

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Estudio de factibilidad y análisis de sistema de micro-
generación hidroeléctrica**

Proyecto de investigación

Mateo David Arias Venegas

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito

para la obtención del título de

Ingeniería Mecánica

Quito, 14 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Estudio de factibilidad y análisis de sistema de micro-generación
hidroeléctrica**

MATEO DAVID ARIAS VENEGAS

Calificación:

Nombre del profesor, título académico.

Juan Sebastián Proaño Avilés , Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 10 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Mateo David Arias Venegas

Código: 00124712

Cédula de Identidad: 1724374812

Lugar y fecha: Quito, 10 de mayo de 2019

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la factibilidad técnica y económica de un sistema de micro-generación hidroeléctrica con una turbina tipo Kaplan. Este sistema se propone como una fuente renovable de energía debido a su mínimo impacto ambiental y a su bajo costo de inversión inicial. El sistema descrito es analizado en un caso de estudio dado, este caso toma en cuenta el canal de riego de Píllaro situado en la provincia de Tungurahua en Ecuador. Para el análisis técnico se realizó un modelado en 3D de acuerdo con las especificaciones del fabricante que propone este sistema, una empresa en Bélgica llamada Turbulent, y posteriormente se realizó una simulación CFD en el software SolidWorks 2017. De igual manera, para el análisis económico se comparó costos nivelados de energía, es decir, el costo del kWh del sistema de micro-generación versus la energía tradicional eléctrica suministrada por el estado. Como resultado de esta investigación se concluye que el sistema de micro-generación hidroeléctrica es factible para comunidades que no tengan un crecimiento poblacional elevado y se encuentren a distancias menores a 500 metros del punto de suministro de energía.

Palabras clave: turbina Kaplan, simulación CFD, SolidWorks, micro generación eléctrica, hydropower, Ecuador.

ABSTRACT

The present work is based on the analysis of the technical and economic feasibility of a micro-hydroelectric generation system with a Kaplan turbine. This system is proposed as an alternative of a renewable nature due to its minimal environmental impact and its low initial investment cost. The system described is analyzed in the case of a given study, this case considers the irrigation channel of Píllaro located in the province of Tungurahua in Ecuador. For the technical analysis, a 3D modeling was carried out according to the manufacturer's specifications proposed by this system, a company based in Belgium called Turbulent, and then a CFD simulation was carried out in SolidWorks 2017 software. Similarly, for the economic analysis was used levelized cost of energy, that is, the cost of the kWh of the micro-generation system versus the traditional electric energy supplied by the state. As a result of this research, it is concluded that the micro-hydroelectric generation system is feasible for communities that do not have a high population growth and are at distances less than 500 meters from the point of energy supply.

Key words: Kaplan turbine, CFD simulation, SolidWorks, micro electric generation, hydropower, Ecuador.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se lo dedico a mi familia que con su esfuerzo y dedicación lograron apoyarme para completar esta etapa de mi vida. De igual forma, a todas las personas dentro y fuera de la USFQ que dedicaron su tiempo, paciencia y cariño para que pueda completar esta y más metas que he logrado proponerme a lo largo de estos cinco años.

Gracias a la vida, que me ha dado tanto...

Índice

1. Contenido

| | |
|---|----|
| Índice | 7 |
| Índice de tablas | 11 |
| Índice de figuras | 12 |
| Nomeclatura..... | 14 |
| 2. Introducción..... | 15 |
| 2.1. Objetivo | 17 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 17 |
| 3. Marco Teórico | 17 |
| 3.1. Análisis en Ecuador | 17 |
| 3.1.1. Energía..... | 17 |
| 3.1.2. Topografía y recursos hídricos | 19 |
| 3.1.3. Sector de Estudio | 20 |
| 3.2. Posibles aplicaciones | 23 |
| 3.2.1. Sistemas Off the grid | 23 |
| 3.2.2. Ventajas | 24 |
| 3.2.3. Desventajas..... | 24 |
| 3.3. Industria | 24 |
| 3.3.1. Ejemplos de industrias autosustentables en Ecuador | 24 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.3.2. | Ventajas | 25 |
| 3.3.3. | Desventajas | 26 |
| 4. | Tipo de Sistema Propuesto | 26 |
| 4.1. | Descripción General | 26 |
| 4.2. | Ventajas | 28 |
| 4.3. | Desventajas | 29 |
| 4.4. | Tipos | 30 |
| 4.5. | Especificaciones técnicas de la turbina..... | 31 |
| 4.6. | Potencia hidrocínética Teórica..... | 32 |
| 4.7. | Potencia hidrocínética Real | 32 |
| 4.8. | Análisis de caudal | 33 |
| 4.8.1. | Área de sección transversal | 33 |
| 4.8.2. | Velocidad media del fluido..... | 34 |
| 4.9. | Caudal entrante | 35 |
| 4.10. | Número de Reynold | 35 |
| 5. | Métodos | 35 |
| 5.1. | Dimensionamiento | 35 |
| 5.2. | Diseño 3D | 38 |
| 5.3. | Ensamblaje | 40 |
| 5.4. | Simulación CFD en SolidWorks..... | 43 |

| | | |
|--------|---|----|
| 5.4.1. | Análisis CFD | 43 |
| 5.4.2. | Mallado..... | 43 |
| 5.4.3. | Simulación Dinámica | 44 |
| 5.4.4. | Parámetros de simulación dinámica | 44 |
| 5.4.5. | Análisis de velocidad angular..... | 45 |
| 5.5. | Análisis de Simulación | 46 |
| 6. | Proceso de Manufactura | 49 |
| 6.1. | Diseño de proceso | 49 |
| 6.2. | Diagrama de diseño de procesos para el sistema de micro-generación hidroeléctrica 50 | |
| 6.3. | Elementos mecánicos..... | 50 |
| 6.3.1. | Turbina Kaplan..... | 50 |
| 6.3.2. | Estructura Metálica..... | 51 |
| 6.4. | Obra Civil | 52 |
| 6.4.1. | Materiales | 52 |
| 6.4.2. | Plano estructural | 52 |
| 6.5. | Plano de Ensamblaje | 52 |
| 6.6. | Estudio de Factibilidad | 52 |
| 6.6.1. | Análisis Tecno económico..... | 52 |
| 6.6.2. | Análisis Energético..... | 53 |

| | |
|--|----|
| | 10 |
| 6.6.3. Estimación de costo | 53 |
| 6.6.4. Costo Nivelado de Energía..... | 55 |
| 6.6.5. Mantenimiento..... | 56 |
| 7. Resultados y Discusiones | 58 |
| 8. Conclusiones..... | 62 |
| 9. Recomendaciones | 63 |
| 10. Referencias | 65 |
| 11. Anexos..... | 67 |
| 11.1. Anexo A: Plano de Ensamblaje..... | 67 |
| 11.2. Anexo B: Plano Obra Civil | 69 |
| 11.3. Anexo C: Plano Turbina Kaplan | 71 |
| 11.4. Anexo D: Plano Estructura Metálica..... | 73 |
| 11.5. Anexo E: Análisis Energético Vivienda Estándar por energía tradicional | 75 |
| 11.6. Anexo F: Análisis Energético Vivienda Rural por energía tradicional..... | 76 |
| 11.7. Anexo G: Rubros generales del sistema propuesto | 77 |
| 11.6 Anexo H: Materiales de la obra Civil..... | 78 |
| 11.7 Anexo I: Precio Referencial para la instalación de postes | 79 |
| 11.8 Anexo J: Análisis Económico de Micro Generación Hidroeléctrica sin considerar costos de instalación | 81 |

| | | |
|-------|--|----|
| 11.9 | Anexo K: Análisis Económico de Costo energético tradicional a una distancia de 500 metros | 82 |
| 11.10 | Anexo M: Diagrama de procesos propuesto para el sistema de micro-generación hidroeléctrica | 83 |

Índice de tablas

| | | |
|---------|---|----|
| Tabla 1 | Potencia nominal y efectiva por tipo de fuente en Ecuador. | 18 |
| Tabla 2 | Coordenadas UTM de Canal de Riego de Píllaro | 22 |
| Tabla 3 | Especificaciones Técnicas para dimensionamiento del sistema proporcionado por la empresa Turbulent.be | 38 |
| Tabla 4 | Parámetros de Simulación Dinámica utilizados en SolidWorks 2017 | 45 |
| Tabla 5 | Materiales sugeridos para partes de turbina Kaplan..... | 51 |
| Tabla 6 | Datos Generales para cálculo de potencia hidroeléctrica real | 53 |
| Tabla 7 | Potencia Generada del sistema con turbina Kaplan | 53 |
| Tabla 8 | Análisis Económico de Micro Generación Hidroeléctrica considerando costos de instalación a 500 metros | 60 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1 La potencia nominal producida por las hidroeléctricas representan la mayor cantidad de energía generada en Ecuador | 19 |
| Figura 2 Ruta analizada para estudio de factibilidad localizada en el Canal de riego de Píllaro | 21 |
| Figura 3 Perfil de Elevación Analizado para encontrar el head tomando en cuenta la ruta trazada en el canal de Píllaro | 22 |
| Figura 4 Sistema propuesto por la empresa Turbulent y analizado para la investigación.... | 27 |
| Figura 5 Tipos de sistemas micro-hidráulicos que dependen de las condiciones geográficas para su instalación | 31 |
| Figura 6 Parámetros de medición para sección transversal de canal..... | 33 |
| Figura 7 Medidas referenciales sugeridas por la empresa Turbulent para dimensionamiento – Vista Superior | 36 |
| Figura 8 Medidas referenciales sugeridas por la empresa Turbulent para dimensionamiento – Vista Lateral | 37 |
| Figura 9 Vista Isométrica de Obra Civil..... | 38 |
| Figura 10 Vista Superior de Obra civil del sistema..... | 39 |
| Figura 11 Estructura mecánica de soporte para turbina Kaplan..... | 39 |
| Figura 12 Turbina tipo Kaplan utilizada para la simulación de fluidos | 40 |
| Figura 13 Vista isométrica del ensamblaje del sistema en donde se muestran las tres piezas juntas..... | 41 |

| | |
|---|----|
| Figura 14 Vista superior de ensamblaje considerando las tres partes principales (Estructura metálica, obra civil y turbina Kaplan) | 42 |
| Figura 15 Comprobación de geometría para análisis de fluidos para comprobar hermeticidad del sistema | 42 |
| Figura 16 Velocidad específica en función del head tomada del libro de Turbomaquinaria de Abeykoon 2017 | 46 |
| Figura 17 Vista Isométrica de la simulación CFD – Se muestra el aumento de energía cinética en el diámetro externo de la turbina | 48 |
| Figura 18 Vista Superior de la simulación CFD | 48 |
| Figura 19 CutPlot de la vista lateral de la simulación por CFD - Se muestra el aumento de energía cinética en el diámetro externo de la turbina | 49 |
| Figura 21 Distancia de Instalación vs Costo \$/KWh para energía eléctrica suministrada por redes tradicionales – A mayor distancia, mayor costo de inversión..... | 61 |
| Figura 22 Distancia de Instalación vs Costo \$/KWh para energía micro generación hidroeléctrica. Tiene un costo competitivo para el mercado energético ecuatoriano..... | 62 |

Nomenclatura

| | | |
|---------------------|---|---------------------|
| P_T | Potencia Hidroeléctrica Teórica | [watts] |
| P_g | Potencia Hidroeléctrica Generada | [watts] |
| g | Gravedad | [m/s ²] |
| H | Head | [m] |
| Q | Caudal | [m ³ /s] |
| n_o | Eficiencia general (overall) | |
| A_T | Área transversal de canal de riego | [m ²] |
| h_1 | Primera medida de altura de canal de riego | [m] |
| b | Ancho de canal de riego | [m] |
| n | Número de medias tomadas a lo ancho del canal | [m] |
| V_m | Velocidad media de flujo de agua | [m/s] |
| l | Distancia recorrida por el flotador | [m] |
| t | Tiempo que tarda el flotador en recorrer la distancia | [s] |
| Re | Número de Reynolds | |
| $D_{efectivo}$ | Diámetro efectivo de la turbina | [m] |
| V_{fluido} | Velocidad del fluido | [m/s] |
| ∂ | Viscosidad Cinemática del fluido | [cSt] |
| $\omega = \Omega$ | Velocidad Angular | [rad/s] |
| $\sigma = \Omega_s$ | Velocidad Específica (specific speed) | |

2. Introducción

En la actualidad existe una constante preocupación respecto a la producción de energía. Las entidades gubernamentales y las necesidades medioambientales exigen tener sistemas de generación energética de carácter renovable con el fin de mejorar el alcance de este tipo de energías para movilizar recursos financieros necesarios para el desarrollo de nuevas industrias a pequeña y gran escala, con el beneficio añadido de disminuir el impacto ambiental y a su vez lograr mitigar el impacto causado por la escasez que se preverá en un futuro de combustibles fósiles. (Adams, Klobodu, & Apio, 2018)

En Ecuador no existe una variedad por este tipo de energías, ya que su matriz energética se ha enfocado principalmente en la extracción de combustibles fósiles y en las plantas de generación hidroeléctricas, por consiguiente, carece de varios tipos de procesos renovables como la construcción de plantas termoeléctricas o proyectos de energía solar y eólica para poder aprovechar los recursos naturales que se encuentran en abundancia en varias zonas del país. Debido a que nuestro país posee una cantidad significativa de recursos naturales a pequeña escala que son poco aprovechados, se propone realizar un análisis de estos con el fin de utilizarlos para producir energía eléctrica para personas que deseen tener sistemas autónomos descentralizados, así como para pequeñas industrias que deseen ser autosustentables. Esto impulsará el desarrollo social y económico en las zonas que adopten este tipo de producción siendo energía limpia, segura, económica y de manera eficiente.

El desarrollo e implementación a pequeña escala de energías de origen renovable para uso doméstico e industrial presenta una gran oportunidad de aprovechar los recursos naturales de Ecuador.

La factibilidad de los sistemas se realizará estudiando un modelo con el fin de establecer parámetros sociales y un posterior análisis tecno económico que permitirá definir si se puede implementar este sistema de pequeña escala.

Para poder suplir las necesidades energéticas requeridas para uso doméstico e industrial se tomará en cuenta un sistema denominado Microhydropower System (MHP) (Kaunda, Kimambo, & Nielsen, 2014) o sistema de micro-generación hidroeléctrica. Este tipo de sistemas desvía canales de riego o fuentes naturales de desplazamiento de agua, para poder aprovechar su energía cinética y por medio de una turbina generar electricidad. En países que poseen una topografía montañosa, los sistemas de generación MHP son los más recomendados para producción de este tipo de energía en zonas rurales. (Kaunda et al., 2014).

Dentro de este tipo de sistemas, el corazón de este es la turbina, tipo Kaplan. Este tipo de diseños es utilizado para trabajar a velocidades relativamente altas, pero con dimensiones reducidas. (Momin, Dave, Patel, & Panchal, 2017). Adicionalmente, se debe tomar en cuenta otros factores como el caudal, el dimensionamiento de la obra civil y los materiales a utilizar con el fin de establecer una aproximación óptima en el costo del sistema.

El proyecto como se mencionó anteriormente tiene un enfoque social e industrial y por consecuencia el principal factor a considerar es su costo y la factibilidad que debe tener para suplir las necesidades previstas. Por esta razón se plantea analizar un sistema energético micro-hidráulico y compararlo con alternativas renovables en Ecuador como son la energía solar y eólica, para determinar su factibilidad y ventaja respecto a estos sistemas. Adicionalmente, realizar un análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para estimar la generación eléctrica del sistema, determinar los rubros requeridos para construir el sistema micro-hidráulico con el fin de comprobar su factibilidad de implementación en el país y finalmente analizar factores tanto gubernamentales como

económicos que se debe considerar al momento de implementar este tipo de sistemas de carácter renovable en el Ecuador.

2.1.Objetivo

Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica de una turbina para micro-generación eléctrica hidráulica tipo Kaplan.

2.2.Objetivos Específicos

- Identificar el potencial de generación eléctrica en el casos de estudio doméstico rural.
- Realizar un análisis tecno económico para comprobar su implementación a nivel doméstico.
- Diseñar un sistema de generación micro hidroeléctrica para el caso de estudio propuesto.
- Analizar por medio de CFD del modelo establecido para comprobar su funcionamiento.
- Establecer los parámetros físicos que requiere el sistema para su correcto desempeño.

3. Marco Teórico

3.1.Análisis en Ecuador

3.1.1. Energía

La distribución de energía en Ecuador es variada y produce aproximadamente una potencia efectiva de 7435 MW, sin embargo, la principal fuente se basa en las centrales hidroeléctricas que corresponde al 60.34% respecto a la potencia efectiva total. Esto se debe a que en el país existe un número significativo de recursos hídricos con características necesarias para fomentar este tipo de generación de energía y promover nuevos sistemas

relacionados a la misma. Estos pueden ser corroborados en las estadísticas presentadas en la *tabla 1* y en la *figura 1* (Electricidad, 2017)

| TIPO FUENTE | TIPO DE CENTRAL | TIPO DE UNIDAD | POTENCIA NOMINAL (MW) | POTENCIA EFECTIVA | |
|------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------|-------------------|---------------|
| | | | | (MW) | % |
| RENOVABLE | Hidráulica | Hidráulica | 4515.96 | 4486.61 | 60.34 |
| | Biomasa | Turbovapor | 144.30 | 136.40 | 1.83 |
| | Fotovoltaica | Fotovoltaica | 26.48 | 25.59 | 0.34 |
| | Eólica | Eólica | 21.15 | 21.15 | 0.29 |
| | Biogás | MCI | 7.26 | 6.50 | 0.09 |
| TOTAL RENOVABLE | | | 4715.15 | 4676.25 | 62.89 |
| No Renovable | Térmica | MCI | 1937.48 | 1551.47 | 20.87 |
| | | Turbogás | 921.85 | 775.55 | 10.43 |
| | | Turbovapor | 461.87 | 431.74 | 5.81 |
| TOTAL RENOVABLE | | | 3321.20 | 2758.76 | 37.11 |
| TOTAL GENERAL | | | 8036.35 | 7435.01 | 100.00 |

Tabla 1 Potencia nominal y efectiva por tipo de fuente en Ecuador.

Extraída de: Electricidad 2017

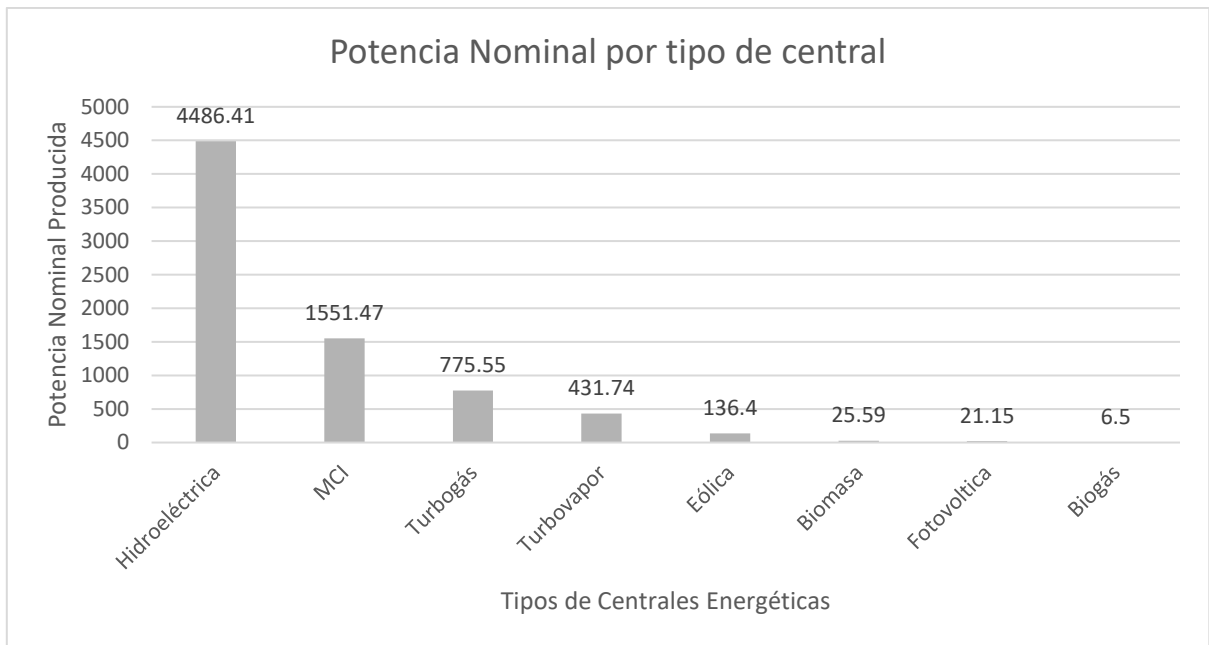


Figura 1 La potencia nominal producida por las hidroeléctricas representan la mayor cantidad de energía generada en Ecuador

Extraída de: *Electricidad 2017*

3.1.2. Topografía y recursos hídricos

Ecuador se extiende sobre las tres cadenas montañosas Cordillera Central, Cordillera Occidental e Interandino y en esta zona se encuentran varios volcanes activos o potencialmente activos, por esta razón, en el país existe una geografía donde predominan las montañas, pendientes y nevados que alimentan cuencas naturales de fácil acceso. (High Magazine, 1994)

La planificación hídrica realizada en el 2010 muestra que el volumen total de recursos hídricos es de 376 km³ y los censos realizados concluyen que el consumo de agua en ese año fue de 15.8 km³, en donde 1.48 km³ son de uso doméstico, 13.05 km³ son destinados a uso agrícola y 1.27 km³ están destinados a producción industrial.

Los balances de oferta y demanda indican que la probabilidad de que se suministre agua para todos los usuarios hasta el año 2035 será de un 99.9%, mientras que el porcentaje de déficit para uso de riego será de un 11%. (Yáñez, Bastidas, & Córdoba, 2017) Por lo tanto, podemos concluir que nuestro país dispone de una cantidad significativa de recursos hídricos que pueden ser aprovechados para producción energética a pequeña y gran escala.

3.1.3. Sector de Estudio

El sector de estudio para la presente investigación se ubica en el canal de riego de Píllaro, en la provincia de Tungurahua, Ecuador. Los recursos hídricos fueron asignados por el gobierno provincial para permitir una distribución equitativa a las 6684.1 hectáreas conectadas al canal y este beneficia aproximadamente a 27500 personas.

El origen de este canal se da en las aguas turbinadas de la Central Hidroeléctrica de Pucará, ubicada en Pisayambo. El canal se divide en dos ramales, el Ramal Norte en el sector de Chaupi tiene una longitud aproximada de 16.3 km con un caudal que varía entre los 3.18 m³/s y los 1.27 m³/s; para el Ramal Sur en el sector de Rosario tiene una longitud de 12.1 km. con un caudal de 1.91 m³/s. (La Hora, 2008)

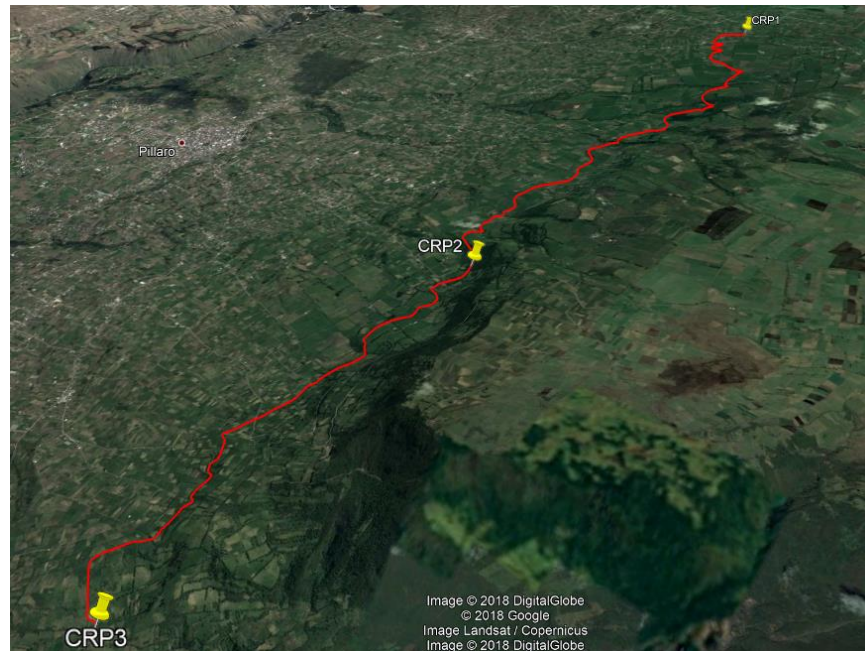


Figura 2 Ruta analizada para estudio de factibilidad localizada en el Canal de riego de Píllaro

Para realizar una aproximación de la diferencia de alturas disponible en la topografía analizada y posteriormente realizar un análisis de potencia generada por el sistema micro-hidráulico es necesario realizar un análisis del terreno. Con el fin de obtener esta información se trazó una ruta en el software Google Earth 2018 que se aproxime a la del caudal como se muestra en la Figura 1 y posteriormente se realiza un perfil de elevación.

Las coordenadas que muestran los puntos de estudio se encuentran descritas en el sistema de coordenadas universal transversal de Mercator (UTM) como se muestra en la *tabla 2*. El perfil de elevación muestra los metros sobre el nivel del mar en cada punto dado, esto posteriormente se exportan los datos a Excel 2016 y se realiza el perfil como se muestra en la *figura 3*.

| SECCIÓN DE CANAL | COORDENADA UTM |
|------------------|-----------------------|
| Punto inicial | X 776970 Y 9875948 |
| Punto medio | X 777513 Y 9869719 |
| Punto final | X 777859 Y 9865938 |

Tabla 2 Coordenadas UTM de Canal de Riego de Píllaro

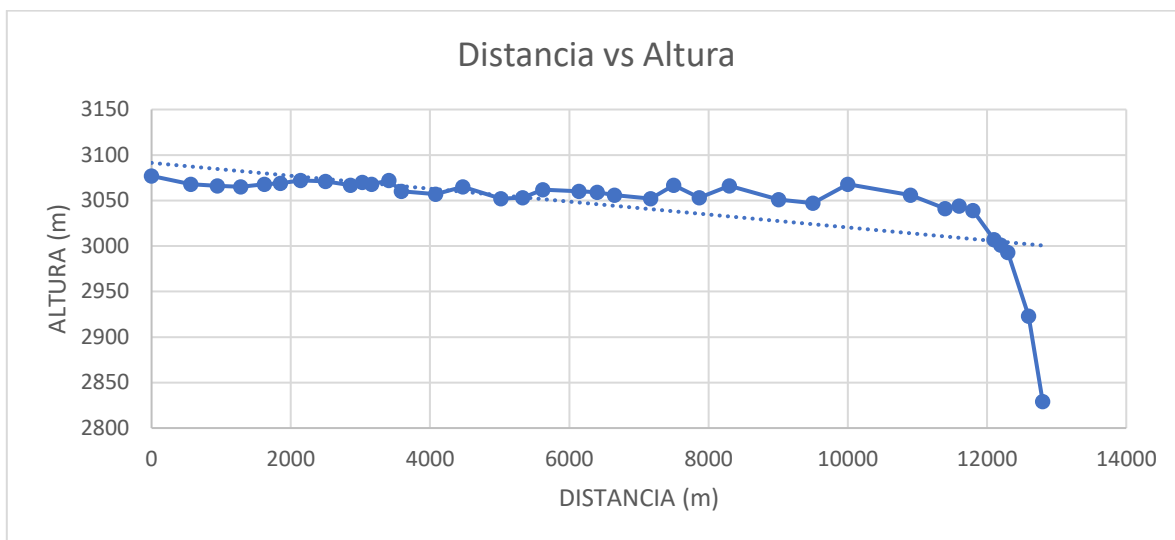


Figura 3 Perfil de Elevación Analizado para encontrar el head tomando en cuenta la ruta trazada en el canal de Píllaro

Una vez obtenido el perfil de elevación se realiza un promedio de las diferencias de alturas encontradas omitiendo los valores demasiado altos para evitar una falla estadística en

los mismos, una vez realizado esto, se obtuvo que el valor promedio de la diferencia de alturas para poder realizar los cálculos es de 2 m.

3.2.Posibles aplicaciones

3.2.1. Sistemas Off the grid

El concepto de *fuera de red*, o como se los conoce en inglés *off the grid* (OTG), se refieren a sistemas que no están directamente conectados a una red eléctrica nacional, regional o local. Usualmente se relaciona este concepto con cualquier tipo de sistemas o mini redes para generar electricidad, ya que su principal uso es brindar autonomía de uno o más servicios públicos a una comunidad pequeña o a una residencia que se encuentre en espacios distantes o alejados de puntos de acceso de red, sin embargo, su concepto inicial es que los espacios OTG tienen una autonomía completa de servicios como gas, suministro de agua, electricidad, alcantarillado, entre otros.(Electricidad, 2017)

La energía eléctrica que es suministrada puede originarse de diferentes fuentes de energía renovable como la eólica, solar (en mayor cantidad la energía fotovoltaica), micro hidroeléctrica, geotérmica o una combinación de estos sistemas.

Requisitos para sistemas autónomos

Para que un sistema se denomine autónomo de energía deber tener los componentes que se detallan a continuación:

- Generadores de electricidad de carácter renovable.
- Baterías capaces de almacenar la energía captada por los generadores.
- Controladores o reguladores de carga, evitando un exceso en estas baterías.
- Un inversor, el cual transforma la energía almacenada en las baterías de corriente continua en corriente alterna. (Sector, 2012)

3.2.2. Ventajas

El mayor beneficio que representan este tipo de sistemas está dado por la reducción de consumos de energía que se evidencian, lo cual es beneficioso para el medio ambiente. A su vez, los costos de mantenimiento son menores y las emisiones contaminantes se reducen considerablemente.

3.2.3. Desventajas

La principal desventaja que cuentan estos sistemas es la ubicación, ya que requieren de un espacio físico acorde al diseño, factores ambientales y condiciones geográficas específicas al momento de su planificación y posterior construcción.

De igual forma, los materiales implicados en la construcción son un factor determinante al momento de pensar en este tipo de sistemas, ya que al ser de producción a menor escala los costos iniciales al momento de crear este tipo de proyectos son demasiado altos en comparación con un sistema tradicional. (Kosnik, 2010)

3.3. Industria

3.3.1. Ejemplos de industrias autosustentables en Ecuador

Las aplicaciones en la industria son innumerables ya que estos sistemas suministran energía suficiente para poder respaldar procesos industriales

En Ecuador, una de las empresas que utiliza este tipo de energía alternativa para la generación eléctrica es Vicunha. Esta empresa se dedica a la producción de tela denim en las líneas de rígido y stretch, además de tinturar y comercializar.

Vicunha utiliza aproximadamente el noventa por ciento de la energía eléctrica consumida en el proceso industrial consumida, ya que tiene una central hidroeléctrica interna que genera en promedio 4.5MW por hora, evitando una cantidad aproximada de 17.600 toneladas de CO₂ al año. (Vicunha, 2009)

3.3.2. Ventajas

Dentro del sector industrial, la reutilización de recursos como el agua, y usos de residuos para producir energía representa un cambio significativo al momento de evaluar el impacto ambiental que genera una empresa y de igual manera al momento de determinar su eficiencia energética. En varios países incluyendo en el Ecuador, existen incentivos por parte del estado para motivar al uso de energías alternativas como la solar, micro hidroeléctrica, geotérmica, entre otros.

En Ecuador, de acuerdo con la reforma de ley No. 86 consultada se afirma que las empresas que las instituciones que utilicen sistemas destinados a la utilización de energía solar, geotérmica, eólica, biomasa y otras con fines de investigación o producción de energía están exonerados del pago de derechos arancelarios y demás impuestos adicionales como importaciones de materiales para dichos sistemas (Ley de fomento de energías no convencionales, n.d.)

Esto representa un cambio importante para el uso de energías alternativas, tomando en cuenta que nuestro país dispone de recursos naturales bastos, además de factores geográficos y ambientales que favorecen la investigación y uso de estos medios de generación energética.

3.3.3. Desventajas

Entre las desventajas que se evidencian en sistemas energéticos renovables destaca el costo de instalación, ya que los materiales que se requieren no son de fácil disponibilidad, es decir, varios materiales indispensables para la construcción de estos sistemas requieren de elevados costos de transporte.

De igual forma, en la actualidad los sistemas renovables no suponen de una efectividad energética que puede hacer competencia directa a los combustibles fósiles, ya que desafortunadamente este tipo de tecnologías producen aproximadamente un tercio de la energía que teóricamente podría producirse. En el caso de la energía fotovoltaica se tiene una eficiencia de aproximadamente el 33%, la energía eólica entre el 40% y 50% mientras que los sistemas micro-hidráulicos tienen una eficiencia que bordea el 55%.

Otro factor determinante que limita la producción en masa de las energías renovables es la ubicación, ya que dependen de condiciones geográficas y ambientales muy específicas para que el sistema sea realmente productivo.

4. Tipo de Sistema Propuesto

4.1. Descripción General

El sistema de micro-generación hidroeléctrica fue presentado por la empresa Turbulent, situada en Bélgica. La empresa se dedica al diseño e instalación de plantas hidroeléctricas con alto nivel de eficiencia en canales de riego y ríos, pero con la característica de que tengan una caída relativamente baja (1-5m). (Turbulent, n.d.)

Su tecnología aprovecha el efecto “vortex” o vórtice, al igual que la energía cinética producida por el agua para mover la turbina tipo Kaplan y de esta manera generar electricidad, ya sea por un módulo o por varias turbinas colocadas en serie.

De igual forma, de acuerdo con la empresa el sistema tiene una eficiencia energética del 55% aproximadamente considerando pérdidas por fricción y la transformación de energía cinética en mecánica. Para tomar en cuenta este dato es importante considerar la Ley de Beltz, la cual dice que solo se puede convertir menos del 59% de la energía cinética en mecánica utilizando un generador, pero al momento de proponer la eficiencia de la empresa se asume que se está tomando como referencia esta ley, ya que los generadores tienen una eficiencia energética de aproximadamente del 95% variando a su calidad de construcción y por lo tanto, se puede tomar en cuenta que se está hablando del 95% en componentes como embobinado del generador del 59% de la eficiencia propuesta por Beltz.

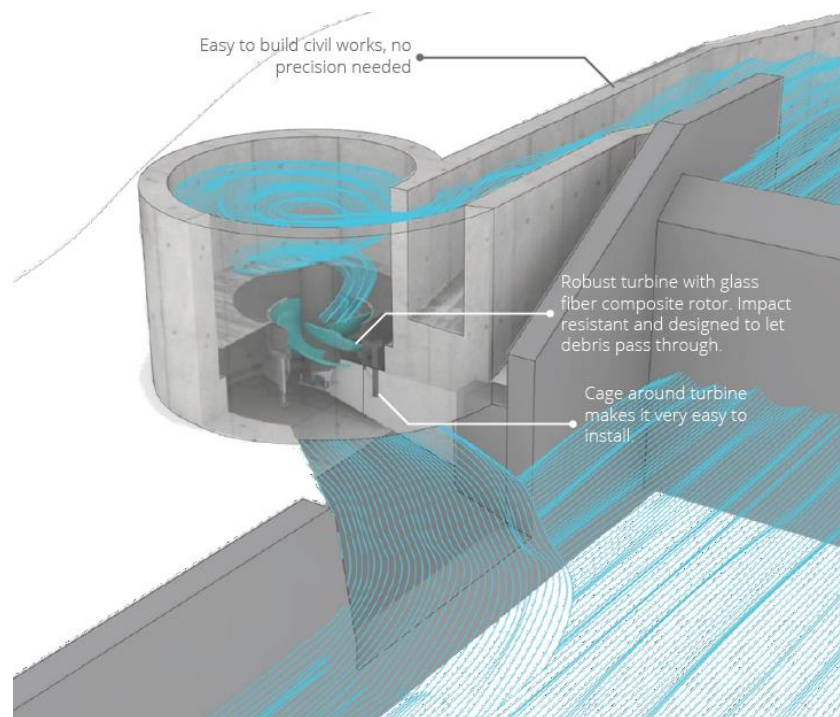


Figura 4 Sistema propuesto por la empresa Turbulent y analizado para la investigación

4.2. Ventajas

- 1) Bajo mantenimiento: Al ser un sistema modular, requiere componentes previamente ensamblados y sellados, por lo cual no requiere un mantenimiento constante y de esta manera se reducen los costos a futuro del sistema. De igual manera, no existe costos de operación por esta razón hace que este sistema no requiera gastos significativos durante su funcionamiento. (Kaunda et al., 2014)
- 2) En comparación con otro tipo de sistemas, una planta de micro-generación hidroeléctrica tiene los requerimientos necesarios para proveer energía a una comunidad rural, a una institución o se puede obtener beneficios industriales a pequeña escala. De acuerdo con la organización de desarrollo de las Naciones Unidas (UNIDO) la tecnología utilizada en este tipo de sistemas se considera la mejor opción *off-grid* para generación eléctrica. (Kaunda et al., 2014)
- 3) Fish Friendly: El impeller de baja revolución posee un diseño que genera un esfuerzo cortante mínimo y produce bajas presiones para no afectar a la vida marina.
- 4) Tiempo de vida de operación: La estructura civil está diseñada para tener una vida útil extensa, es decir, entre 10 y 20 años de operación. Esto varía de acuerdo con el ambiente al que está expuesto, a la calidad de construcción y al mantenimiento que se brinde.
- 5) Se considera una buena opción de energía renovable ya que el recurso energético utilizado es el agua, pero se la utiliza como parte de un ciclo hidrológico natural, por esta razón no produce un impacto ambiental significativo, adicionalmente no genera emisiones de gas perjudiciales, de esta manera también forman parte como un proceso de mitigación del cambio climático. (Kaunda et al., 2014)

- 6) En la actualidad existen varias opciones de elementos electrónicos y mecánicos que hacen de este sistema de bajo costo, ya que existen compuertas, controladores y turbinas en el mercado con opciones para todo tipo de proyectos.

4.3.Desventajas

- 1) A pesar de que los sistemas de micro-generación hidroeléctrica ya son una realidad en muchos países desarrollados sigue teniendo un desarrollo tecnológico menor a otro tipo de energías renovables como la eólica. Por esta razón en varios países en vías de desarrollo no existe una manufactura local capaz de producir las turbinas y otros componentes del sistema, por esta razón muchas de sus partes requieren ser importadas, esto retrasa el proceso de construcción e implementación y aumenta los costos. (Sultan, 2016)
- 2) Debido a que son este sistema es colocado en lugares específicos debió a los requerimientos de funcionamiento, se limita la capacidad de expansión al momento que aumente la demanda energética.
- 3) Como las plantas de micro-generación hidroeléctrica no poseen reservorio, la generación de electricidad depende en gran medida del caudal del río o canal de riego. En muchos lugares, el tamaño del flujo fluctuará según la temporada. Durante los meses de verano, probablemente habrá menos flujo y, por lo tanto, menos potencia de salida. Se requerirá una planificación e investigación avanzadas para garantizar que se cumplan los requisitos de energía adecuados de manera constante y de acuerdo con las necesidades de la comunidad o sector beneficiado.(Jawahar & Michael, 2017)
- 4) Los impactos ambientales deben ser tomados en cuenta. El impacto ecológico de las pequeñas centrales hidroeléctricas es mínimo; sin embargo, los efectos ambientales

de bajo nivel deben tenerse en cuenta antes de que comience la construcción. El agua de la corriente se desviará de una parte de la corriente, y se debe tener la precaución adecuada para garantizar que no haya un impacto perjudicial sobre la ecología local o la infraestructura civil cercana. (Kaunda et al., 2014)

- 5) Las plantas de micro-generación hidroeléctrica requieren ciertas condiciones específicas para su funcionamiento y, por lo tanto, no son adecuadas para cualquier ubicación. Por esta razón se tiene que tomar en cuenta la energía requerida, la diferencia de alturas, el caudal del río, las condiciones ambientales externas, los impactos ambientales, el sistema de almacenamiento energético, entre otros factores. (Turbulent, n.d.)

4.4. Tipos

El sistema de micro generación propuesto dispone de tres tipos de instalación que dependen del caudal y diferencia de altura, además de un previo análisis de factibilidad y terreno.

Como se observa en la figura 5, el primer sistema es una unidad simple que se caracteriza por tener la capacidad de generar de 15KW a 100KW y su dimensionamiento depende de varios factores como la caída de altura y el caudal principalmente, dependiendo de las condiciones disponibles cambia el modelo de construcción o los generadores eléctricos internos como se puede observar en la tabla 3.

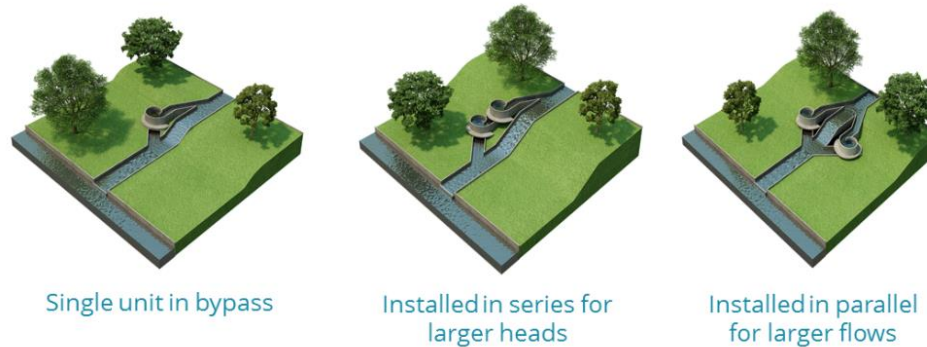


Figura 5 Tipos de sistemas micro-hidráulicos que dependen de las condiciones geográficas para su instalación

El segundo tipo de micro generador es instalado en paralelo, este caso se lo realiza cuando existe un caudal de aproximadamente $2 \text{ m}^3/\text{s}$ o superior, pero se tiene una diferencia de alturas (head) significativa, es decir, mayor a 4 metros.

El tercer tipo de micro generador es instalado en serie, se realiza este sistema al momento de disponer de un caudal de $6 \text{ m}^3/\text{s}$ o mayor, pero a su vez no se tiene una diferencia de alturas significativa, es decir, de aproximadamente 3 metros. (Turbulent, n.d.)

4.5. Especificaciones técnicas de la turbina

Al momento de realizar un proyecto se debe considerar anticipadamente un análisis de factibilidad, por esta razón es importante considerar que las turbinas que son instaladas en plantas hidroeléctricas dependen del sitio, el caudal y la diferencia de alturas con las que se va a trabajar. Existen dos clasificaciones para las turbinas utilizadas en generación energética micro-hidráulico: Turbinas por impulso y turbinas por reacción.

Una turbina hidráulica en la cual se convierte toda la energía del agua en energía cinética antes de que el agua alcance los alabes se denomina turbina por impulso, como es el caso de la turbina Francis, mientras que se denomina turbina por reacción a los sistemas en el cual al

momento chocar el caudal directamente con los alabes estos producen energía cinética, como es el caso de la turbina Kaplan. (Momin et al., 2017)

En este sistema se va a utilizar una turbina Kaplan ya que está diseñada para dimensiones relativamente pequeñas y una velocidad rotacional alta, de igual forma el generador que se requiere es pequeño y por consiguiente tiene un costo menor. Este diseño de turbina es recomendable para caídas horizontales (head) de 2 a 40 metros. (Abeykoon & Hantsch, 2017)

4.6.Potencia hidrocínética Teórica

La energía producida por un sistema micro-hidráulico depende netamente del caudal y la altura vertical (head) que produce mayor energía cinética junto con la gravedad para producir un torque mayor dentro de la turbina. Esta potencia está representada por la siguiente ecuación. (Pasalli & Rehiara, 2014). Las variables de la ecuación mostrada a continuación son detalladas al inicio del documento.

$$P_T = \rho g H Q$$

4.7.Potencia hidrocínética Real

La energía eléctrica producida por un sistema micro-hidráulico debe ser multiplicada por las eficiencias totales del sistema, incluyendo eficiencia de la compuerta (penstock), en el generador y en la turbina. Por consiguiente, el output de energía va a ser menor al teórico.(Pasalli & Rehiara, 2014)

En estos sistemas, la energía generada es calculada por la siguiente ecuación y su unidad es watts. De igual forma, en la ecuación se utiliza un porcentaje de eficiencia promedio que contiene a los parámetros mencionados anteriormente, el cual varía entre 50-

70%. Las variables de la ecuación mostrada a continuación son detalladas al inicio del documento.

$$P_g = \rho g H Q n_o$$

4.8. Análisis de caudal

4.8.1. Área de sección transversal

Para calcular el área de la sección transversal de un río o canal de riego se debe tomar medidas de altura a lo ancho del canal de estudio, pero que estas medidas deben ser equidistantes. De igual manera, para poder aumentar la precisión de estos se puede reducir la medidas a lo ancho del canal para generar un promedio con más medidas de altura, sin embargo, es recomendable hacer este estudio en varios puntos del canal para obtener varias áreas de sección transversal y realizar un promedio de éstas ya que en muchos casos los canales de riego o ríos tienen secciones más angostas que otras. (“Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica,” 2006)

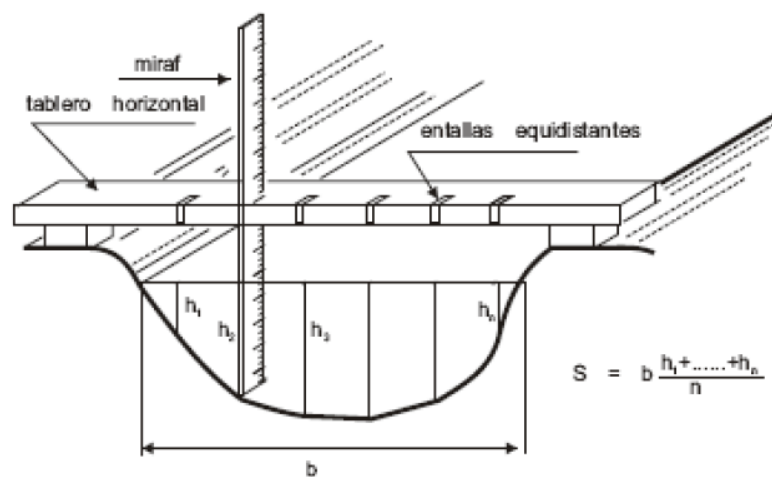


figura 3.4 sección transversal del cauce

Figura 6 Parámetros de medición para sección transversal de canal

Tomando las medidas correspondientes con la instrumentación que se recomienda en la figura a continuación se calcula el área de la sección transversal del cauce por medio de la siguiente ecuación. Las variables de la ecuación mostrada a continuación son detalladas al inicio del documento.

$$A_T = b \left(\frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n} \right)$$

4.8.2. Velocidad media del fluido

La velocidad de la corriente varía a lo largo del caudal de manera horizontal y vertical, por esta razón existen diferentes métodos para poder obtener una velocidad promedio, entre los métodos más conocidos se encuentra el método con flotador y el método con molinete. En esta investigación se utilizó el método de flotador.

El método con flotador consiste en colocar un objeto que sea flotante y no muy ligero -como un pedazo de madera o una botella medio vacía – en el centro de la corriente y soltarlo. Se debe medir el tiempo (en segundos) que necesita para recorrer una longitud (en metros). La velocidad superficial se encontrará por medio de la siguiente ecuación. Las variables de la ecuación mostrada a continuación son detalladas al inicio del documento.

$$V_m = \frac{\textit{longitud recorrida (m)}}{\textit{tiempo (s)}}$$

Para estimar la velocidad media se requiere multiplicar la velocidad superficial por un coeficiente que varía entre 0.60 y 0.85, que depende de la profundidad del curso del agua y también de la rugosidad del fondo y paredes, por esta razón lo recomendable es utilizar un

valor promedio de 0.75. (“Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica,” 2006)

4.9. Caudal entrante

Una vez obtenida la velocidad media del canal de riego y su área transversal es necesario establecer una relación que indique el flujo volumétrico de agua que circula a través del área de estudio el cual se denomina caudal y está determinado por la siguiente expresión. Las variables de la ecuación mostrada a continuación son detalladas al inicio del documento.

$$Q = A_T * V_m$$

4.10. Número de Reynold

Se define al número de Reynolds como una medida de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en un fluido. Este número es un valor adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido de acuerdo con su clasificación: laminar, transitorio y turbulento. (Gerhart, Gerhart, & Hochstein, n.d.) La ecuación descrita para calcular este valor considera el diámetro efectivo del sistema, la velocidad del fluido y la viscosidad cinemática del agua como se muestra a continuación. Las variables de la ecuación mostrada a continuación son detalladas al inicio del documento.

$$Re = \frac{D_{efetivo} * V_{fluido}}{\nu}$$

Una vez analizada esta ecuación basándose en los datos de nuestro sistema, se concluye que el mismo tiene flujo turbulento.

5. Métodos

5.1. Dimensionamiento

Para realizar el dimensionamiento del sistema se consideró los datos proporcionados por la empresa Turbulent, estas especificaciones se considera el caudal y el head promedio como parámetros principales, en base a esto se proporciona unas medidas de diámetros (interior y exterior) además de medidas de altura de la base, del perfil de entrada y salida por donde va a recorrer el caudal, entre otras.

Estas especificaciones son encontradas en la tabla 3 y son dimensionadas tomando en cuenta la figura 7 en donde se presenta las medidas de referencia y variables que corresponden a los valores de la tabla 3 mencionada anteriormente.

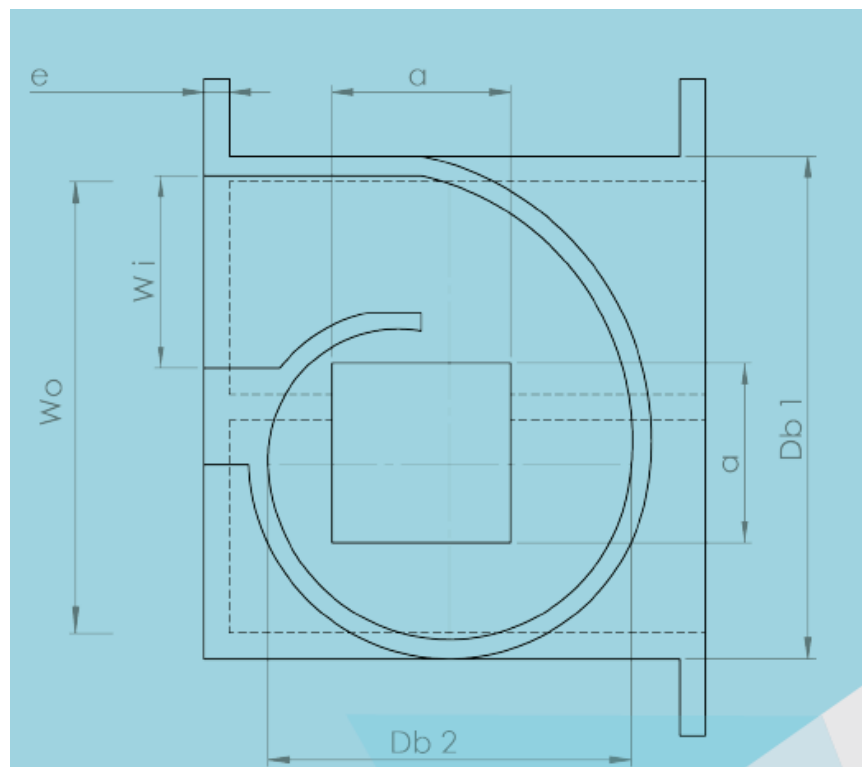


Figura 7 Medidas referenciales sugeridas por la empresa Turbulent para dimensionamiento – Vista Superior

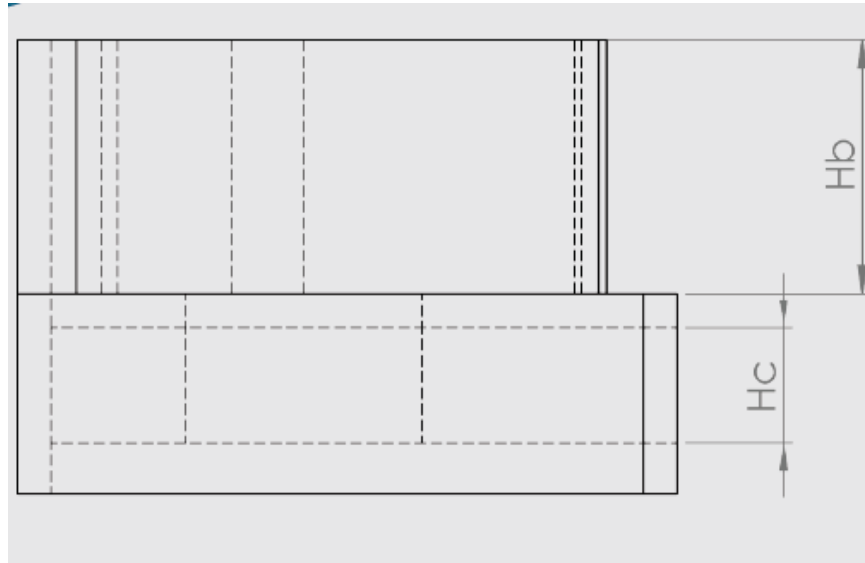


Figura 8 Medidas referenciales sugeridas por la empresa Turbulent para dimensionamiento – Vista Lateral

| DETAILED SPECIFICATIONS | | | | | |
|--|--|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|
| | Model 15KW | Model 30KW | Model 45KW | Model 60KW | Model 75KW |
| Head (m) | 1.5-2 | 1.5-3 | 1.5-3 | 2-3 | 2-3.5 |
| Flow (m³/s) | 1.4-1.85 | 1.85-3.7 | 2.8-5.6 | 3.7-5.6 | 4-7 |
| Generator electrical power (KVA) | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 |
| Turbine Pit width a | 1.5 | 2.15 | 2.25 | 2.25 | 2.5 |
| Basin shape | Semicircular Spiral | | | | |
| Max basin diameter Db1 (m) | 3.8 | 5.5 | 6 | 6.5 | 7 |
| Max basin diameter Db2 (m) | ... | ... | ... | ... | ... |
| Basin Height Hb (m) | Head - 0.6 | Head - 0.7 | Head - 0.8 | Head - 0.9 | Head - 1 |
| Outflow Height Hc (m) | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1 | 1.3 |
| Dimensions of the core unit being shipped | 1.5x1.5x1 | 2.15x2.15x 1.2 | 2.25x2.25x 1.4 | 2.25x2.2 5x1.5 | 2.5x2.5x 1.8 |
| Type of generator | 3 phase submersible water-cooled induction generator | | | 3 phase submersible water-cooled induction generator OR PM generator | |
| Gear Ratio | 16.2 (or customizable) | | | 16.2 or direct drive | |
| Generator rated voltage | 380V Y + 5% (IEC 60034-1) | | | | |

| | | | | | |
|----------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|
| Generator rated frequency | 50Hz + 2% (IEC 60034-1) | | | | |
| Type of control | Speed control, maximum power point tracking | | | | |
| Wi | 1.5 | 2.3 | 2.5 | 2.5 | 2.2 |
| Wo | 3.6 | 5.5 | 5.8 | 6.0 | 5.2 |

Tabla 3 Especificaciones Técnicas para dimensionamiento del sistema proporcionado por la empresa Turbulent.be

5.2. Diseño 3D

Al momento de realizar el diseño 3D se dividió al sistema en tres partes principales (turbina, obra civil, estructura metálica). Cada parte fue modelada y dimensionada en el software SolidWorks 2017. La disposición geométrica que tiene, como se puede ver en las figuras 8 y 9 no es completamente circular, ya que tiene forma espiral con la finalidad de aumentar la energía cinética que posee el caudal y redirigirla al centro del sistema donde se encuentra la turbina aumentando así su potencial para generar electricidad.

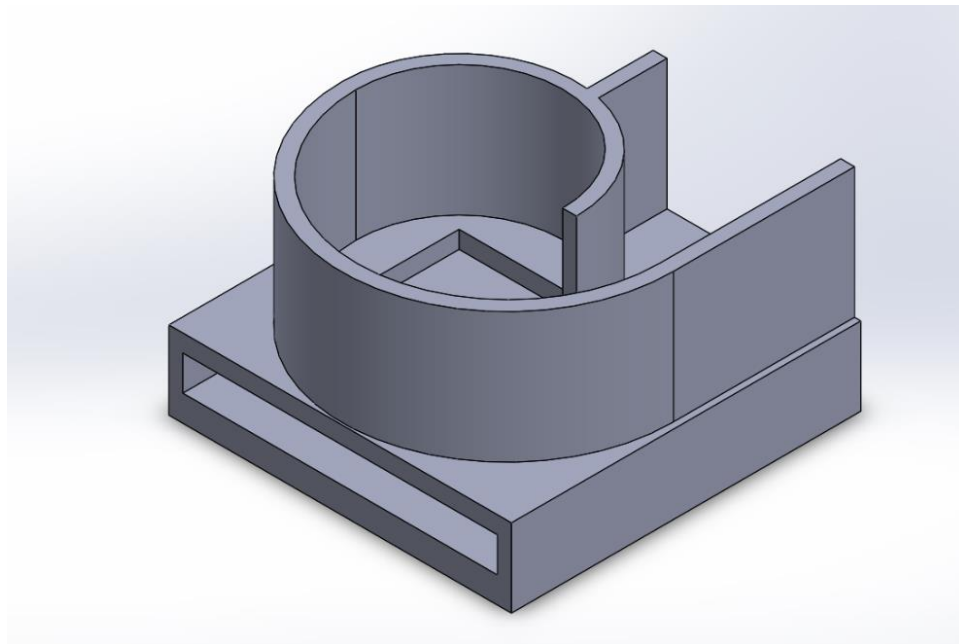


Figura 9 Vista Isométrica de Obra Civil

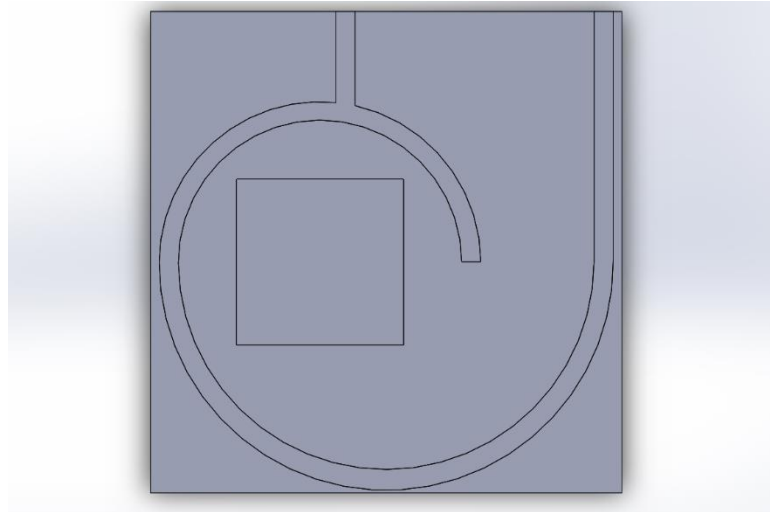


Figura 10 Vista Superior de Obra civil del sistema

La estructura metálica es la segunda pieza que se modeló para el análisis CFD, esta estructura metálica brinda soporte a la turbina Kaplan y ayuda al flujo entrante de agua a ser expulsado por ahí, esto es importante considerar ya que vuelve al análisis computacional más exacto y se consideran pérdidas cinéticas por fricción lo cual nos beneficia para obtener resultados que se aproximen de manera significativa a la realidad. Esta estructura puede ser observada en la figura 9.

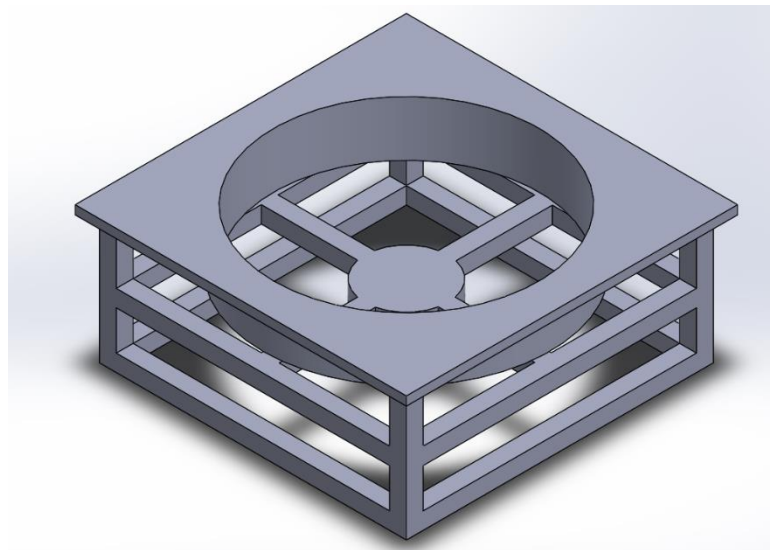


Figura 11 Estructura mecánica de soporte para turbina Kaplan

La tercera pieza de la simulación es la turbina tipo Kaplan, esta pieza fue realizada tomando en cuenta muestras y medidas desarrollada por la empresa Turbulent. La importancia de esta pieza consiste en que permite analizar y visualizar como interactúa directamente el fluido con la turbina, de esta manera se puede obtener datos de velocidad, presión, temperatura y esfuerzos realizados en el perfil de los álabes. Por medio de estos datos se puede llegar a una conclusión real del funcionamiento de la turbina y de la potencia que puede generar la misma. El modelado 3D es visualizado en la figura 10.

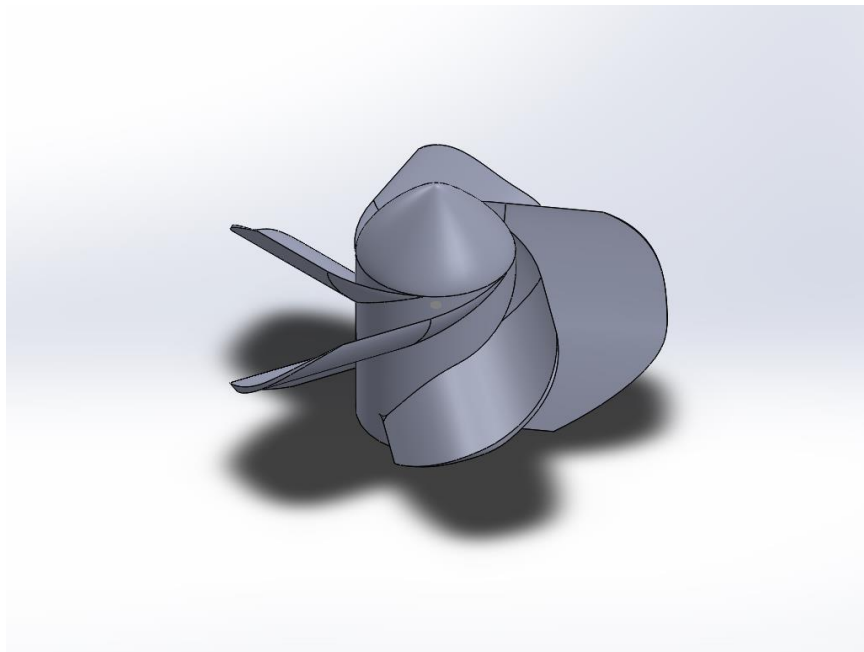


Figura 12 Turbina tipo Kaplan utilizada para la simulación de fluidos

5.3.Ensamblaje

En el momento de realizar el ensamblaje se consideró las tres partes mencionadas anteriormente (turbina, obra civil, estructura metálica). El ensamblaje se realizó en el

software SolidWorks 2017 y sus partes están colocadas de acuerdo con las especificaciones de la empresa Turbulent.

La operación de ensamblaje es realizada para tener un modelo computacional con valores aproximados a la realidad y de esta manera obtener datos que demuestren el correcto funcionamiento de la turbina en las condiciones del caso de estudio propuesto. Después de haber realizado el ensamblaje fue necesario comprobar que sea completamente hermético para poder realizar la simulación con fluidos. El ensamblaje final se muestra en las figuras a continuación (figura 11 - figura 12) y la comprobación de geometría para fluidos se muestra en la figura 13.

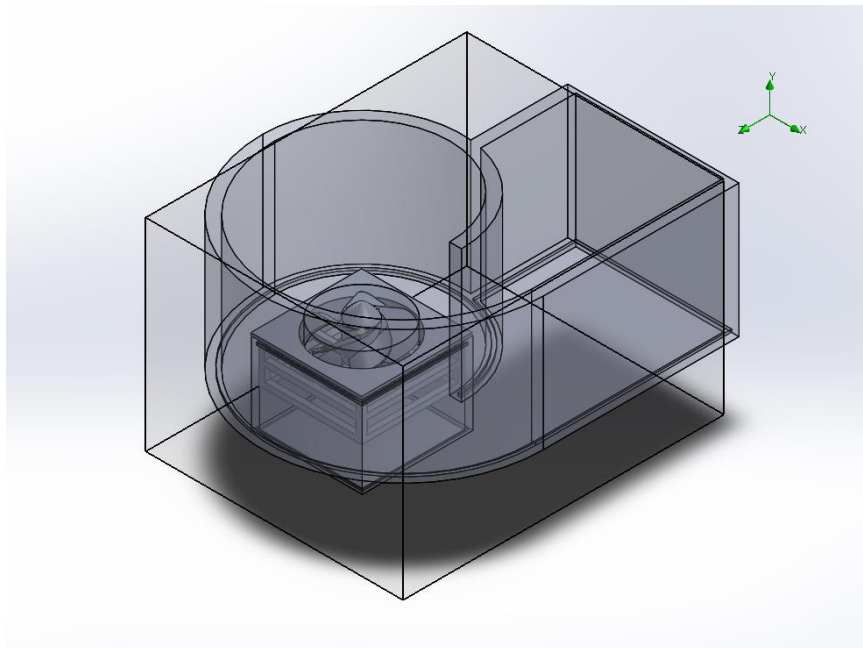


Figura 13 Vista isométrica del ensamblaje del sistema en donde se muestran las tres piezas juntas

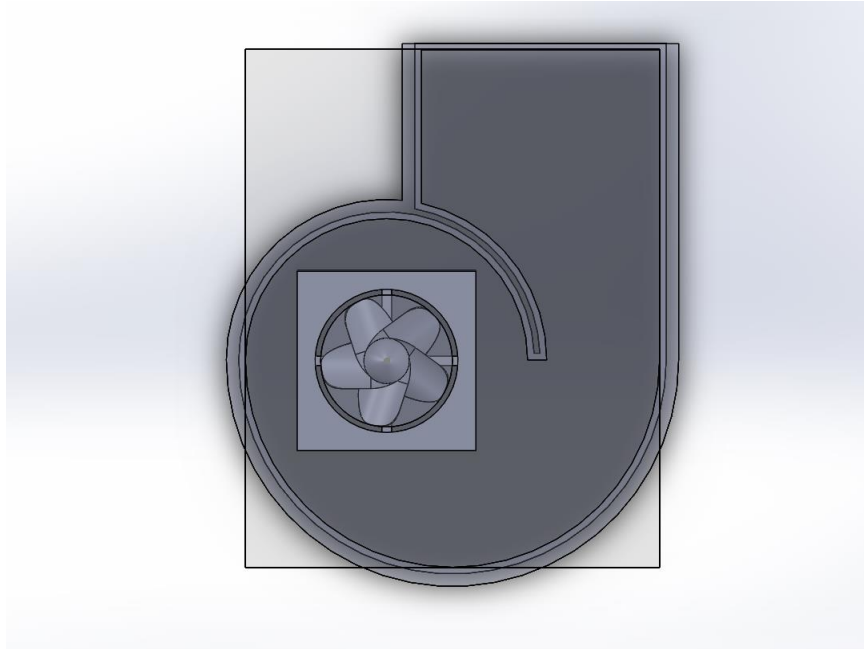


Figura 14 Vista superior de ensamble considerando las tres partes principales (Estructura metálica, obra civil y turbina Kaplan)

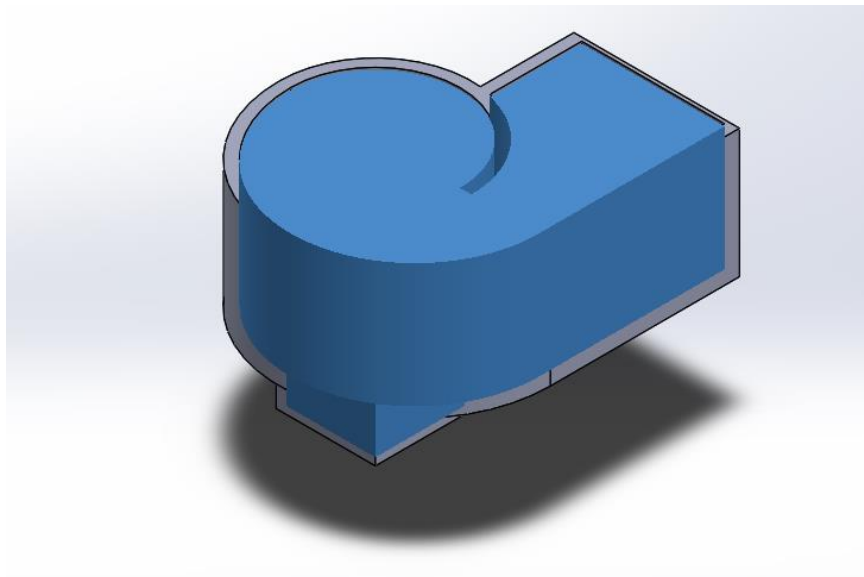


Figura 15 Comprobación de geometría para análisis de fluidos para comprobar hermeticidad del sistema

5.4.Simulación CFD en SolidWorks

5.4.1. Análisis CFD

El proceso CFD (Computer Fluid Dynamics) es una rama de la mecánica de fluidos en la cual se utiliza el análisis numérico y estructura de datos para resolver problemas que involucran fluidos que resultan complejos para realizarlos analíticamente ya que poseen un gran número de variables y de información. Por medio de este proceso se simula la interacción del fluid y la estructura del sistema tomando considerando condiciones de borde para a su vez, arrojar datos que sirven para un análisis definitivo del sistema propuesto. (Simulation, 2017)

El proceso consiste en generar un modelo CAD (Computer Aided Design) con las dimensiones requeridas por el sistema en la realidad y posteriormente exportar ese diseño a un simulador CFD que en este caso de estudio es de igual forma SolidWorks 2017. Una vez exportado el diseño se realiza un volumen de control en el cual se va a analizar el comportamiento del fluido y su interacción con el sistema.

5.4.2. Mallado

Se denomina mallado al proceso de subdividir una pieza o un ensamblaje en elementos pequeños conectados entre sí por nodos, esto permite analizar los elementos y generar ecuaciones en cada una de las celdas generadas para poder hallar las variables propuestas en las condiciones iniciales del sistema. Es decir, la malla es el grado de aproximación que tiene el modelo generado con la realidad, de manera que entre más densa sea la malla, menor será el error generado por la computadora.

La discretización del modelo se determina por las especificaciones de las condiciones de borde, la geometría del elemento a analizar, del volumen de control y de las variables de entrada y salida que se requieren determinar. (Simulation, 2017)

5.4.3. Simulación Dinámica

La simulación dinámica provee información que se aproxima a la potencia generada real del sistema de micro-generación hidroeléctrica. En esta simulación de igual manera se establece un volumen de control global y local, el volumen de control global se genera alrededor de la turbina. En este volumen de control local se realiza un mallado más fino y se proporciona una velocidad angular que es de 9.42 rad/s, el mallado más fino sirve para concentrar la recopilación de información en dicho sector de interés. (Martinez et al., 2019)

Al proporcionar una velocidad angular al sector de la turbina del sistema se generan resultados en donde se considera el contacto rotatorio con la geometría de los álabes para establecer un torque dinámico, con el cual, posteriormente se obtiene la potencia generada por el sistema.

5.4.4. Parámetros de simulación dinámica

Los parámetros que se toman en cuenta en la simulación dinámica consideran la temperatura del fluido, el caudal y la presión atmosférica, sin embargo, lo que cambia es el volumen de control y el mallado. En el mallado se analizó con varios refinamientos, desde el más fino al más denso con el fin de buscar una estabilización en los resultados y de esta manera concluir que el torque obtenido sea confiable. Estos parámetros son presentados en la tabla 4.

| Parámetros de Simulación Dinámica | |
|--|------------------|
| Parámetros | Dimensión |
| Velocidad del fluido | 0.6 |
| Caudal | 2.5 |
| Temperatura del Fluido (K) | 293.2 |
| Presión del Fluido (Pa) | 101325 |
| Nivel de Refinamiento de mallado | 1-7 |
| Velocidad Angular (rad/s) | 9.42 |
| Dominio computacional eje x max (m) | 1.7088 |
| Dominio computacional eje x min (m) | 1.7761 |
| Dominio computacional eje y max (m) | 1.2456 |
| Dominio computacional eje y min (m) | 1.496 |
| Dominio computacional eje z max (m) | 6.6762 |
| Dominio computacional eje z min (m) | 2.3285 |

Tabla 4 Parámetros de Simulación Dinámica utilizados en SolidWorks 2017

5.4.5. Análisis de velocidad angular

Uno de los problemas presentados en el desarrollo de la simulación por CFD fue obtener la velocidad angular del eje de la turbina tipo Kaplan ya que no existía bibliografía específica para este sistema y solo se consideraban datos proporcionados por la empresa Turbulent. Sin embargo, se encontró una ecuación que relaciona la velocidad específica (*specific speed*) con otros parámetros conocidos como el caudal, la gravedad, la velocidad angular y la diferencia de alturas (*head*). (Korpela, n.d.) Las variables de la ecuación mostrada a continuación son detalladas al inicio del documento.

$$\Omega = \frac{\Omega_s (g * H)^{3/4}}{Q^{1/2}}$$

La velocidad específica (*specific speed*) fue tomada de la del documento realizado por (Abeykoon & Hantsch, 2017) la cual tiene un valor de 1.6 y este dato representado en la figura 14 se comprueba con los parámetros de la tabla 10.1 de (Korpela, n.d.). Una vez realizado el análisis dimensional de esta ecuación y reemplazando los datos de acuerdo con el sistema propuesto se obtiene que la velocidad angular es de 9.42 rad/s.

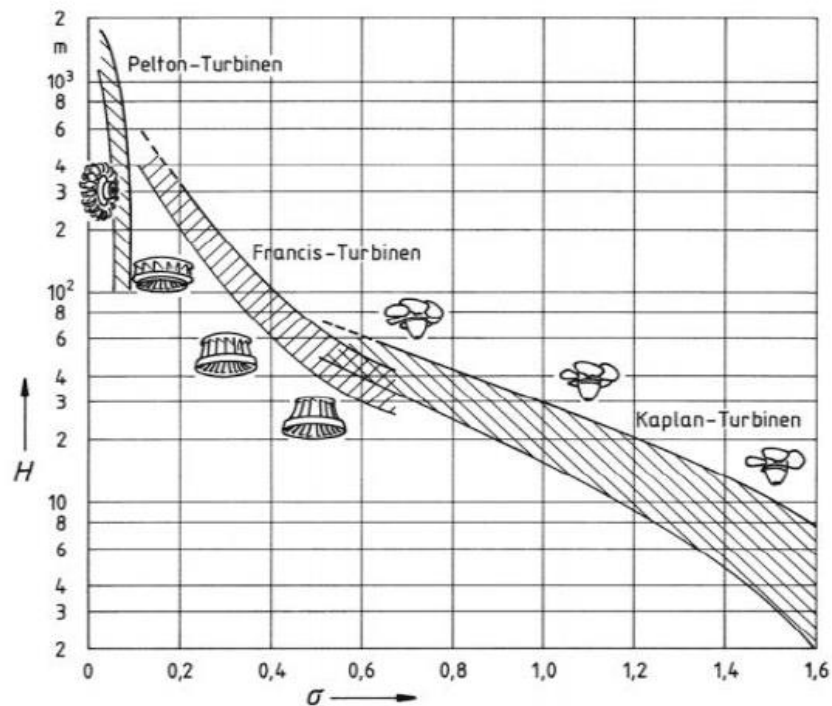


Figura 16 Velocidad específica en función del head tomada del libro de Turbomaquinaria de Abeykoon 2017

5.5. Análisis de Simulación

Una vez obtenida una velocidad angular de manera teórica se utilizó la misma en el software para la simulación dinámica y entre los datos obtenidos se destacan las velocidades promedio, las fuerzas normales y los torques producidos en todos los ejes de referencia. Para el posterior análisis de este sistema se tomó como referencia el torque en el *eje* y ya que es el eje en el cual gira el impeller y al cual se dio la característica de rotación. La ecuación que

se utilizó para encontrar la potencia generada es la siguiente (Gerhart et al., n.d.). Las variables de la ecuación mostrada a continuación son detalladas al inicio del documento.

$$P = \omega * T$$

Gracias a la simulación realizada al sistema por CFD, se obtuvo un torque de 2332.83 (N*m). Y al reemplazar en la ecuación de potencia junto con la velocidad angular que es de 9.42 rad/s se obtiene una potencia generada de 21 kW.

Dentro de los otros parámetros establecidos para el sistema, destaca la velocidad promedio. Esta velocidad promedio no puede ser especificada en un sector puntual ya que se analizó tomando en un volumen de control, sin embargo, como se muestra en las figuras 15, 16 y 17 se puede observar como en el volumen cercano al impeler la energía cinética con la que entra el agua y la geometría desarrollada ayudan a que la velocidad promedio aumente de manera significativa respecto a la velocidad inicial que tiene el agua antes de ingresar al sistema. En esta figura se muestra con color rojo las secciones en donde la velocidad se encuentra en su punto máximo en una escala de 0.6 m/s que es la inicial y un punto máximo de 2 m/s.

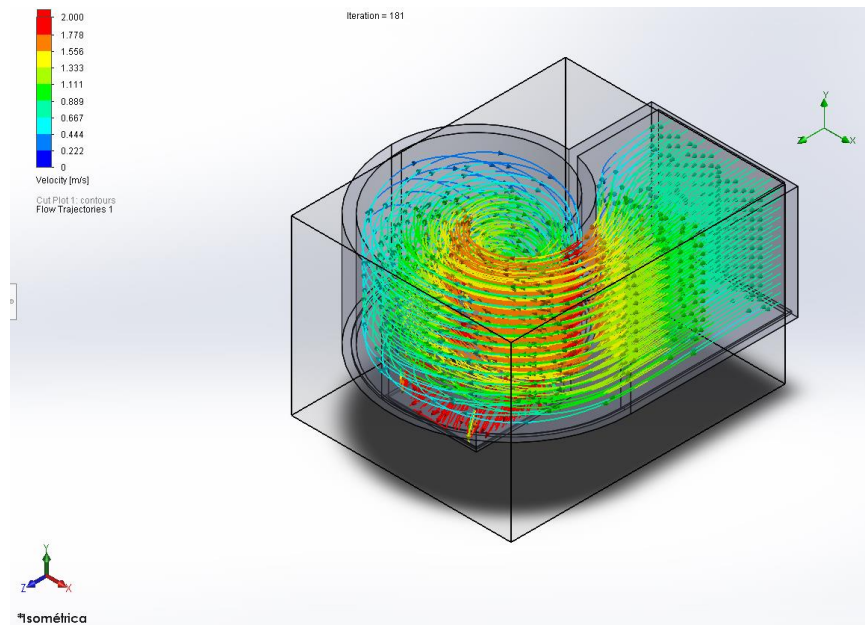


Figura 17 Vista Isométrica de la simulación CFD – Se muestra el aumento de energía cinética en el diámetro externo de la turbina

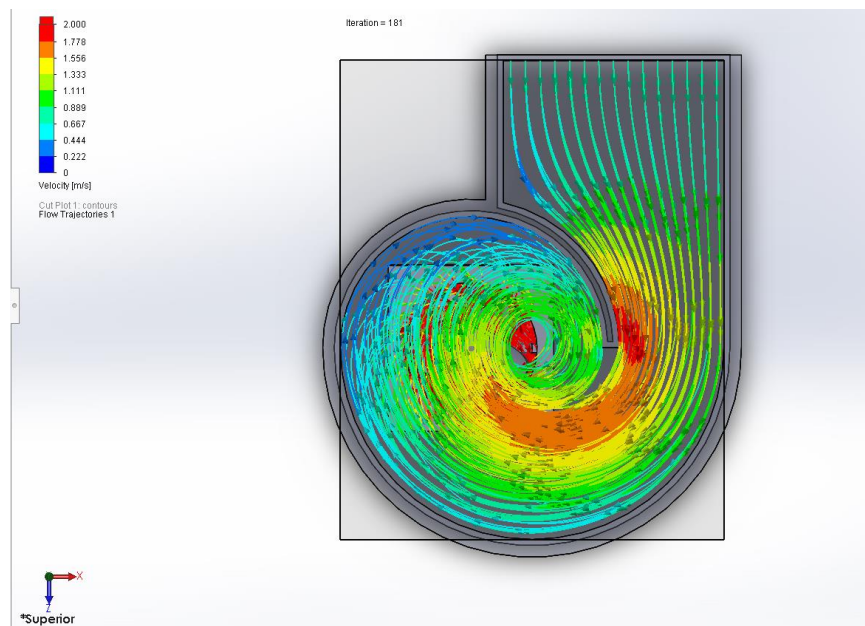


Figura 18 Vista Superior de la simulación CFD

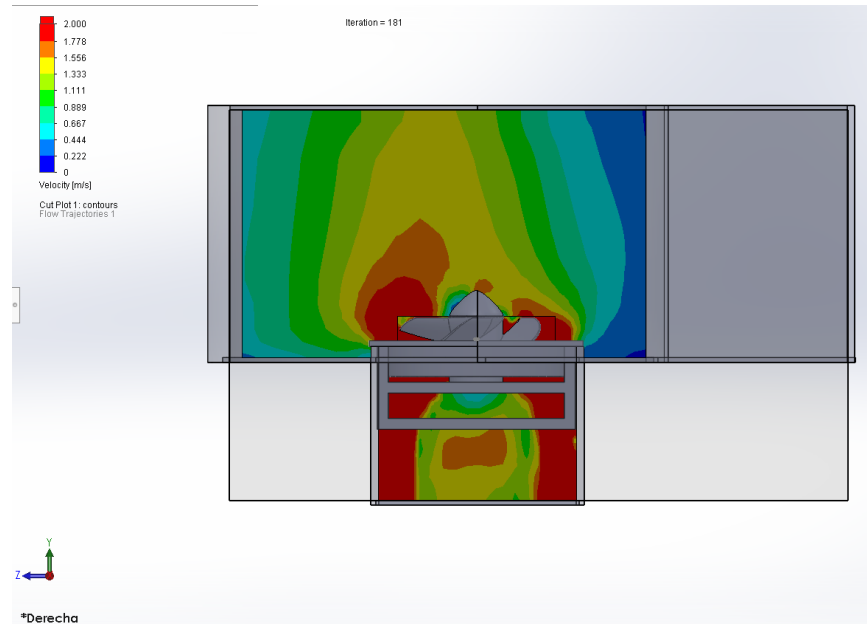


Figura 19 CutPlot de la vista lateral de la simulación por CFD - Se muestra el aumento de energía cinética en el diámetro externo de la turbina

6. Proceso de Manufactura

6.1. Diseño de proceso

La selección de procesos es una decisión estratégica que involucra que tipo de procesos de producción se debe considerar en un proyecto. Esto involucra decisiones en campos tales como recursos humanos, materiales, equipos y tecnología, entre otros.

Al ser una serie de decisiones estratégicas se debe tomar en cuenta varias prioridades competitivas como costo, calidad, flexibilidad y tiempo con el fin de establecer un proceso que permita responder rápidamente ante cualquier contratiempo. (Carro & González, n.d.)

Este tipo de diseño de procesos usualmente se toman en cuenta en los siguientes casos:

- Cuando hay modificaciones importantes en el producto
- Cuando existen problemas de calidad.

- Cuando hay cambios importantes en los insumos o su disponibilidad ha variado de manera relevante.
- Cuando hay cambios de las prioridades competitivas.

A pesar de que esta metodología se utiliza en el ámbito industrial con el fin de mejorar la eficiencia general de una planta, se debe considerar como punto de referencia para mantener un orden y coherencia en el proceso de construcción del sistema planteado ya que en él se involucran varios factores como importaciones, mano de obra, tiempos y costos.

6.2. Diagrama de diseño de procesos para el sistema de micro-generación hidroeléctrica

Este diagrama se encuentra adjunto en el Anexo M, en el cual se detallan los procesos para la toma de datos, instalación, funcionamiento y posterior mantenimiento del sistema.

6.3. Elementos mecánicos

En el momento de la construcción es difícil estimar que tipo de elementos mecánicos se va a tomar en cuenta (pernos, tornillos, entre otros) sin embargo, para simplificar el proceso de análisis se va a tomar en cuenta los dos grandes componentes que se especificaron al momento de realizar el análisis CFD que son, la turbina tipo Kaplan y la estructura metálica que lo sostiene.

6.3.1. Turbina Kaplan

La mayor parte de componentes involucrados en una turbina Kaplan son generalmente de acero inoxidable ya que la mayor parte de tiempo van a estar en contacto con agua y son altamente propensas a desgaste y falla por corrosión. De igual forma, el acero inoxidable es un material que posee buenas características para soldadura, buena resistencia a la flexión y

es altamente maquinable. A pesar de esto existen materiales específicos recomendados para cada parte involucrada en la construcción de la turbina como se muestra en la tabla 5 a continuación, además de las razones por las cuales se debe utilizar esos materiales. (Momin et al., 2017) El plano se encuentra adjunto en el Anexo C.

| Componente | Material | Descripción |
|-------------------|-----------------|--|
| Hub | X04Cr19Ni9 | Para el Hub se requiere un material que sea fácilmente soldable ya que tiene unión con el eje de la turbina. |
| Blade | 16Cr5Ni | Este material debe tener una alta resistencia ante la flexión y corrosión. |
| Pivot | X20Cr13 | Este material debe ser acero inoxidable con alta capacidad de maquinado. |
| Lever | X20Cr13 | Debe ser resistente a la corrosión a pesar de su maquinado por fresado. |
| Link | 16Cr5Ni | El material debe ser resistente completamente a la corrosión |
| Crosshead | X20Cr13 | Debe tener buena capacidad de maquinado y para soldadura. |

Tabla 5 Materiales sugeridos para partes de turbina Kaplan

6.3.2. Estructura Metálica

La estructura metálica es el soporte que mantiene a la turbina Kaplan fija en el centro de rotación previsto para el sistema, este componente es importante ya que ayuda a desfogar el agua que ingresa y de igual manera a que la turbina tenga una estabilidad adecuada para su funcionamiento. El plano se encuentra adjunto en el Anexo D.

6.4.Obra Civil

6.4.1. Materiales

Los materiales que se prevén utilizar en la obra civil fueron obtenidos por el software de precios unitarios ProExcel 2018 y se detallan en la tabla adjunta en el Anexo H.

6.4.2. Plano estructural

El plano estructural fue realizado en el software SolidWorks 2017 y las medidas de este fueron tomadas de la tabla 3 de acuerdo con las especificaciones de la empresa y a las características físicas y geográficas del sector de estudio. El plano se encuentra adjunto en el Anexo B.

6.5.Plano de Ensamblaje

El plano de ensamblaje presenta una visión general del dispositivo que se requiere construir, de tal manera que se pueda ver la situación de las distintas piezas que lo componen, la relación y concordancia entre ellas. La principal función de este tipo de planos es hacer posible el montaje. El plano se encuentra adjunto en el Anexo A.

6.6.Estudio de Factibilidad

6.6.1. Análisis Tecno económico

El análisis tecno económico se realiza con el fin de establecer costos al sistema propuesto tomando en cuenta los componentes mecánicos, además de aspectos técnicos y el fin que va a tener. Es decir, por medio de este análisis se establecen parámetros que nos permitan definir si el proyecto está destinado a un fin social, industrial o doméstico ya que todo depende del costo que va a tener el mismo.

6.6.2. Análisis Energético

Para realizar el análisis energético se considera las especificaciones técnicas que proporciona la empresa Turbulent para el dimensionamiento del sistema y considerar que modelo se utiliza, estas especificaciones se muestran en la tabla 3. En la tabla 7 se detalla la potencia que se genera se acuerdo al caudal y a la diferencia de alturas. El caso de estudio del sistema propuesto tiene un caudal de $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ y un head de 2m, por lo tanto, tomando en cuenta la ecuación de potencia hidroeléctrica real y con los datos mostrados en la tabla 6 se obtiene que la potencia generada es de aproximadamente 26 kW.

| DATOS GENERALES | |
|-------------------------------------|-------|
| DENSIDAD (kg/m^3) | 1000 |
| Gravedad (m/s^2) | 9.8 |
| EFICIENCIA (%) | 0.55 |
| Consumo Pico (kW) | 3.725 |

Tabla 6 Datos Generales para cálculo de potencia hidroeléctrica real

| CAUDAL (m^3/s) | HEAD (m) | POTENCIA GENERADA (W) | POTENCIA GENERADA (kW) | Potencia Máxima (kW) | Factor de Carga | Número de Hogares Suministrados |
|----------------------------------|----------|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------------|---------------------------------|
| 1.4 | 1.5 | 11319 | 11.32 | 15 | 0.75460 | 3.04 |
| 1.5 | 1.75 | 14148.75 | 14.15 | 15 | 0.94325 | 3.80 |
| 1.85 | 2 | 19943 | 19.94 | 30 | 0.66477 | 5.35 |
| 1.91 | 2 | 20589.8 | 20.6 | 30 | 0.68633 | 5.53 |
| 2 | 2 | 21560 | 21.56 | 30 | 0.71867 | 5.79 |
| 2.5 | 2 | 26950 | 26.95 | 30 | 0.89833 | 7.23 |
| 2.8 | 2.5 | 37730 | 37.73 | 30 | 1.25767 | 10.13 |
| 3.1 | 2.5 | 41772.5 | 41.773 | 30 | 1.39242 | 11.21 |
| 4.2 | 2.75 | 62254.5 | 62.25 | 45 | 1.38343 | 16.71 |
| 5.6 | 3 | 90552 | 90.55 | 45 | 2.01227 | 24.31 |
| 6.3 | 3.25 | 110360.25 | 110.36 | 75 | 1.47147 | 29.63 |
| 7 | 3.5 | 132055 | 132.06 | 75 | 1.76073 | 35.45 |

Tabla 7 Potencia Generada del sistema con turbina Kaplan

6.6.3. Estimación de costo

Para poder realizar un presupuesto general del sistema propuesto se utilizó un software para análisis de precios unitarios que sirve como marco de referencia en el Instituto Nacional de Contratación Pública (INCOP) en el país llamado ProExcel 2018. Este software permite realizar una planificación previa al proyecto para analizar que herramientas, sectores técnicos y personal se involucra.

En el caso de este proyecto se dividió al sistema en tres unidades básicas, la primera es la turbina, la segunda es los componentes mecánicos y la tercera es la obra civil, a esto se le denominó M1, M2 y M3 respectivamente como se puede observar en el Anexo G. Por medio de esta estimación de costos se obtuvo que el sistema final tiene un valor de 7,817.68 USD.

Este es el precio de instalación que se va a utilizar en la comparación del sistema con la energía eléctrica suministrada por el estado ecuatoriano, sin embargo, también se debe añadir un costo de cableado adicional para realizar las conexiones eléctricas en varias viviendas.

Al momento de realizar el análisis de costos se consideró en los componentes mecánicos a la turbina pero incluido un factor de locación, este factor es de 1.7 y se multiplica al precio que se tiene de referencia por el proveedor para poder considerar tácitamente costos de importaciones. (Albright, n.d.) Sin embargo, lo recomendable es utilizar valores exactos que se utilizan en la aduana de Ecuador, pero esto varía de acuerdo con las dimensiones costos estimados, tiempo de entrega, entre otros. Para poder obtener estos valores se consideran dos conceptos importantes, *Cost, Insurance, and Freight* (CIF) y *Free On Board* (FOB) los cuales son acuerdos internacionales utilizados en el transporte de mercancías entre un comprador un vendedor. Se encuentran dentro de los términos de comercio internacional establecidos por la Cámara de Comercio Internacional (ICC). CIF y FOB se diferencian

principalmente por quién es el responsable de las mercancías durante el tránsito, en los acuerdos CIF, el vendedor asume los seguros y otros costos, con la responsabilidad y los costos asociados por el tránsito pagado por el comprador. Estos valores son diferentes de acuerdo a cada producto y por esta razón se debe realizar una cotización mucho más formal con la empresa proveedora de la turbina para tener valores exactos y a su vez coordinar que tipo de medidas se requieran tomar al momento de la importación.

6.6.4. Costo Nivelado de Energía

El costo nivelado de la energía o por sus siglas en inglés LCOE (*Levelized Cost of Energy*) es una medida de una fuente de energía que permite la comparación de diferentes métodos de generación de electricidad de manera constante. Es una evaluación económica del costo total promedio para construir y operar un activo generador de energía durante su vida útil dividido por la producción total de energía del activo durante esa vida. El costo nivelado de energía también puede considerarse como el precio mínimo promedio al que se debe vender la electricidad para compensar la vida útil del proyecto. (Albright, n.d.)

En el análisis del LCOE se toman en cuenta factores como el tiempo de retorno de inversión del proyecto el cual en este caso se considera diez años, un valor de rescate estimado, costos operativos, costos del capital inicial y tasa de interés. La tasa de interés se toma en cuenta como si fuera un préstamo ya que muchas comunidades no tienen el capital suficiente como para invertir en este tipo de proyectos de manera inmediata y por medio de un análisis comparativo y sondeo general dentro de varias instituciones financieras se logró obtener la tasa de interés más baja del mercado ecuatoriano para proyectos de carácter renovable, la cual es de 7.5% en la Corporación Financiera Nacional (CFN), por lo tanto,

este fue el valor que se utilizó en el análisis económico del sistema de micro generación hidroeléctrica propuesto como se puede observar en la Tabla 8.

6.6.5. Mantenimiento

El mantenimiento de la turbina y sus diferentes instalaciones se clasifica en tres grupos principales:

1. OBRA CIVIL

Es recomendable realizar una inspección de la obra civil en lo relacionado a las paredes o muros de hormigón en donde está colocada la turbina. La inspección será visual verificando principalmente si existen fisuras de sus paredes debido a la vibración permanente producida por la turbina.

Otro factor importante es la impermeabilidad de las paredes, es decir que no exista filtraciones de agua y por último, que no exista desprendimientos del hormigón debido a la fricción del agua sobre las paredes que reciben los golpes y fricciones del agua sobre ellas.

Personal Técnico / Costo:

- Técnico en Obras Civiles: 1u x 150.00 = 150.00 USD
- Ayudante de Obra: 1u x 30.00 = 30.00 USD

La inspección se recomienda hacerlo una (1) vez al año y lo llevara no más de una jornada de trabajo. El personal técnico deberá utilizar herramienta básica como escalera, bailejo, punta, combo, paleta.

2. ESTRUCTURA METÁLICA DE SOPORTE

La estructura metálica que soporta la turbina y que debe estar construida preferentemente de acero inoxidable deberá igualmente ser inspeccionada cada año debido al contacto

permanente que tiene con el agua. Es necesario revisar el estado de la estructura de protección que se encuentra sobre la turbina y parte del canal de agua.

La herramienta básica para utilizarse estará compuesta por equipo de soldadura, corte, desbaste y protección personal.

Personal Técnico / Costo:

- Técnico Soldador Calificado: 1u x 150.00 = 150.00 USD
- Ayudante Cerrajero: 1u x 50.00 = 50.00 USD

3. INSTALACIÓN ELÉCTRICA y EQUIPOS DE CONTROL

Todas las instalaciones eléctricas realizadas en cuanto a las conexiones, tuberías y acometidas eléctricas al igual que su equipo de medición y control necesitan una revisión y mantenimiento cada cinco (5) años.

De existir alguna anomalía en la red eléctrica, el medidor que controla el voltaje de salida de la turbina instalada nos da una alerta de que el sistema presenta fallas en su correcto funcionamiento.

Personal Técnico / Costo:

- Técnico Eléctrico Calificado: 1u x 120.00 = 120.00 USD
- Ayudante eléctrico: 1u x 50.00 = 50.00 USD

La herramienta básica para utilizarse estará compuesta por un multímetro, juego de herramientas eléctricas (desarmadores, alicates, cortadora), escalera.

4. TURBINA

Para realizar el mantenimiento de la turbina en sí, es necesario realizar las recomendaciones técnicas especificadas por el fabricante. La vida útil de la turbina del

sistema es de treinta (30) años con un plan de mantenimiento simple que involucra básicamente a lo siguiente:

- a) Engrase lubricación y cadena de aceite cada tres (3) años,
- b) Mantenimiento general exterior de la turbina cada tres (3) años,
- c) Revisión de la caja de cambios y reemplazo de los rodamientos mínimo cada diez (10) años,
- d) Inspección completa de la unidad central y sus componentes electrónicos no antes de los quince (15) años de puesta en funcionamiento,

Personal Técnico / Costo:

- Técnico Calificado: 1u x 250.00 = 450.00 USD
- Ayudante: 1u x 100.00 = 150.00 USD

La herramienta para utilizarse estará compuesta también por un multímetro, juego de herramientas eléctricas (desarmadores, alicates, cortadora), escalera, grasero, llaves de diferentes medidas y herramienta especializada del fabricante cuando se realice la inspección completa de la unidad central y sus diferentes componentes electrónicos.

7. Resultados y Discusiones

Utilizando el concepto de costo nivelado de energía o LCOE, se realizó un estudio de factibilidad entre el sistema de generación micro hidroeléctrica propuesto versus el costo de energía eléctrica suministrada por el estado, sin embargo, es importante mencionar que al ser el caso de estudio una comunidad rural no se tiene una fuente principal de suministro de energía cerca y por esta razón se requiere hacer conexiones eléctricas a distancias

significativas, este es otro de los factores que se tomaron en cuenta al momento de realizar la comparación.

Como se puede observar en el análisis económico que se muestra en la tabla 8, el sistema de micro generación hidroeléctrica tiene un costo nivelado de energía de \$0.0745 USD el KWh tomando en cuenta instalaciones eléctricas a una distancia de 500 metros. Esto quiere decir que se asemeja de manera significativa al precio promedio de KWh estándar de la energía suministrada por el estado la cual es de \$0.08 USD, sin embargo, existe una denominada tarifa solidaria que se aplica en sectores rurales que es de \$0.04 USD.

Al tener el precio de KWh del sistema propuesto se realiza una estimación de cuanta energía consume una casa rural promedio y se obtiene que es de 113.4KWh/mes y por lo tanto va a tener que pagar un costo mensual de aproximadamente \$8.00 USD durante el tiempo considerado para el retorno de la inversión que es de 10 años.

| ANÁLISIS ECONÓMICO MICRO GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA | |
|---|--------------|
| Descripción | Anual |
| Kwh por año | 7.56E+04 |
| Interés anual para préstamo | 0.075 |
| Costo de Sistema Micro Hidráulico | \$ 7,817.68 |
| Costo Capital Inicial | \$ 29,817.68 |
| Tiempo de vida | 10 |
| Valor de rescate | \$ 703.59 |
| Interés Devuelto por año | 0.05 |
| Costo Operativo | \$ 720.00 |
| Cableado 500m | \$ 22,000.00 |
| Anualizar Valor de costo capital | 0.1295 |
| Costo Capital Anual | \$ 3,861.53 |
| Costo Total Anual | \$ 4,581.53 |

| | |
|--|------------------|
| Pago Anual préstamo | \$ 343.61 |
| Levelized Cost \$/Kwh | \$ 0.0745 |
| KWh consumidos Rural | 113.16 |
| Costo Mensual Aproximado Vivienda Rural | \$ 8.425 |

Tabla 8 Análisis Económico de Micro Generación Hidroeléctrica considerando costos de instalación a 500 metros

En el caso del sistema de micro generación hidroeléctrica también se consideró una distancia a 500 m ya que el sistema está diseñado para realizarlo in situ o a distancias cortas, como se puede observar en la figura 21, se analizan dichas distancias mostrando como el costo de kWh a distancias menores de 500 m son muy competitivos para el mercado ya que varía desde \$0.034 USD a \$0.0745 USD.

En el caso del suministro eléctrico por parte del estado el costo de kWh que se consideró es el solidario, es decir, de \$0.04 USD. Sin embargo, se añadió los costos de instalación de los postes eléctricos. El análisis de costos de instalación de los postes se está representado en el Anexo I, como resultado de este análisis se obtuvo un costo de metro lineal que es de aproximadamente \$44.00 USD y se plantearon varios casos de estudio tomando en cuenta distintas distancias (500 m hasta 5km). Los resultados pueden ser visualizados en la figura 19 y el análisis económico a una distancia de 500 m se encuentra en el Anexo K, para los demás casos lo único que cambia es la distancia y por consecuencia el costo de instalación. En la figura 19 a continuación se puede observar cómo es de esperar, mientras mayor distancia exista entre la fuente de energía y la acometida eléctrica va a tener un mayor costo el kWh, en este caso la distancia menor es de 500 m y se obtiene un precio de \$0.071 USD que es comparable con el sistema propuesto, mientras que en la distancia mayor que es de

5km se tiene un precio de kWh de \$0.35 USD, lo cual es bastante elevado considerando la comparación con los mencionados anteriormente. Esto traducido al consumo de una vivienda rural promedio se obtiene que como mínimo se paga \$8.00 USD y como máximo \$40.00 USD mensual

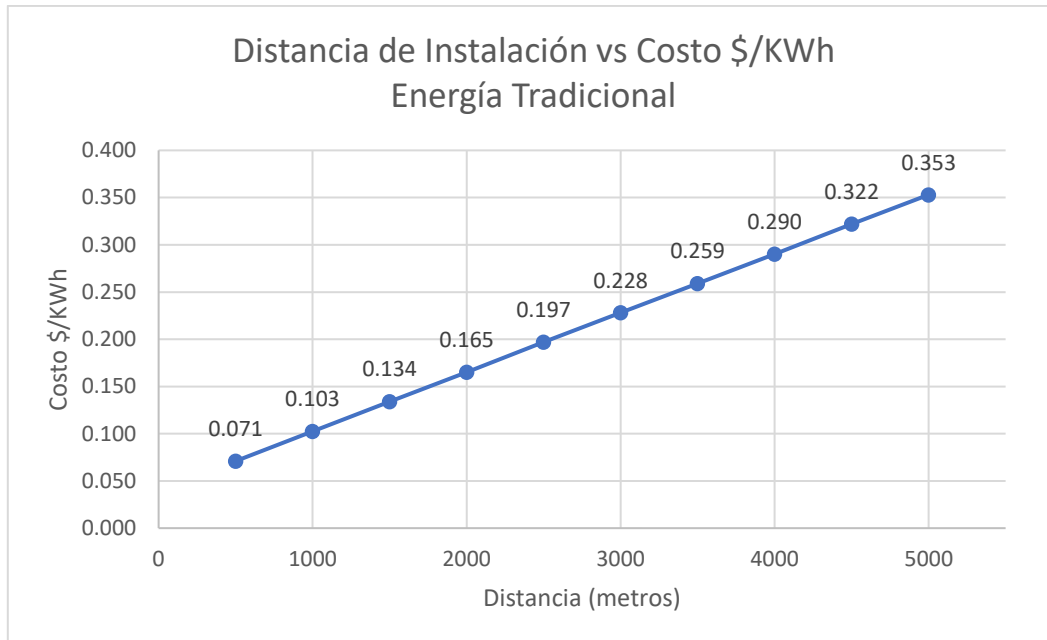


Figura 20 Distancia de Instalación vs Costo \$/KWh para energía eléctrica suministrada por redes tradicionales – A mayor distancia, mayor costo de inversión

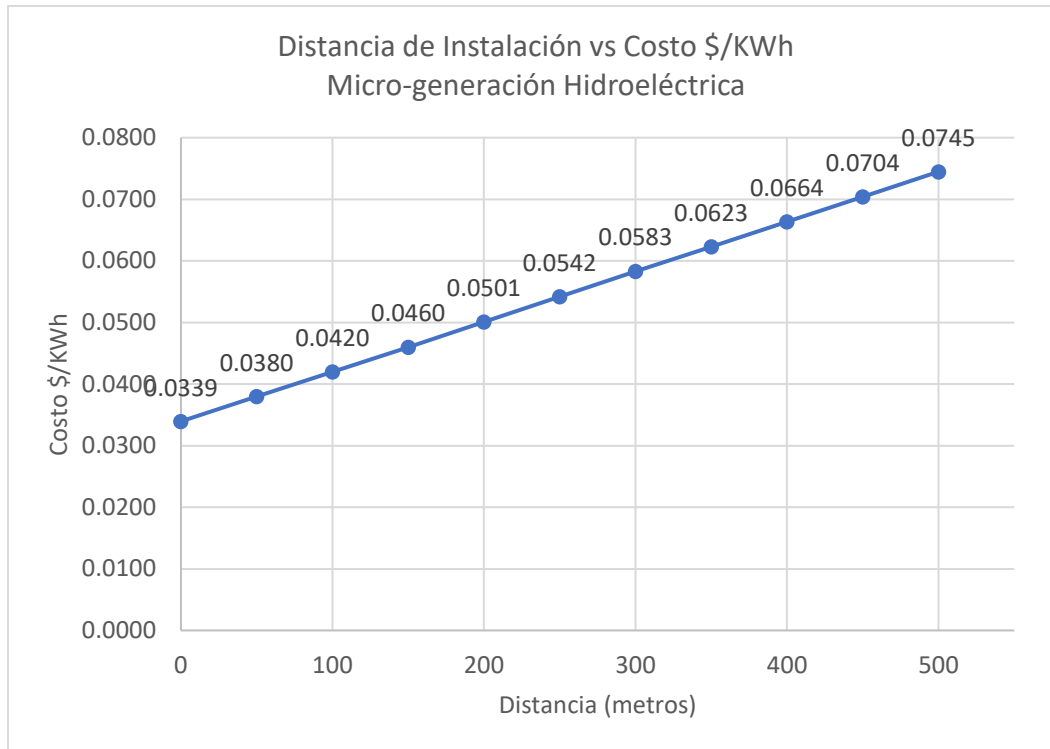


Figura 21 Distancia de Instalación vs Costo \$/KWh para energía micro generación hidroeléctrica. Tiene un costo competitivo para el mercado energético ecuatoriano.

8. Conclusiones

Al momento de realizar el análisis comparativo del sistema de micro generación hidroeléctrica y el sistema tradicional tomando en cuenta los costos de instalación a varias distancias se puede concluir que para la distancia de 500 m ambos sistemas son viables para el caso de estudio propuesto, sin embargo, es importante destacar que se tomó en cuenta un tiempo de retorno de inversión a 10 años, esto quiere decir que pasado este tiempo el sistema de micro generación ya repondrá el costo de instalación y el precio promedio del kWh será de \$0.034 USD como se puede ver en el Anexo J. De igual manera pasa con el sistema tradicional, se repone el costo de instalación pero el valor de kWh será de \$0.04 USD considerando la tarifa solidaria.

En el caso de las distancias mayores, es decir, pasadas los 500 m el costo de instalación se convierte en un inconveniente ya que se requiere de una inversión inicial mucho mayor y va a ser complicado para las personas de la comunidad rural costearlo.

Al realizar la comparación se muestra que a rasgos generales y para distancias cortas de la fuente de energía el sistema de micro generación hidroeléctrica es la mejor opción, sin embargo, se debe considerar que existan las condiciones adecuadas en el sitio de interés y se debe hacer proyecciones poblacionales en el tiempo requerido, esto quiere decir que se debe tomar en cuenta si la población del sector va a crecer de manera significativa, esto puede abaratar los costos del sistema ya que como se puede observar en la tabla 7, tiene la capacidad de suministrar energía a aproximadamente siete familias, pero si se tiene una expectativa en que la población aumente de manera significativa el sistema será insuficiente ya que no se pueden hacer ampliaciones por sus requerimientos físicos (caudal y head), por lo tanto, para este tipo de casos el sistema tradicional a pesar de tener una inversión inicial mayor es más eficiente y económicamente viable.

9. Recomendaciones

El sistema analizado tiene un fin económico positivo al ser fácil de instalar, no requiere materiales complejos, mantenimiento sencillo y su impacto ambiental es casi nulo ya que utiliza los recursos hídricos sin alterar el ecosistema, pero a su vez, requiere de condiciones específicas para su correcto desempeño y de igual manera depende del uso que se requiera a futuro. Por esta razón, es recomendable realizar un análisis a mayor profundidad en los costos de importación tomando en cuenta los conceptos CIF y FOB, para evitar contratiempos y tener un valor exacto del costo de importación para la turbina tipo Kaplan, adicionalmente es importante considerar unas buenas instalaciones eléctricas ya que al

producir potencia en una frecuencia diferente a la utilizada en el país se puede perder eficiencia en el proceso de transferencia de energía.

Finalmente, lo que se recomienda es realizar estudios técnicos considerando la geografía del país y ubicando lugares específicos que sean potencialmente factibles para considerar la instalación del sistema de micro-generación hidroeléctrica, de esta manera se puede comprobar de manera más precisa los datos analizados y se puede ayudar a una comunidad rural de manera real.

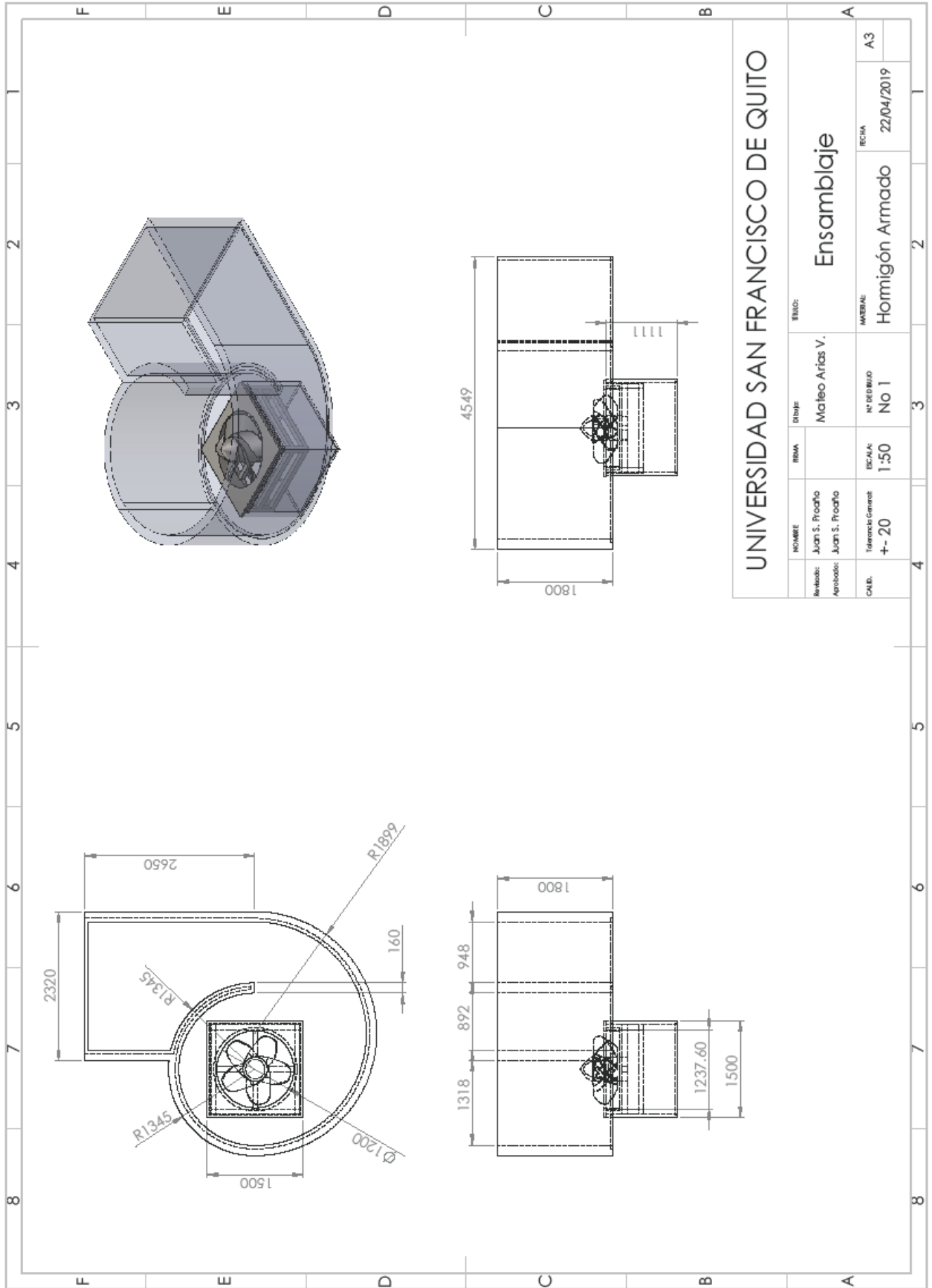
10.Referencias

- Abeykoon, C., & Hantsch, T. (2017). Design and Analysis of a Kaplan Turbine Runner Wheel, *2011*, 1–16. <https://doi.org/10.11159/htff17.151>
- Adams, S., Klobodu, E. K. M., & Apio, A. (2018). Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth. *Renewable Energy*, *125*, 755–767. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.135>
- Albright, L. D. (n.d.). *Energy Systems Engineering Evaluation and Implementation*.
- Carro, R., & González, D. (n.d.). Diseño y selección de procesos.
- Electricidad, A. de R. y C. de. (2017). Estadística anual y multianual del sector eléctrico ecuatoriano.
- Gerhart, P. M., Gerhart, A. L., & Hochstein, J. I. (n.d.). *Fluid Mechanics*.
- Guía para el desarrollo de una pequeña central hidroeléctrica. (2006).
- Jawahar, C. P., & Michael, P. A. (2017). A review on turbines for micro hydro power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *72*(October 2015), 882–887. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.133>
- Kaunda, C. S., Kimambo, C. Z., & Nielsen, T. K. (2014). A technical discussion on microhydropower technology and its turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *35*, 445–459. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.035>
- Korpela, S. (n.d.). *Principles of Turbomachinery*. Ohio: Willey.
- Kosnik, L. (2010). The potential for small scale hydropower development in the US. *Energy Policy*, *38*(10), 5512–5519. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.04.049>
- La Hora. (2008). Canal de riego Píllaro florece la esperanza : País : La Hora Noticias de Ecuador, sus provincias y el mundo. Retrieved December 5, 2018, from

- <https://lahora.com.ec/noticia/706912/canal-de-riego-pc3adllaro-florece-la-esperanza>
- Ley de fomento de energías no convencionales. (n.d.). Ley de fomento de energías no convencionales - Derecho Ambiental Ecuador Sudamerica. Retrieved December 6, 2018, from <http://www.derecho-ambiental.org/Derecho/Legislacion/Ley-Fomento-Energias-No-Convencionales.html>
- Martinez, J. J., Deng, Z. D., Titzler, P. S., Duncan, J. P., Lu, J., Mueller, R. P., ... Renholds, J. F. (2019). Hydraulic and biological characterization of a large Kaplan turbine, *131*, 240–249. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.034>
- Momin, A., Dave, N., Patel, P., & Panchal, K. (2017). Design and Development of Kaplan Turbine, 16519–16528. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2017.0608246>
- Pasalli, Y. R., & Rehiara, A. B. (2014). Design Planning of Micro-hydro Power Plant in Hink River. *Procedia Environmental Sciences*, *20*, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.009>
- Sector, V. P. (2012). Hydropower, *1*(3).
- Simulation, S. F. (2017). Solidworks flow simulation 2017.
- Sultan, R. A. (2016). Renewable Micro Hydro Power Generation, (February).
- Turbulent. (n.d.). Decentralized hydropower inspired by nature brochure.
- Vicunha. (2009). Vicunha. Retrieved December 5, 2018, from <http://www.vicunha.com.ec/vicunha/index.php?secc=1&seccionp=23&ar=80&system=14&sessid=>
- Yáñez, L., Bastidas, W., & Córdoba, V. (2017). Resumen del plan nacional de gestión integrada e integral de los recursos hídricos y de las cuencas y microcuencas hidrográficas de Ecuador, *9*, 124–132.

11.Anexos

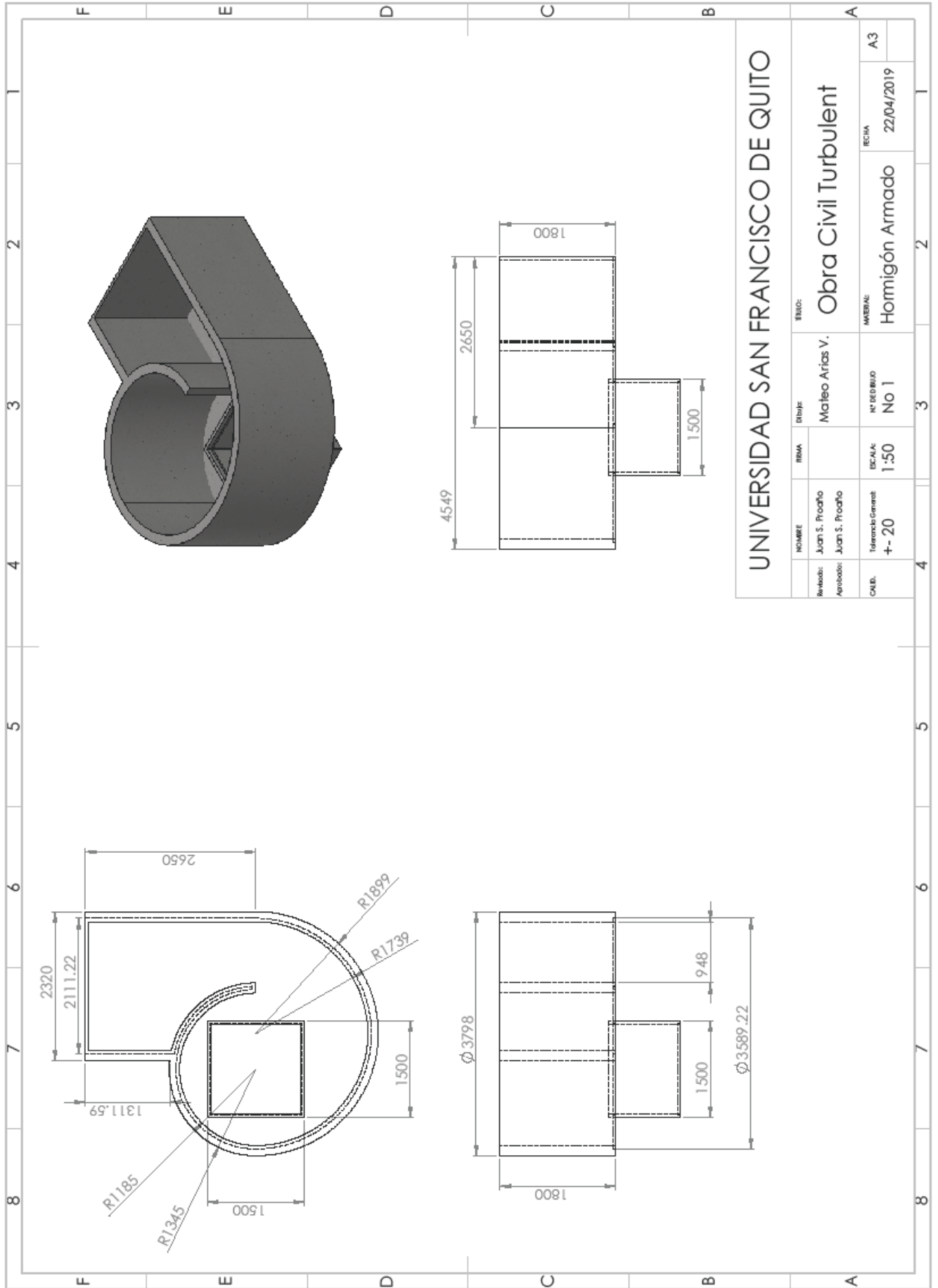
11.1. Anexo A: Plano de Ensamblaje



UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

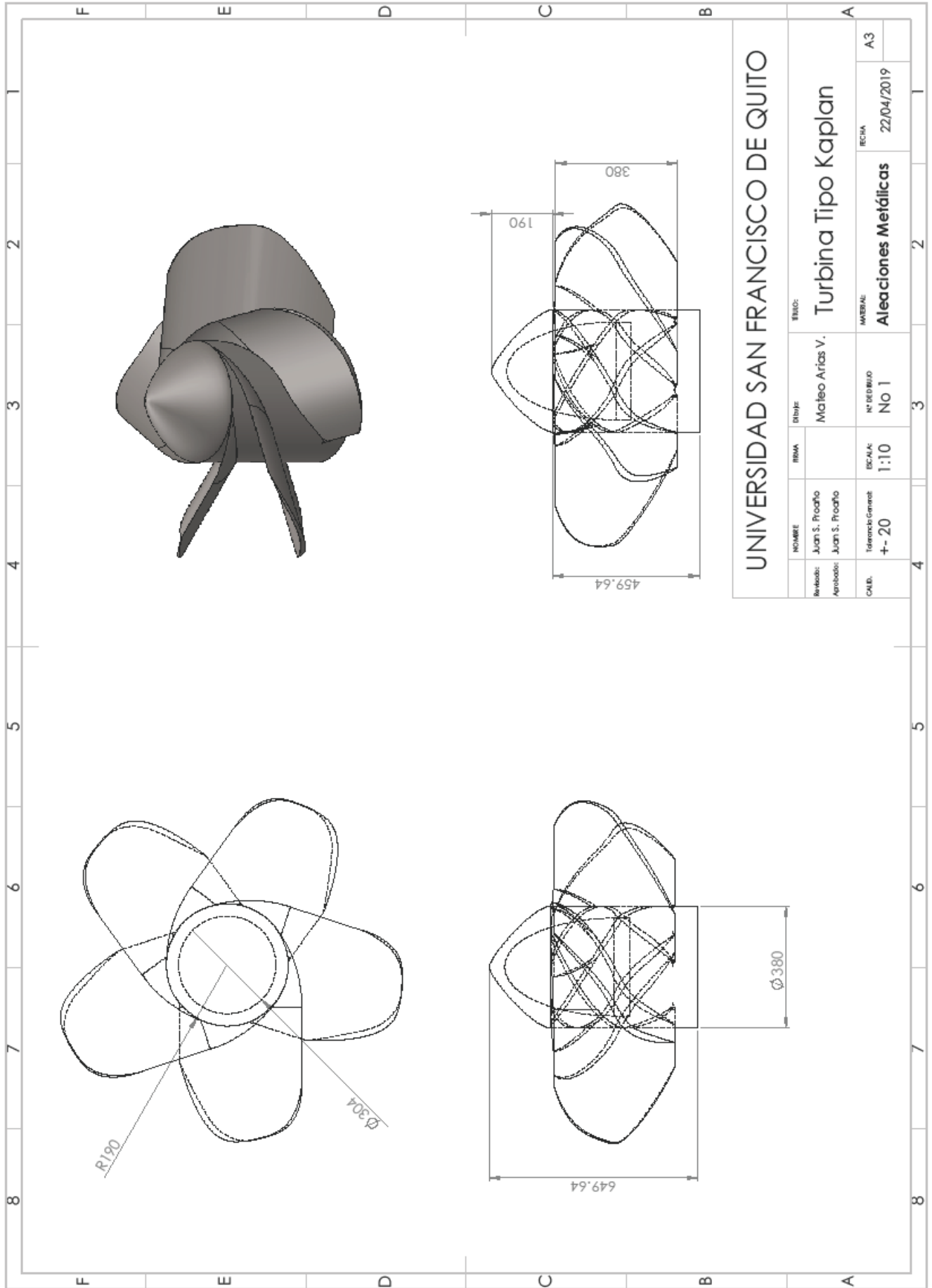
| NOMBRE | | IRMA | | DIBUJO | | TITULO | | |
|-----------|---------------------|-------|---------|----------------|--------------|------------|----------------|----|
| Revisado: | Juan S. Proaño | | | Mateo Arias V. | | Ensamblaje | | |
| Aprobado: | Juan S. Proaño | | | | | | | |
| CALIB. | Tolerancia General: | ±- 20 | ESCALA: | 1:50 | Nº DE DIBUJO | No 1 | FECHA | |
| | | | | | | | 22/04/2019 | |
| | | | | | | | MATERIAL: | |
| | | | | | | | Homigón Armado | |
| | | | | | | | | A3 |

11.2. Anexo B: Plano Obra Civil



| | | | |
|---|---------------------------|-------------------|-----------------------------|
| UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO | | | |
| NOMBRE | IBMA | Dibuje | TÍTULO: |
| Revisado: Juan S. Proaño | | Mateo Arias V. | Obra Civil Turbulent |
| Aprobado: Juan S. Proaño | | | MATERIAL: |
| CALD. | Tolerancia General: ±- 20 | ESCALA: | Homigón Armado |
| | | Nº DE BULO | FECHA |
| | | No 1 | 22/04/2019 |
| | | | A3 |

11.3. Anexo C: Plano Turbina Kaplan



11.4. Anexo D: Plano Estructura Metálica

11.5. Anexo E: Análisis Energético Vivienda Estándar por energía tradicional

| EQUIPO | W de Equipo | Número De Equipos | Horas De Consumo | Consumo Pico | Consumo diario en W*h | Consumo diario en KW*h | Días De Uso | Consumo mensual KW*h |
|----------------------|-------------|-------------------|------------------|--------------|-----------------------|------------------------|-------------|----------------------|
| Refrigerador 16ft(3) | 475 | 1 | 13 | 475 | 6175 | 6.175 | 30 | 185.25 |
| Microondas 0.5ft3 | 750 | 1 | 2 | 750 | 1500 | 1.5 | 30 | 45 |
| Foco Incandescente | 40 | 4 | 4 | 160 | 640 | 0.64 | 30 | 19.2 |
| Fluorescente | 16 | 2 | 2 | 32 | 64 | 0.064 | 30 | 1.92 |
| Teléfono Móvil | 24 | 2 | 2 | 48 | 96 | 0.096 | 30 | 2.88 |
| Estéreo | 30 | 1 | 2 | 30 | 60 | 0.06 | 30 | 1.8 |
| Televisión Promedio | 130 | 2 | 7 | 260 | 1820 | 1.82 | 30 | 54.6 |
| Laptop | 140 | 2 | 2 | 280 | 560 | 0.56 | 30 | 16.8 |
| Impresora | 75 | 1 | 2 | 75 | 150 | 0.15 | 30 | 4.5 |
| Licuada | 400 | 1 | 0.5 | 400 | 200 | 0.2 | 30 | 6 |
| DVD | 15 | 1 | 3 | 15 | 45 | 0.045 | 30 | 1.35 |
| Plancha | 1200 | 1 | 3 | 1200 | 3600 | 3.6 | 30 | 108 |

| | |
|-------------------------|-----------------|
| Total de Kwh/mes | 447.3 |
| Precio Kwh | 0.083 \$ |

| | |
|-----------------|---------------------|
| Subtotal | 37.1259 \$ |
| IVA | 0.12 % |
| TOTAL | 41.581008 \$ |

11.6. Anexo F: Análisis Energético Vivienda Rural por energía tradicional

| EQUIPO | W de Equipo | KW de Equipo | NÚMERO DE EQUIPOS | HORAS DE CONSUMO | Consumo Pico | W/DIA | KW/DIA | DIAS DE USO | KW/MES |
|------------------------|-------------|--------------|-------------------|------------------|--------------|-------|--------|-------------|--------|
| Refrigerador 16 ft (3) | 200 | 0.2 | 1 | 12 | 200 | 2400 | 2.4 | 30 | 72 |
| Foco Fluorescente | 40 | 0.04 | 4 | 5 | 160 | 800 | 0.8 | 30 | 24 |
| Teléfono Móvil | 16 | 0.016 | 1 | 2 | 16 | 32 | 0.032 | 30 | 0.96 |
| Estéreo | 30 | 0.03 | 1 | 2 | 30 | 60 | 0.06 | 30 | 1.8 |
| Televisión Promedio | 80 | 0.08 | 2 | 3 | 160 | 480 | 0.48 | 30 | 14.4 |

| | |
|-------------------------|----------------|
| Total de Kwh/mes | 113.16 |
| Precio Kwh | 0.04 \$ |

| | |
|-----------------|--------------------|
| Subtotal | 4.5264 \$ |
| IVA | 0.12 % |
| TOTAL | 5.069568 \$ |

11.7. Anexo G: Rubros generales del sistema propuesto

OBRA CIVIL

| Bloque | Área (m2) | Profundidad (m) | Volumen (m3) |
|--------|-----------|-----------------|--------------|
| M1 | 2.188 | 1.50 | 3.282 |
| M2 | 2.650 | 2.65 | 2.650 |
| M3 | 0.800 | 1.00 | 0.800 |

| Descripción | Unidad | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
|--|--------|----------|-----------------|--------------|
| Limpieza del Terreno | M2 | 80.00 | 1.27 | 101.60 |
| Replanteo General | M2 | 50.00 | 1.26 | 63.00 |
| Excavación de Tierra | M3 | 39.70 | 9.05 | 359.29 |
| Desalojo de tierra | M3 | 39.70 | 10.99 | 436.30 |
| Hormigón en Replantilla | M3 | 0.79 | 113.06 | 89.32 |
| Hormigón en muro circular (Incl S1yS2) | M3 | 5.93 | 245.43 | 1,455.89 |
| Hormigón en canal de riego (L=1) | M3 | 0.80 | 209.42 | 167.54 |
| Limpieza de obra | M2 | 80.00 | 2.21 | 176.80 |

Subtotal 1 \$ 2,849.73

ELEMENTOS MECÁNICOS

| Bloque | Cantidad | Costo Unitario | Total |
|---------------------|----------|----------------|--------------------|
| Turbina Kaplan | 1 | 2210 | 2210 |
| Estructura Metálica | 1 | 250 | 250 |
| Instalación | 1 | 250 | 250 |
| Varios | 1 | 300 | 300 |
| Subtotal 2 | | | \$ 3,010.00 |

ELEMENTOS ELÉCTRICOS

| Bloque | Cantidad | Costo Unitario | Total |
|--------|----------|----------------|-------|
|--------|----------|----------------|-------|

| | | | |
|-------------------------|----|-----|------------------|
| Cable | 10 | 10 | 100 |
| Medidor de tensión | 1 | 85 | 85 |
| Tablero de distribución | 1 | 170 | 170 |
| Otros | 1 | 300 | 300 |
| Subtotal 3 | | | \$ 655.00 |

| | |
|-----------------|--------------------|
| SUBTOTAL | \$ 6,514.73 |
|-----------------|--------------------|

| | | |
|-------------------|------------|---------------------|
| INDIRECTOS | 20% | \$ 1,0302.95 |
|-------------------|------------|---------------------|

| | |
|--------------|--------------------|
| TOTAL | \$ 7,817.68 |
|--------------|--------------------|

11.6 Anexo H: Materiales de la obra Civil

| CODIGO | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | PRECIO | TOTAL |
|---------------|---|---------------|-----------------|---------------|--------------|
| 102827 | Cemento Portland Gris | Saco | 48.54 | 8.50 | 412.57 |
| 102829 | Alfajia 7 x 7 x 250 | u | 55.83 | 2.54 | 141.81 |
| 100039 | Ripio Triturado | m3 | 7.15 | 16.50 | 117.97 |
| 106065 | Polvo de Piedra | m3. | 4.38 | 16.50 | 72.20 |
| 101837 | Tablero contrachapado para encofrado 4x8x12 B | u | 2.79 | 25.52 | 71.10 |
| 102218 | Clavos (2"-2 1/2"- 3"- 3 1/2") | Kg. | 22.80 | 2.18 | 49.70 |
| 100005 | Cemento Portland Gris | Kg. | 245.32 | 0.20 | 49.06 |
| 103247 | Puntales de eucalipto 3.00 x 0.30 | u | 31.35 | 1.25 | 39.19 |
| 104898 | Alfajia eucalipto 6 * 6 * 2.40 cm rustica | u | 15.45 | 2.50 | 38.63 |
| 100018 | Arena Fina | m3 | 0.52 | 16.50 | 8.51 |
| 102230 | Estacas | u | 71.95 | 0.11 | 7.91 |
| 102204 | Agua | m3. | 3.14 | 1.00 | 3.14 |
| 104850 | Aditivo Acelerante Tipo Plastocrete 161HE | Kg. | 2.69 | 1.08 | 2.91 |
| 100095 | Alambre Galvanizado #18 | Kg. | 1.01 | 2.23 | 2.25 |
| 105378 | Detergente | Kg. | 0.80 | 2.28 | 1.82 |
| 102828 | Tiras 2.5 x 2.5 x 250 | u | 2.50 | 0.43 | 1.08 |

| | | | | | |
|--------|----------------|-----|------|---------------|-----------------|
| 102203 | Aceite quemado | Gl. | 1.77 | 0.50 | 0.89 |
| 105447 | Esmalte | gl | 0.00 | 13.88 | 0.00 |
| | | | | TOTAL: | 1,020.76 |

11.7 Anexo I: Precio Referencial para la instalación de postes

PRECIO REFERENCIAL PARA LA INSTALACION DE TRES POSTES CON UNA LONGITUD TOTAL DE 40 METROS LINEALES

| ITEM | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD | POSTE 1 | POSTE 2 | POSTE 3 | PRECIO UNITARIO | PRECIO TOTAL |
|-------------------------|---|--------|----------|---------|---------|---------|-----------------|--------------|
| 1.0 MATERIALES | | | | | | | | |
| 1.1 | POSTE DE HORMIGON 10 m = 400 KG | u | 3 | 1 | 1 | 1 | 255.00 | 765.00 |
| 1.2 | BASTIDOR DE 4 VIAS | u | 3 | 1 | 1 | 1 | | - |
| 1.3 | AISLADOR | u | 12 | 4 | 4 | 4 | | - |
| 1.4 | PREFORMADO No 2 | u | 9 | 3 | 3 | 3 | | - |
| 1.5 | PREFORMADO No 4 | u | 3 | 1 | 1 | 1 | | - |
| 1.6 | ABRAZADERAS 2 POLOS | u | 6 | 2 | 2 | 2 | | - |
| 1.7 | CINTA DE AMARRAR | m | 6 | 6 | | | | - |
| 1.8 | ALAMBRE DE ATAR | m | 6 | 6 | | | | - |
| 1.9 | CONDUCTOR ALUMINIO ASC No 2 (2 líneas) | m | 80 | 40 | | 40 | 0.70 | 56.00 |
| 1.10 | CONDUCTOR ALUMINIO ASC No 4 (1 línea) | m | 40 | 20 | | 20 | 0.43 | 17.20 |
| ANCLAJE TENSOR | | | | | | | | |
| 1.11 | CABLE TENSOR | m | 24 | 12 | | 12 | | - |
| 1.12 | GUARDACABO 3/8 | u | 2 | 1 | | 1 | | - |
| 1.13 | VARILLA DE ANCLAJE | u | 2 | 1 | | 1 | | - |
| 1.14 | BLOQUE DE ANCLAJE | u | 2 | 1 | | 1 | | - |
| 2.0 MANO DE OBRA | | | | | | | | |
| 2.1 | INSTALACION DE POSTE (MAXIMO 20 metros) REPLANTEO EXCAVACION (0.50 - 0.80 m) | u | 3 | 1 | 1 | 1 | 254.00 | 762.00 |

| | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|-----------------------------|-----------------|
| PARADA DE POSTE ARMADO DE BASTIDOR y ACCESORIOS TENDIDO Y REGULADO DE CABLES DE ALUMINIO ENSAMBLAJE DE ANCLAJE - TENSOR TRANSPORTE | | | | | | | | |
| | | | | | | | SUBTOTAL | 1,600.20 |
| | | | | | | | TRANSP. +IMPREVISTOS | 160.02 |
| | | | | | | | TOTAL EN DOLARES | 1,760.22 |

| | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------|---|-------------|------------------------------|
| PRECIO POR CADA METRO LINEAL = | <u>TOTAL EN</u> <u>DOLARES</u> | = | <u>1,760.22</u> | = | 44.01 \$ | DÓLARES CADA METRO LINEAL |
| | DISTANCIA TOTAL (m) | | 40.00 | | | |

11.8 Anexo J: Análisis Económico de Micro Generación Hidroeléctrica sin considerar costos de instalación

| Análisis Económico De Micro Generación Hidroeléctrica | |
|---|------------------|
| Descripción | Anual |
| Kwh por año | 7.56E+04 |
| Interés anual para préstamo | 0.075 |
| Costo de Sistema Micro Hidráulico | \$ 7,817.68 |
| Costo Capital Inicial | \$ 7,817.68 |
| Lifetime | 10 |
| Valor de rescate | \$ 703.59 |
| Interés Devuelto por año | 0.05 |
| Costo Operativo | \$ 720.00 |
| Cableado | \$ - |
| | |
| Anualizar Valor de costo capital | 0.1295 |
| | |
| Costo Capital Annual | \$ 1,012.43 |
| | |
| Costo Total Annual | \$ 1,732.43 |
| | |
| Pago Annual prestamo | \$ 129.93 |
| | |
| Levelized Cost \$/Kwh | \$ 0.0339 |
| | |
| Kwh consumidos Rural | 113.16 |
| Costo \$/Kwh Estándar | \$ 0.040 |
| Costo Mensual Aproximado Vivienda Rural | \$ 4.302 |

11.9 Anexo K: Análisis Económico de Costo energético tradicional a una distancia de 500 metros

| Instalación a 500m | |
|----------------------------------|-----------------|
| Descripción | Anual |
| Kwh por año | 7.56E+04 |
| Interés anual para préstamo | 0.075 |
| Costo Capital Inicial | \$ 22,005.00 |
| Distancia (m) | 500 |
| Costo metro Lineal Instalación | \$ 44.01 |
| Tiempo de Vida (Lifetime) | 10 |
| Interés Devuelto por año | 0.0001 |
| Costo Operativo | \$ - |
| | |
| Anualizar Valor de costo capital | 0.1001 |
| | |
| Costo Capital Anual | \$ 2,201.71 |
| | |
| Costo Total Anual | \$ 2,201.71 |
| | |
| Pago Anual préstamo | \$ 165.13 |
| | |
| Levelized Cost \$/Kwh | \$ 0.0313 |
| Costo \$/Kwh Estándar | \$ 0.040 |
| Costo \$/Kwh TOTAL | \$ 0.071 |

11.10 Anexo M: Diagrama de procesos propuesto para el sistema de micro-generación hidroeléctrica

