obra (Q)
Desarenador	5.59	2,650	14,813.50

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 26: Costo del refuerzo del desarenador (varillas #3)

Descripción	Designación	Costo unidad (Q)	Costo de refuerzo (Q)
Varillas de refuerzo	#3	75	3232.51

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 27: Costo del refuerzo del desarenador (varillas #5)

Descripción	Designación	Costo unidad (Q)	Costo de refuerzo (Q)
Varillas de refuerzo	#5	97	1751.57

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 28: Costo de zanjeo

Descripción	Volumen (m^3)	Costo m^3 (Q)	Costo total (Q)
Zanjeo	13.60	400	5,440.00

Fuente: Elaboración propia

Canal de conducción abierto

Cuadro 29: Costo del canal

Descripción	Volumen (m^3)	Costo m^3 (Q)	Costo obra (Q)
Canal	0.53	2,650	1,465

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 30: Costo de zanjeo

Descripción	Volumen (m^3)	Costo m^3 (Q)	Costo total (Q)
Zanjeo	10.93	400	4,372

Fuente: Elaboración propia

A los costos de las zanjas anteriores se les debe agregar Q. 8,000.00 de transporte de maquinaria y herramientas.

Tubería forzada

Cuadro 31: Costo de tubería forzada

Descripción	Costo 6 m (Q)	Tuberías requeridas	Total (Q)
pvc 80 psi	2,210.00	37	81,402.00

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 32: Costo de codos de 45°

Descripción	Costo unidad (Q)	Codos requeridos	Total (Q)
Codos 45°	4,813.00	7	33,691.00

Fuente: Elaboración propia

Turbina y generador

La estimación del precio de compra de la turbina y del generador se hace de acuerdo a la siguiente ficha técnica:

Cuadro 33: Ficha técnica del grupo generador

Generador	
Tipo de generación	CA
Potencia nominal	23.5 kW
Velocidad de giro nominal	2000 RPM
Protección IP	≥ 5 (contra el agua)
Turbina	
Tipo	Pelton o Turgo
Diámetro	800 a 1000 mm
Velocidad de giro nominal	2000 RPM
Diámetro interno de inyector	75.8 mm
Número de cucharas	13 a 15
Configuración	Vertical
Número de chorros	2

Fuente: Elaboración propia

Una turbina Pelton con su generador se puede comprar a un precio promedio de \$3900 dólares, de acuerdo a sitios en internet como alibaba.com., lo que equivaldría a Q. 30,420, para una tasa de cambio de Q.7.80 por dólar americano.

Por lo tanto, el costo de inversión estimado para la central hidroeléctrica sería de **Q.509,989.72**.

6.7.2. Costos de operación

Los costos de operación para la central hidroeléctrica serían los siguientes:

- Pago a empleados
- Limpieza del desarenador e inspección del sistema mecánico

Pago a empleados

La hidroeléctrica necesita por lo menos dos personas encargadas de cuidar las instalaciones, en especial la sala de máquinas, así como de realizar tareas de mantenimiento menores. Cada empleado ganaría Q.1300.00 mensuales, lo que se traduciría a un total de Q.31,200.00 anuales, que deben restarse a los ingresos anuales por venta de electricidad.

Limpieza e inspección del sistema

El desarenador debe limpiarse cada dos semanas, y el sistema generador debe revisarse en intervalos iguales para evitar cualquier potencial daño a sus componentes.

La limpieza del desarenador puede ser llevada a cabo por el mismo personal de la central previamente considerado.

6.7.3. Ingresos

La energía eléctrica producida por la central puede ser vendida directamente a la empresa encargada de distribuir la energía en el oriente del país.

El precio de venta que se puede negociar está relacionado a los precios de venta que la Comisión Nacional de Energía Eléctrica publica mensualmente en los Pliegos Tarifarios. A continuación se muestra el precio del mes de enero de 2019 para el kilovatio-hora para Baja Tensión Simple:

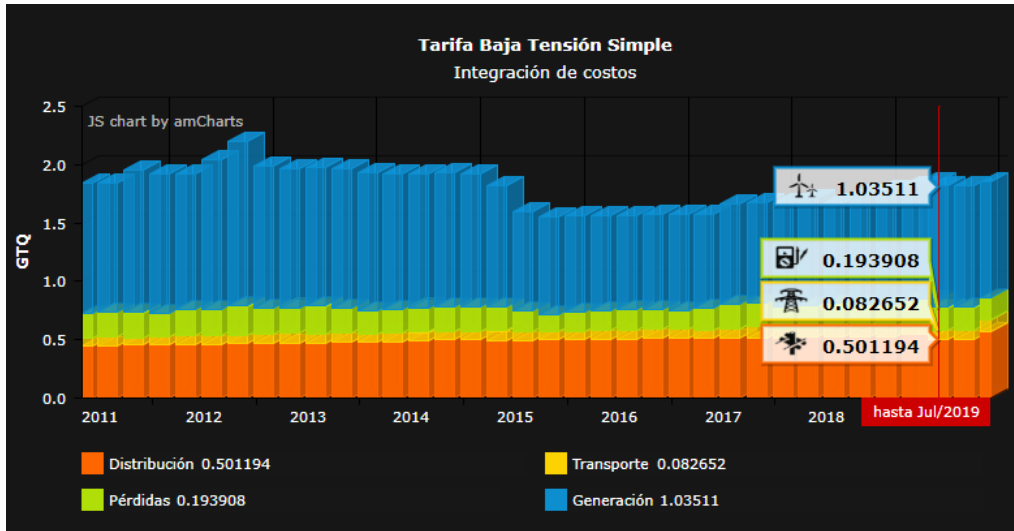
RESOLUCIÓN	CNEE-220-2018	CNEE-221-2018
Tarifa: Social - TS		Valor
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)		17.220058
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)		1.722426
Tarifa: Baja Tension No Social - BTS		Valor
Cargo por Consumidor (Q/usuario-mes)		17.220058
Cargo Unitario por Energía (Q/kWh)		1.784888

Figura 25: Tarifas de la CNEE para enero de 2019

Sin embargo, este es el precio de venta que deben pagar los usuarios, el cual ya incluye los ajustes para cubrir los costos de transmisión y su respectiva ganancia. El precio al que se venderá la energía producida por la central estudiada en realidad es menor. En la

integración de costos del Pliego Tarifario se indica que el precio promedio de generación es de Q1.03/kW*h, como se aprecia en la siguiente figura:

Figura 26: Integración de costos para Baja Tensión Simple



Fuente: Pliego Tarifario de la CNEE

Con este precio, sabiendo que la central tiene una potencia nominal de 23.5 kW, se hace el siguiente cálculo para determinar la energía producida en un mes:

$$23.5kw * (730horas) = 17,155kw * h$$

Es decir, la central puede producir máximo 17,155 kW*h de energía mensualmente. Sin embargo, en la realidad nunca se logra producir toda energía debido al concepto del factor de planta, el cual representa las pérdidas inevitables en la producción de energía debido a pérdidas en la transmisión y en los equipos electromecánicos. El factor de planta se obtiene luego de medir la producción real una vez se empieza a vender la energía y dividirlo dentro de la energía máxima. Para fines prácticos, se utilizará en este cálculo un factor de planta de 0.65 o 65 %.

Se multiplica entonces 17,155 kW*h por el factor de planta 0.65, que daría como resultado 11,150.75 kW*h, que sería la producción real.

Si se multiplica esa cantidad por Q1.03/kw*h, se tiene un ingreso mensual de Q.11,485.27. A esto hay que quitarle Q2,600.00, que es lo que se le pagaría a los empleados mensualmente. Esto daría un ingreso total de Q.8,885.27 al mes.

Como la hidroeléctrica tiene la capacidad de generar energía todo el año debido al caudal de diseño elegido, se tiene un ingreso anual de Q.106,623.27.

Mantenimiento mayor

Se debe considerar en el plan de generación que la hidroeléctrica debe parar de operar por lo menos una vez al año con el fin de revisar todo el sistema de conducción y el equipo electromecánico.

La duración del mantenimiento dependerá de la situación de los componentes a revisar

Esta situación debe estar programada con antelación, ya que las empresas de distribución de electricidad exigen que se les de aviso de cualquier interrupción de generación con al menos 6 meses de anticipo.

6.7.4. Recuperación de inversión

Con las condiciones establecidas anteriormente, se puede encontrar el tiempo necesario para recuperar la inversión:

$$T = \frac{509,989.72}{Q.106,623.27} = 4.78$$

Por lo tanto, el tiempo de recuperación de inversión sería aproximadamente **5 años**. Este tiempo puede aumentar si se necesitara invertir directamente en la construcción de líneas de transmisión.

6.8. Demanda del municipio

Para conocer si la central hidroeléctrica propuesta es capaz de cubrir la demanda energética del municipio, se debe comparar la potencia generada por esta con la potencia total demandada, ya sea residencial o de alumbrado público.

En las secciones 6.1.3 y 6.1.4, se establece que la potencia pico consumida por un hogar es de 7.45 kW. Esto quiere decir que la potencia pico para todo el municipio, donde se estima un total de 1478 viviendas, es de 11,011.1 kW.

Para calcular el porcentaje de cobertura, se hace la siguiente operación:

$$\frac{23.5kW}{11,011.1kW} * 100 = 0.0021 * 100 = 0.21 \%$$

La central hidroeléctrica sería capaz de cubrir solamente el 0.21 % de la demanda, por lo que es correcto decir que la hidroeléctrica no es capaz de cubrir la demanda eléctrica del municipio.

El mismo caso se da para el alumbrado público, donde se tiene una demanda de potencia de 92.3 kW. La central hidroeléctrica es capaz de cubrir el 25 % de la demanda de alumbrado público.

Por lo tanto, se debe descartar la posibilidad de utilizar la central hidroeléctrica para cubrir la demanda en el municipio tanto residencial como de alumbrado público. Es necesario entonces fijar la rentabilidad a partir de la venta directa de energía.

Se determinó a partir de estudios hídricos y topográficos que la potencia nominal de la central hidroeléctrica propuesta es de 23.5 kW con un caudal de diseño de $0.17 \frac{m^3}{s}$ y un salto hidráulico de 20 metros.

Se dimensionaron las obras civiles necesarias para el funcionamiento de la central hidroeléctrica a partir del caudal de diseño. Se dimensionó la tubería forzada, necesaria para transportar el agua desde la conducción hacia la sala de máquinas a partir de la topografía de la zona de estudio. El diámetro requerido, en base al caudal y a la velocidad de la conducción, es de 32 cm y con un espesor de 11 mm. Estos datos ya contemplan el efecto del golpe de ariete, así como la presión hidroestática dentro de la tubería.

Se hizo un modelo BIM de las obras civiles para calcular el costo necesario para construir la bocatoma de fondo, el desarenador de flujo horizontal y el tanque de presión, las cuales son estructuras básicas para el funcionamiento de la central hidroeléctrica propuesta. Con estos mismos modelos se obtuvieron los planos constructivos.

El costo de inversión para construir y poner en marcha la central hidroeléctrica propuesta es de Q.509,989.72. El costo de inversión no contempla la construcción de líneas de transmisión, ya que la instalación de estas queda a criterio de la empresa a la que se le venderá la energía producida.

El tiempo de recuperación de la inversión, tomando en cuenta los costos de operación, y suponiendo una venta directa de la energía producida a 1.03 quetzales por kilovatio-hora, es de 4.78 años.

La central hidroeléctrica es capaz de cubrir un 0.21 % de la potencia eléctrica residencial consumida en el municipio de San Cristóbal Acasaguastlán y un 25 % de la demanda de alumbrado público, por lo que se descarta utilizar la central hidroeléctrica para este fin.

1. La central hidroeléctrica propuesta no es capaz de cubrir totalmente la demanda de energía eléctrica residencial ni de alumbrado público del Municipio, ya que solo puede cubrir el 0.21 % y el 25 %, respectivamente.

2. Los caudales característicos del río Uyús son $0.15 \frac{m^3}{s}$ para aguas bajas, $3.60 \frac{m^3}{s}$ para aguas medias y $7.10 \frac{m^3}{s}$ para aguas altas. Según los caudales medios mensuales registrados en un período de 8 años, se determinó que un caudal de $0.17 \frac{m^3}{s}$ tiene 95 % de probabilidad de excedencia, el cual se tomó como caudal de diseño para dimensionar las obras civiles.

3. Según las características de la zona de estudio y del sistema propuesto, se diseñó una hidroeléctrica que cuenta con una toma de fondo, un desarenador de flujo horizontal, un canal de conducción a cielo abierto, una cámara de presión y una tobería forzada. También se elaboró una ficha técnica de la turbina hidráulica necesaria para generar energía eléctrica a partir del caudal de diseño.

4. Se hizo un modelo BIM de las obras civiles para calcular el costo de inversión para construir la central hidroeléctrica propuesta, en donde se calcularon los volúmenes de concreto requeridos así como la cantidad de acero de refuerzo. Con esta información se asignó un precio para cada material y se calculó el precio total. Se determinó que el costo de inversión es de Q.509,989.72, con un retorno de inversión de 4.78 años.

Recomendaciones

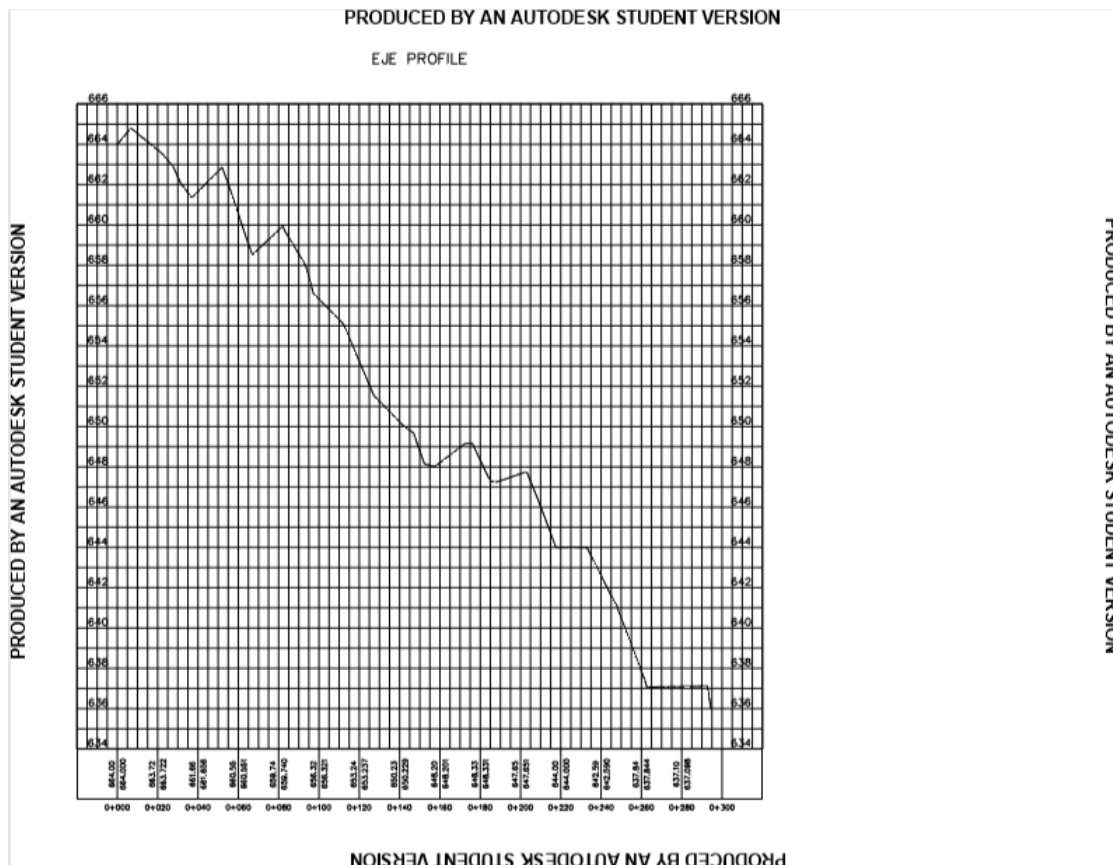
1. Una vez ejecutado el proyecto planteado, se recomienda instalar una estación meteorológica directamente en la zona de estudio, que registre tanto la precipitación como el caudal del río, para así tener datos actualizados, y con estos datos ir mejorando el proyecto.
2. Se recomienda mantener intactos los bosques, tanto en la zona de estudio como de la parte alta de la montaña, pues estos son indispensables para el ciclo hidrológico del que depende la central hidroeléctrica.
3. Se recomienda monitorear constantemente la condición de los equipos electromecánicos, y consultar con técnicos especializados si se detecta alguna deficiencia en los mismos.
4. Se recomienda verificar que aguas arriba no se hagan obstrucciones al flujo del río por ningún motivo, pues esto puede afectar directamente la generación de energía.
5. Se recomienda que, antes de ejecutar el proyecto, se realice una consulta o encuesta a los pobladores cercanos a la zona de estudio para que estos se familiaricen con el proyecto, facilitando así el proceso de diálogo y negociación en caso de que ellos no estén de acuerdo con el diseño propuesto.
6. Se recomienda considerar la adición de otras obras civiles para aumentar la potencia instalada de la central hidroeléctrica, como una presa para regular y retener el caudal del río Uyús, y determinar si se mantiene la rentabilidad. Esto provocará un alza en los costos de inversión actuales, pero también en los ingresos.

-
- [1] A. Celis, *Caracterización del bosque de ribera de las subcuencas del río Uyús, El Progreso y río Hondo, Zacapa en la región semiárida del valle del Motagua*. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2008.
 - [2] Y. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, Séptima edición. McGraw-Hill/Interamericana editores, S.A. de C.V., 2009.
 - [3] J. Santos, *Estudio para la implementación de una pequeña hidroeléctrica, en un beneficio húmedo de café*. Facultad de ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006.
 - [4] J. M. Chávez, *Análisis y diseño de cimentaciones para turbinas hidráulicas en hidroeléctricas medianas*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014.
 - [5] D. Mora y J. Hurtado, *Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos*. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Jeveriana, 2004.
 - [6] J. Carcelén, R. Maruri, T. López y L. Monition, *Manual de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Banco Interamericano del Desarrollo, 1985.
 - [7] E. Vallarino y L. Cuesta, *Aprovechamientos hidroeléctricos*, Primera Edición. PISCEGRAF S.L., 2000, vol. 2.
 - [8] A. Campos, E. Sinichenko e I. Gritsuk, *Hidráulica e hidrología para ingeniería*, Primera Edición. Facultad de Ingeniería, URAP, 2016.
 - [9] B. Quintero, *Metodologías de diseño de obras hidráulicas en estudios de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, 2009.
 - [10] R. A. Martínez, *Desarrollo de un modelo conceptual para el diseño de microcentrales hidroeléctricas con fines de desarrollo rural*. Escuela regional de Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1996.
 - [11] S. Tixe, *Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastecimiento de agua rural*. Organización Panamericana de la Salud, 2004.

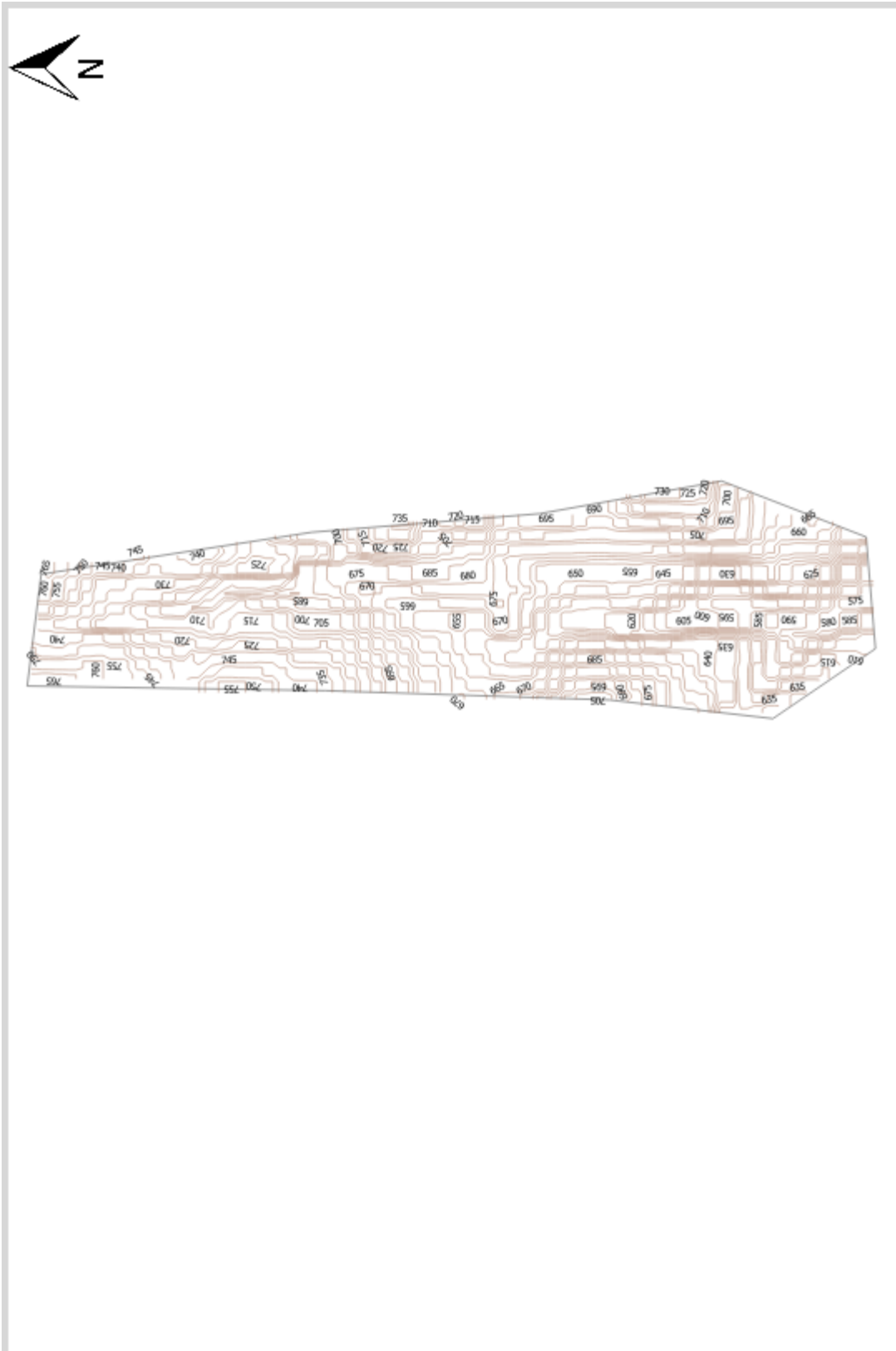
- [12] M. Morales de la Cruz, *Modelación matemática de la integración entre la vegetación de ribera y el régimen hídrico del río en condiciones semiáridas*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Universidad Politécnica de Valencia, 2010.

11.1. Mapas de la zona de estudio

11.1.1. Perfil de la tubería forzada

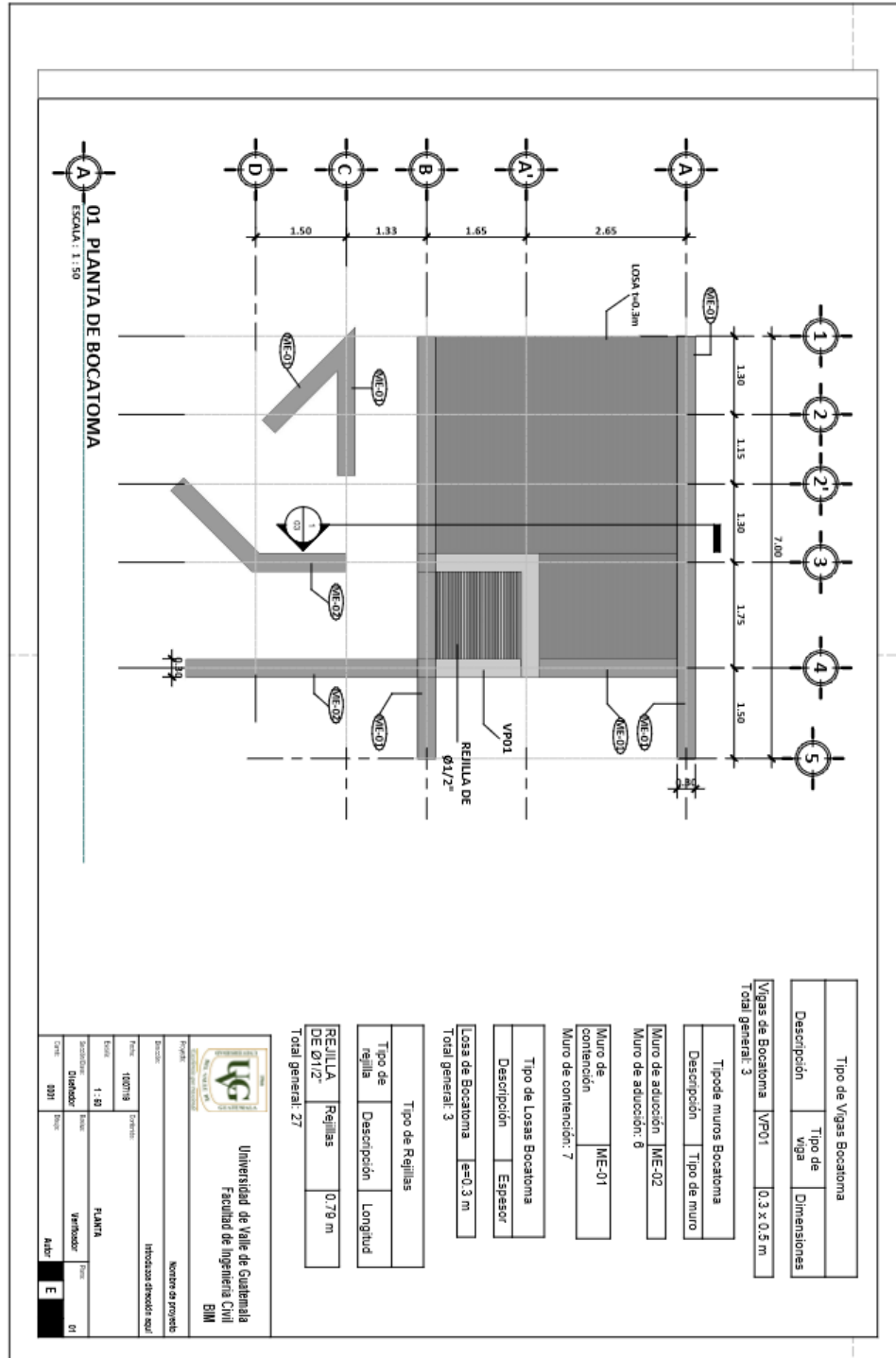


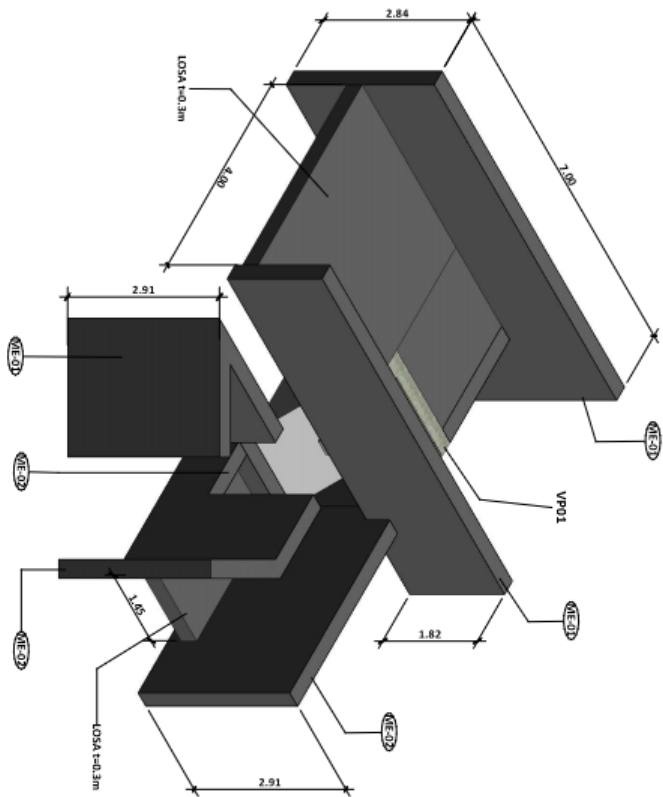
11.1.2. Mapa topográfico (elevaciones a cada 10 m)



11.2. Planos de las obras civiles

11.2.1. Planos de la toma





01 VISTA 3D DE BOCATOMA
ESCALA: 1

Tipo de Vigas Bocatoma	
Descripción	Tipo de viga Dimensiones
Vigas de Bocatoma	VP01 0.3 x 0.5 m
Total general: 3	

Tipode muros Bocatoma	
Descripción	Tipo de muro
Muro de aducción	ME-02
Muro de aducción:	6
Muro de contención	ME-01
Muro de contención:	7

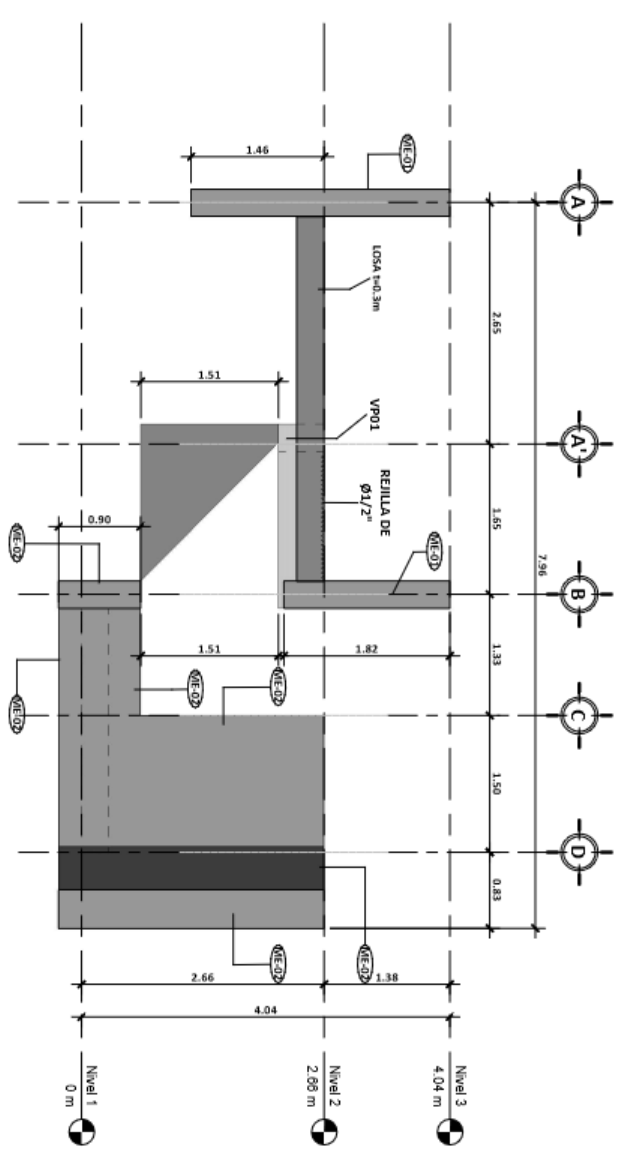
Tipo de Losas Bocatoma	
Descripción	Espesor
Losas de Bocatoma	e=0.3 m
Total general: 3	

Tipo de Losas Bocatoma	
Descripción	Espesor
Losas de Bocatoma	e=0.3 m
Total general: 3	



Universidad de Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería Civil
BIM

Proyecto	Módulo de proyecto		
Etapa	160713	Contenido	Introducción al modelo BIM
Fecha	160713	Autores	IVANETZCO
Director	Wendee	Profesor	CE
Co-director	Wendee	Asesor	A



SECCION A
ESCALA 1:35


 Universidad de Valle de Guatemala Facultad de Ingeniería Civil EIM		Nombre de proyecto	
		Introducción de especificaciones	
Fecha: 15/07/13		Código:	
Escala: 1:35		SECCION	
Dibujante: [Redacted]		Verificador: [Redacted]	
Cada: 3001		E: [Redacted]	

Tabla de cuantificación de Vigas de Bocanoma						
Descripción	Tipo de viga	Dimensiones	Volumen	Longitud	Costo	Costo Concreto
Vigas de Bocanoma	VP01	0.3 x 0.5 m	0.21 m³	1.72 m	\$1300.00	\$274.42
Vigas de Bocanoma	VP01	0.3 x 0.5 m	0.31 m³	1.75 m	\$1300.00	\$399.75
Vigas de Bocanoma	VP01	0.3 x 0.5 m	0.22 m³	1.72 m	\$1300.00	\$283.92
Total general: 3						\$958.09

Tabla de cuantificación de muros						
Descripción	Tipo de muro	Longitud	Volumen	Área	Costo	Costo Concreto
Muro de aducción	ME-02	3.05 m	0.82 m³	3 m²	\$1110.00	\$914.09
Muro de aducción	ME-02	1.33 m	0.36 m³	1 m²	\$1110.00	\$366.81
Muro de aducción	ME-02	1.5 m	1.49 m³	6 m²	\$1110.00	\$1659.11
Muro de aducción	ME-02	1.84 m	1.42 m³	5 m²	\$1110.00	\$1575.98
Muro de aducción	ME-02	2.65 m	2.31 m³	8 m²	\$1110.00	\$2567.93
Muro de aducción	ME-02	1.33 m	0.32 m³	1 m²	\$1110.00	\$352.08
Muro de aducción: 6						\$7485.97
Muro de contención	ME-01	2.24 m	2.01 m³	7 m²	\$1110.00	\$2232.17
Muro de contención	ME-01	7 m	3.82 m³	13 m²	\$1110.00	\$4442.42
Muro de contención	ME-01	7 m	5.96 m³	20 m²	\$1110.00	\$6620.04
Muro de contención	ME-01	1.81 m	1.40 m³	5 m²	\$1110.00	\$1553.02
Muro de contención	ME-01	1.33 m	1.14 m³	4 m²	\$1110.00	\$1267.00
Muro de contención	ME-01	1.87 m	1.25 m³	4 m²	\$1110.00	\$1398.83
Muro de contención	ME-01	2.43 m	1.00 m³	3 m²	\$1110.00	\$1108.49
Muro de contención: 7						\$19411.87

Tabla de cuantificación de Rejillas			
Tipo de rejilla	Descripción	Longitud	Costo
REJILLA DE Ø1/2"	Rejillas	0.79 m	\$270.00
Total general: 27			\$270.00

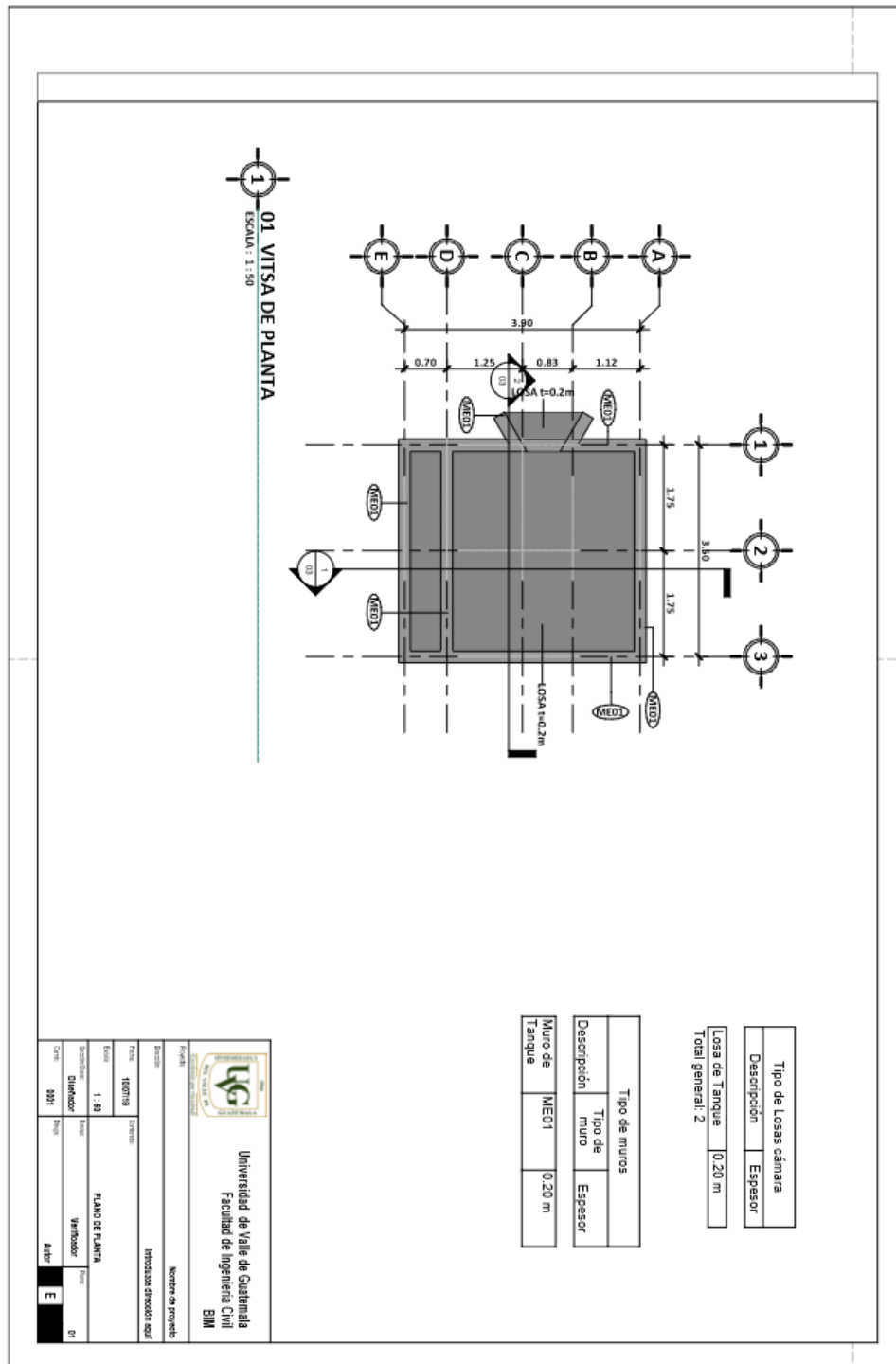
Tabla de cuantificación de Losas					
Descripción	Espesor	Volumen	Área	Costo	Costo Concreto
Losas de Bocanoma	e=0.3 m	4.32 m³	14 m²	\$1300.00	\$5616.00
Losas de Bocanoma	e=0.3 m	1.20 m³	4 m²	\$1300.00	\$1564.32
Losas de Bocanoma	e=0.3 m	1.17 m³	4 m²	\$1300.00	\$1516.94
Total general: 3					\$8695.86

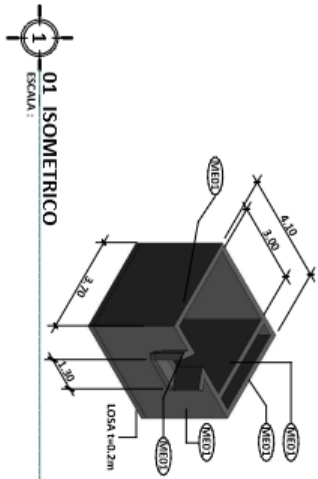
Tabla de cuantificación de rampas					
Descripción	Volumen	Anchura	Costo	Costo Concreto	
Rampa de abducción de Bocanoma	2.27 m³	1.75 m	\$1300.00	\$2951.00	
Total general: 1					\$2951.00

		Nombre de proyecto	
		Instituto de desarrollo rural	
Fecha: 16/07/18		Centro:	
Escriba:		TESLA I	
Autorizador:		Verificador:	
Cant: 301		Madr: E	

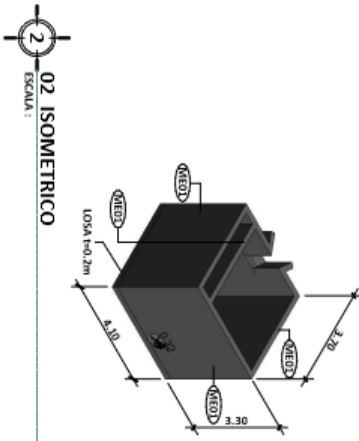
Universidad de Valle de Guatemala
 Facultad de Ingeniería Civil
 EIM

11.2.2. Planos de la cámara de presión

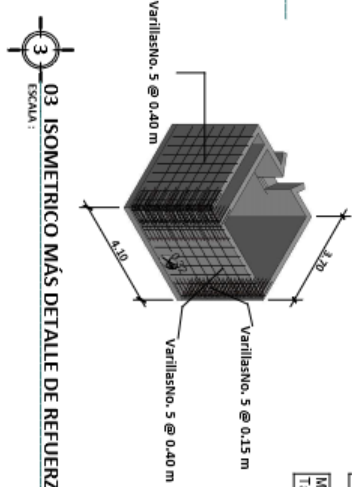




01 ISOMETRICO
ESCALA :



02 ISOMETRICO
ESCALA :



03 ISOMETRICO MÁS DETALLE DE REFUERZO
ESCALA :

Tipo de refuerzo muros			
Elemento	Recuento	No. Varilla	Varillas
Refuerzo de muro	44	#5	78.244854
Total general:			44
			78.244854

Tipo de Losas cámara	
Descripción	Espesor
Losa de Tanque	0.20 m
Total general: 2	

Tipo de muros		
Descripción	Tipo de muro	Espesor
Muro de Tanque	ME01	0.20 m

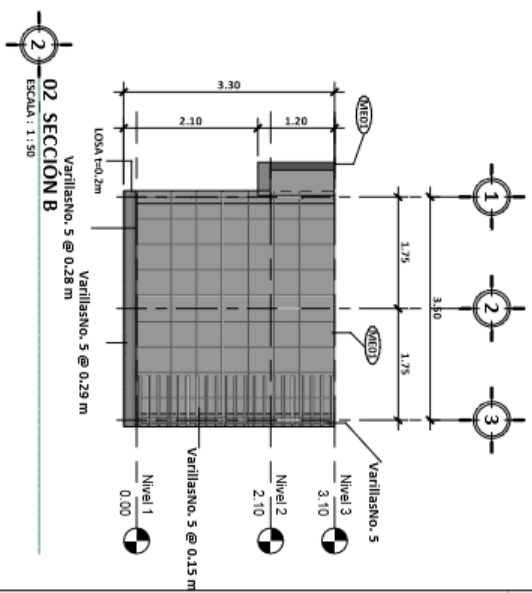
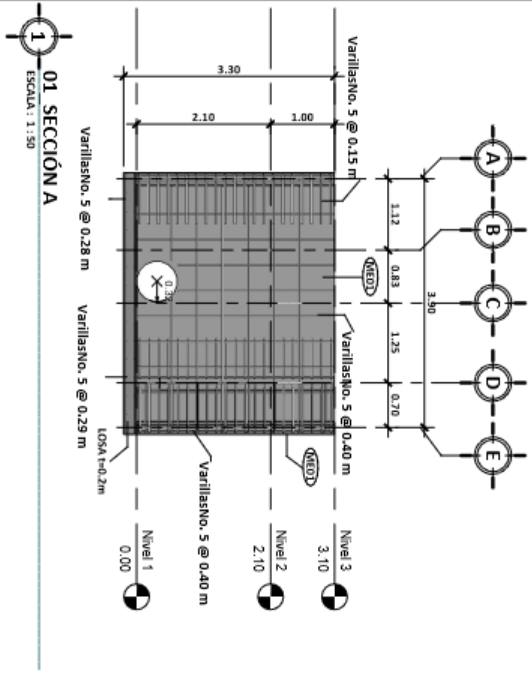


Universidad de Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería Civil
BIM

Nombre de proyecto

Institución creadora del equi

Proyecto	100713	Control	ISOMETRICO1
Fecha	10/07/13	Estado	Verificado
Escala		Fecha	02
Autores	2011	Autores	E



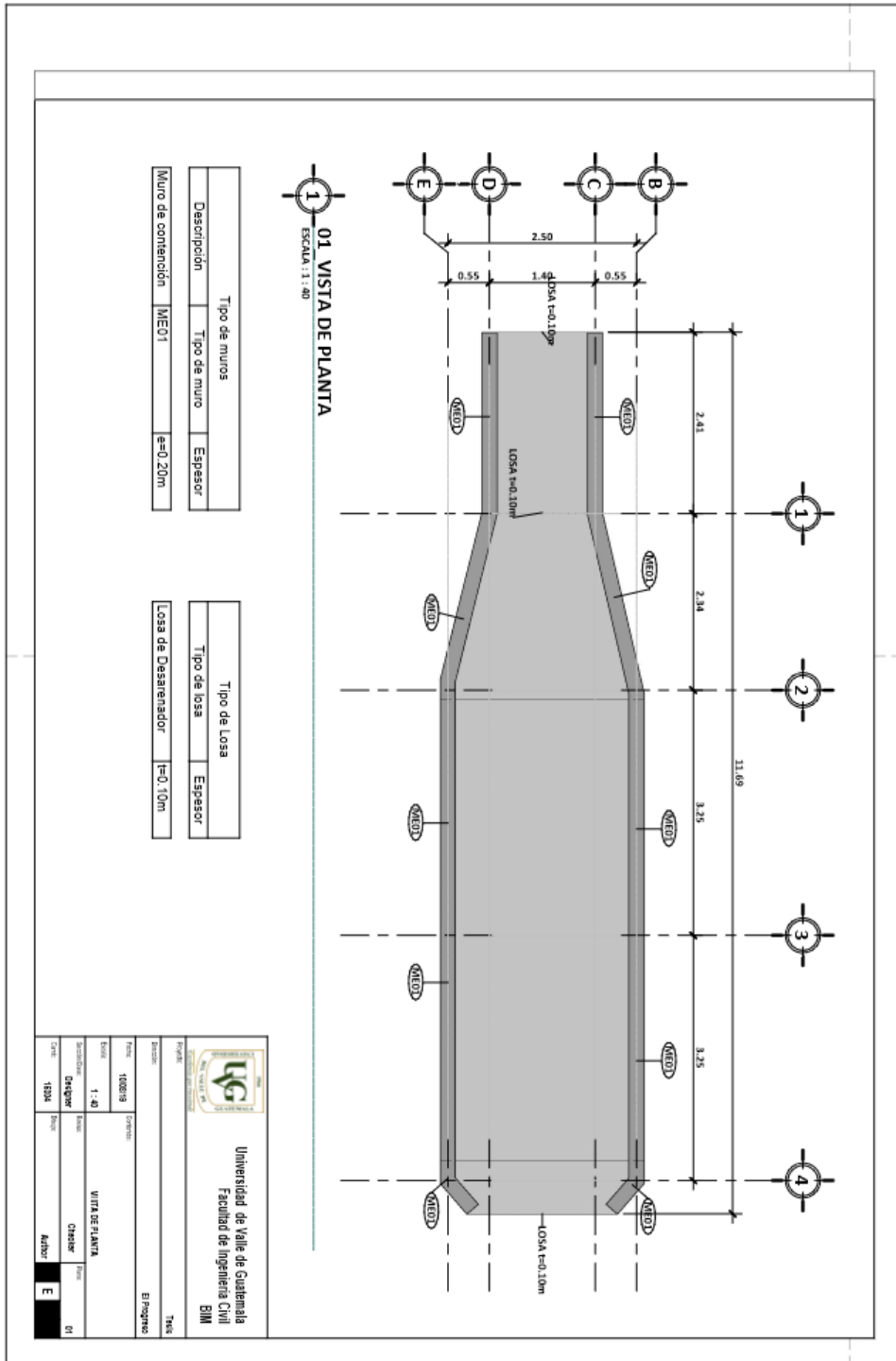
Tipo de Losas cámara	
Descripción	Espesor
Losas de Tanque 0.20 m	
Total general: 2	

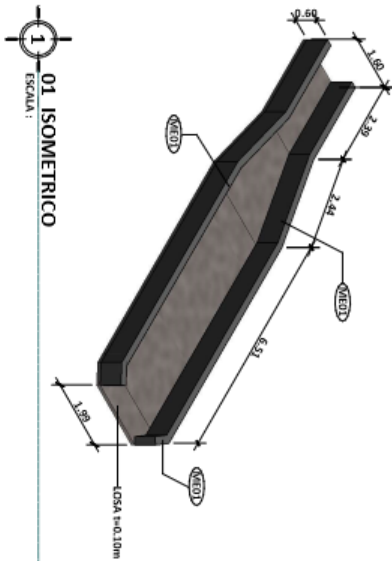
Tipo de muros			
Descripción	Tipo de muro	Espesor	
Muro de Tanque		ME01	0.20 m

Tipo de refuerzo muros			
Elemento	Recuento	No. Vanillas	Vanillas
Refuerzo de muro	44	#5	78.040854
Total general: 44			

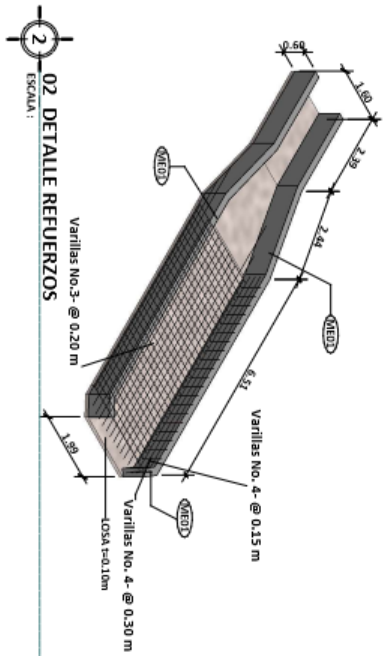
		Universidad de Valle de Guatemala Facultad de Ingeniería Civil BIM	
		Nombre de proyecto Ubicación: director de agua	
Fecha:	16/07/19	Contenido:	RECONSTRUCCIÓN
Escala:	1:8	Formato:	AutoCAD
AutoCAD:	Director	Verificador:	Adar
Chapa:	201	Fecha:	03

11.2.3. Planos del desarenador





01 ISOMETRICO
ESCALA:



02 DETALLE REFUERZOS
ESCALA:

Tipo de muros		Espesor
Descripción	Tipo de muro	
Muro de contención	ME01	e=0.20m

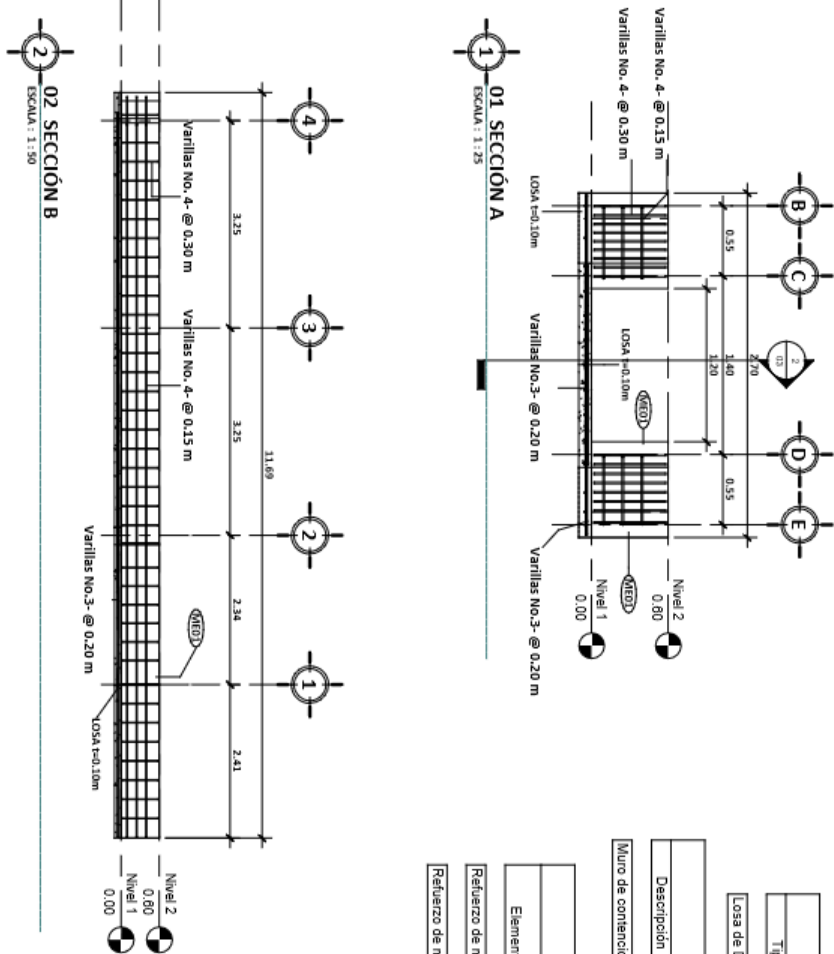
Tipo de Losa		Espesor
Tipo de losa		
Losa de Desarenador	t=0.10m	

Reinuerzo de muros		
Elemento	No. de barra	Varillas
Reinuerzo de muros	No. 3	43.100164
Reinuerzo de muros	No. 4	18.057471



Universidad de Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería Civil
BIM

Página:		Título:	
Escala:		El Proyecto:	
Fecha:	16/08/19	Código:	ISOMETRICO1
Elaborador:	Diego	Revisor:	Chris
Fecha:	15/04	Revisor:	E



Tipo de Losa	
Tipo de losa	Espesor
Losa de Desarmador f=0.10m	

Tipo de muros	
Descripción	Tipo de muro
Espesor	
Muro de contención	ME01
f=0.20m	

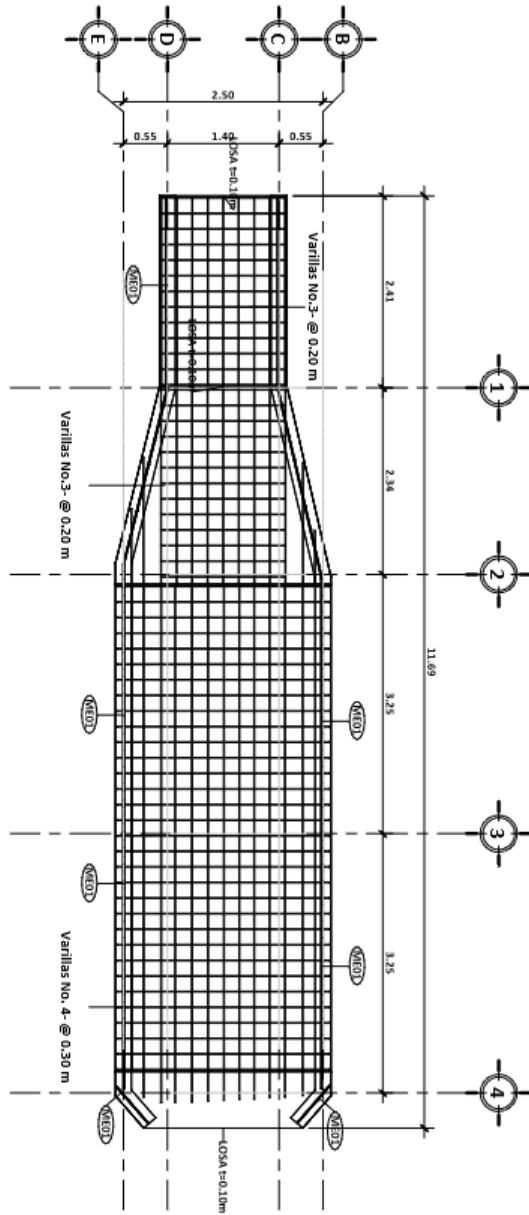
Reinforcement de muros	
Elemento	No. de barra
Varillas	

Reinforcement de muros	No. 3	43.100184
Reinforcement de muros	No. 4	18.057471




Universidad de Valle de Guatemala
Facultad de Ingeniería Civil
BIM

Título		Ejercicio	
100819		Ejercicio	
Código		Detalle de Estructura	
Al Instituto		Código	
Diseño		Autor	
1524		E	



01 DETALLE DE ARMADO DE LOSA DE DESAREMADOR
ESCALA 1:40

 Universidad de Valle de Guatemala Facultad de Ingeniería Civil BIM		Título	
		El Programa	
Fecha: 10/08/18		Código:	
Escala: 1:40		DETALLE REFORZO LOSA	
Autor: Diego		Revisor: Cristian	
Código: 1304		Aprobado: E	

Corriente alterna Corriente eléctrica variable en la que las cargas eléctricas cambian el sentido del movimiento de manera periódica. 18

Corriente continua Corriente de intensidad constante en la que el movimiento de las cargas siempre es en el mismo sentido. 18

Generador Dispositivo electromecánico que puede convertir el trabajo mecánico en trabajo eléctrico. 18

Potencia Capacidad de efectuar trabajo en una unidad de tiempo. 18

Reguladores Dispositivos eléctricos que mantienen constante el voltaje de entrada y de salida de un circuito. 19

Semiconductores Que tienen una resistencia apreciablemente más alta que la de los buenos conductores e inferior a la de los aisladores, la cual decrece al aumentar la temperatura. 18

Tiristores Componentes electrónicos que utilizan realimentación interna para producir conmutación. 19

Transistores Dispositivos eléctricos que entregan una señal de salida en respuesta a una señal de entrada. 19