

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA “PLUVIO-ELÉCTRICO” ADAPTABLE A
LA REGIÓN DEL CHOCÓ BIOGEOGRÁFICO COLOMBIANO

MANUEL SALVADOR ACOSTA CASTRO

JUAN SEBASTIAN DIAZ PIEDRAHITA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2018

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA “PLUVIO-ELÉCTRICO” ADAPTABLE A
LA REGIÓN DEL CHOCÓ BIOGEOGRÁFICO COLOMBIANO

MANUEL SALVADOR ACOSTA CASTRO

JUAN SEBASTIAN DIAZ PIEDRAHITA

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero mecánico

DIRECTOR:

JAVIER RUGELES PÉREZ

Ingeniero Mecánico

CO-DIRECTOR:

MANUEL DE JESÚS MARTÍNEZ

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2018

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su compañía constante, la sabiduría y entereza brindada para afrontar este reto.

A nuestras familias que siempre estuvieron apoyándonos durante todas las etapas del proyecto, tanto económicamente como emocionalmente.

A nuestro director Javier Rugeles Pérez, por su guía, aportes y amabilidad a lo largo del desarrollo del proyecto.

A nuestro codirector, Manuel de Jesús Martínez, por su conocimiento y optimismo en los momentos críticos del proyecto.

A todos los compañeros y amigos que nos brindaron su apoyo y ayuda en el proceso de desarrollo de la tesis.

A los ingenieros Tomás Lerzundy y a Saúl García García, ya que gracias a su tesis pudimos orientar el desarrollo de nuestra investigación.

A la Universidad Industrial de Santander por las experiencias académicas y la formación integral que nos brindó a lo largo de la carrera.

MANUEL SALVADOR ACOSTA CASTRO

JUAN SEBASTIÁN DÍAZ PIEDRAHITA

DEDICATORIA

A Dios, por ser él quien me brindó los dones y aptitudes que me han llevado a ser quien soy.

A mis padres, quienes me permitieron ser su hijo, brindándome una gran vida y un gran futuro.

A Pedro León Acosta Mesa, amado padre, quien siempre quiso verme graduado, sin embargo, el plan divino no le permitió ver finalizado este proyecto en vida.

A Emelda Castro de Acosta, mi madre quien siempre me apoyó y me amó durante toda mi vida, ayudándome a superar los grandes golpes que he sufrido.

A Olga Lucía Acosta Castro, mi segunda madre quien siempre estuvo presente para verme crecer y apoyarme siempre que lo necesitaba.

Luz Adriana, Jaime Manuel, Pedro León y Adriana María, mi amada familia que siempre esperaron grandes cosas de mí, apoyándome en cualquier momento.

A las futuras generaciones, para que este proyecto encienda la llama que lleve a un futuro sostenible.

Manuel Salvador Acosta Castro

DEDICATORIA

A DIOS, que me ha acompañado en cada momento de mi vida.

A mi madre, YOLANDA PIEDRAHITA, que me brindo su ayuda incondicional y orientación en cada una de las etapas de mi vida académica. Impulsando cada día un pensamiento de progreso para cumplir mis sueños y metas personales.

A mi padre, GUSTAVO DIAZ, quien no dudo en apoyarme económicamente en todos los procesos de mi vida estudiantil.

A mi hermano CRISTIAN e hijo JUAN DAVID, por su gran cariño y colaboración.

A mi tío, LUIS CARLOS por su motivación constante, brindándome de energía y confianza valiosa en cada momento tanto académico como personal.

A mi nona materna, quien estuvo siempre pendiente de mi formación, brindándome afecto, comprensión y enseñanzas del diario vivir.

A cada uno de mis familiares que colaboraron en mi proceso de formación integral durante estas dos décadas.

A mis amigos y compañeros, Jorge, Jhan, Valeria, Lizeth, Ricardo, Manuel, entre otros; que me acompañaron y apoyaron con su buena energía en múltiples situaciones vividas durante este proceso tanto académico como personal.

Finalmente, agradezco a todos inmensamente por haber participado de una u otra manera en este proceso.

JUAN SEBASTIAN DIAZ PIEDRAHITA

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. EL DESAFIO DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DEL AGUA-LLUVIA.....	22
2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	24
3. OBJETIVOS	25
3.1 OBJETIVO GENERAL	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	26
4.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD Q.F.D.....	26
4.1.1 Requerimientos del Consumidor.....	26
4.1.2 Criterios del Diseñador	27
4.2 MATRIZ CALIDAD.....	28
5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DEL PROBLEMA DE LA GENERACIÓN “PLUVIO- ELECTRICA”	30
5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA.....	30
5.1.1 Energías renovables.....	30
5.1.2 Centrales hidroeléctricas.	30
5.1.2.1 Tipos de pequeñas centrales hidroeléctricas	31
5.1.3 Maquinas hidráulicas	32
5.2 TURBINAS HIDRÁULICAS.....	33
5.2.1 Clasificación de las turbinas hidráulicas.....	34
5.2.1.1 Turbina de acción.	34
5.2.1.2 Turbina de reacción.....	35
5.3 RANGOS DE UTILIZACIÓN Y RENDIMIENTOS DE LAS TURBINAS.....	37
5.4 COSTOS DE INVERSIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA	38
5.5 RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	39
5.6 MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA	40
5.7 GENERADOR ELÉCTRICO	42
5.7.1 Clasificación de generadores según la corriente suministrada.	42

5.7.2 Generador de imanes permanentes (PMG).....	42
5.8 LEGISLACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA.....	42
6. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA PLUVIO-ELÉCTRICO.....	44
7. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS.....	47
7.1 PARÁMETROS GENERALES.....	47
7.1.1 Cálculo de las dimensiones del edificio.....	47
7.1.2 Volumen de agua disponible.....	48
7.1.3 Potencia disponible.....	49
7.1.4 Tiempo de operación de la turbina.....	50
7.1.5 Proceso de selección de la turbina Michell Banki.....	51
7.2 CÁLCULO DE PERDIDAS DE LA TUBERIA.....	54
7.3 DISEÑO DE LA TURBINA MICHELL-BANKI.....	57
7.3.1 Diseño del rodete de la turbina.....	60
7.3.1.1 Diseño hidráulico.....	60
7.3.1.2 Diseño y geometría del rodete.....	65
7.3.1.3 Verificación del espesor del alabe.....	70
7.3.1.4 Verificación para el espesor de los discos del rodete.....	72
7.3.2 Diseño del eje de la turbina.....	72
7.3.3 Diseño del inyector.....	76
7.3.3.1 Cálculo de las dimensiones del inyector.....	76
7.3.3.2 Comprobación del alabe del inyector.....	80
7.3.3.3 Análisis de las paredes del inyector.....	81
7.4 DISEÑO DEL TANQUE.....	83
7.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	85
7.6 SELECCIÓN DEL GENERADOR.....	87
7.7 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA.....	90
7.7.1 Selección de la batería.....	90
7.7.2 Selección del inversor.....	92
8. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS.....	93
8.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FUNCIONAL.....	93

8.1.1 Fabricación de la turbina.....	93
8.1.2 Selección de la bomba	94
8.1.3 Selección de los elementos de tubería.....	95
8.1.4 Selección del tanque de suministro.....	95
8.1.6 Lista de costos.....	97
8.2 ENSAMBLAJE	97
8.3 RESULTADOS DEL MODELO FUNCIONAL	101
8.3.1 Medición del caudal de la bomba	101
8.3.2 Medición de las RPM.....	104
8.3.3 Generación eléctrica del modelo funcional	104
8.4 DISEÑO DEL BANCO DE LABORATORIO.....	107
8.4.1 Componentes del banco	107
8.4.1.1 Selección de la bomba.....	107
8.4.1.2 Diseño del tanque.....	107
8.4.1.3 Vertedero	108
8.4.1.4 Cálculo del volumen del tanque.....	109
8.4.1.5 Diseño del marco	110
9. MANUAL DE MANTENIMIENTO	111
9.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA “PLUVIO-ELÉCTRICO”.....	111
9.2 MANUAL DE INSTALACIÓN.....	112
9.2.1 Adecuación de la sala de la turbina	112
9.2.2 Instalación del tanque.....	112
9.3 MANUAL DE OPERACIÓN	113
9.3.1 Puesta en marcha	114
9.3.2 Parada de planta	114
9.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO.....	114
9.4.1 Registro de mantenimiento.....	114
9.4.2 Localización de averías.....	115
9.4.2.1 Diagnóstico de fallas.....	115
9.4.3 Acciones de mantenimiento.....	117

9.4.3.1 Mantenimiento del sistema de almacenamiento.....	117
9.4.3.2 Mantenimiento de la turbina.....	118
9.5 APLICABILIDAD A OTRAS ESTRUCTURAS.....	118
10. UTILIDAD DEL AGUA POS-GENERACION.....	120
10.1 PROYECCIÓN SOCIAL.....	120
10.2 PROYECCIÓN AMBIENTAL.....	121
10.3 PURIFICADOR DE AGUA.....	122
10.3.1.1 Tratamiento del agua-lluvia por rayos ultravioleta (UV).....	123
10.3.1.2 Selección del purificador del agua-lluvia.....	123
11. ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO.....	126
11.1 BENEFICIOS ECONÓMICOS.....	126
11.2 PRESUPUESTOS.....	127
11.2.1 Presupuesto fijo.....	127
11.2.2 Presupuesto de mantenimiento.....	129
11.3 DETERMINACIÓN DEL COSTO ENERGÉTICO.....	130
11.4 DEPRECIACIÓN DE LA PLANTA.....	131
11.5 RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN.....	132
11.6 VALOR PRESENTE NETO (VPN).....	133
11.7 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR).....	135
11.8 RELACIÓN BENEFICIO-COSTO DEL PROYECTO.....	136
12. CONCLUSIONES.....	137
13. RECOMENDACIONES.....	139
BIBLIOGRAFÍA.....	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Chocó Biogeográfico Colombiano	21
Figura 2. Micro-turbina de flujo axial (EE.UU)	23
Figura 3. Sistema de generación a partir de agua lluvia implementado un edificio residencial	23
Figura 4. Turbina Pelton.....	34
Figura 5. Turbina Michael-Banki.....	35
Figura 6. Turbina Francis.....	36
Figura 7. Turbina Kaplan.....	36
Figura 8. Diagrama de rangos de operación de distintos tipos de turbinas.....	38
Figura 9. Partes de una red de abastecimiento de agua	40
Figura 10. Esquema de la central “Pluvio-eléctrica”	44
Figura 11. Dimensiones del Coliseo.....	47
Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de selección de una turbina	53
Figura 13. Diagrama de Velocidades de una Turbina Michell-Banki	64
Figura 14. Diagrama de Radios y Ángulos.....	66
Figura 15. Trayectoria de al Agua a través de la turbina.....	68
Figura 16. Espaciamiento de los alabes	69
Figura 17. Fuerzas mecánicas en el rodete.....	73
Figura 18. Sentido de las fuerzas en el eje.....	75
Figura 19. Dimensiones Primarias del Inyector	77
Figura 20. Cargas sobre el Alabe del Inyector	79
Figura 21. Dimensiones del Coliseo.....	83
Figura 22. Sistema de recolección y almacenamiento de agua-lluvia.....	84
Figura 23. Motoreductor Seleccionado.....	86
Figura 24. Placa electrónica.....	86
Figura 25. Curva Potencia contra R.P.M generador PMG 112.....	88
Figura 26. Dimensiones del generador PMG112	89
Figura 27. Inversor seleccionado	92

Figura 28. Esquema Eléctrico	92
Figura 29. Manufactura del modelo de la turbina.....	94
Figura 30. Bomba Humbolt 296065 de ½ HP.....	95
Figura 31. Sistemas de Tuberías	95
Figura 32. Recipiente de 50 L	96
Figura 33. Alternado Wasshardt.....	97
Figura 34. Elementos del eje.....	98
Figura 35. Apertura de orificios.....	98
Figura 36. Elementos del subsistema de la turbina.....	99
Figura 37. Sistema desarrollado en el CAD.....	99
Figura 38. Sistema de la turbina ensamblado.....	100
Figura 39. Marco de Madera.....	100
Figura 40. Sistema Funcionando.....	101
Figura 41. Bomba del sistema.....	102
Figura 42. Tanque rectangular.....	103
Figura 43. Curva altura vs caudal de la bomba	104
Figura 44. Sistema de generación acoplado a la turbina	105
Figura 45. Dimensiones de un vertedero.....	108
Figura 46. Banco de laboratorio Turbina Michell-Banki.....	110
Figura 47. Estructura del coliseo	113
Figura 48. Purificador de Agua-lluvia por rayos ultravioleta.	125

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de Calidad	28
Tabla 2. Matriz de Calidad Tabulada	29
Tabla 3. Tipo de centrales hidroeléctricas según OLADE.....	31
Tabla 4. Tipo de caída en las pequeñas centrales hidroeléctricas.....	31
Tabla 5. Clasificación de las turbo-máquinas hidráulicas	32
Tabla 6. Clasificación de las turbinas hidráulicas.....	34
Tabla 7. Costos típicos de un sistema de generación hidroeléctrico	39
Tabla 8. Métodos de almacenamiento de agua	40
Tabla 9. Clasificación de generadores según el tipo de corriente.....	42
Tabla 10. Análisis de Pluviosidad por Ciudad	49
Tabla 11. Características Generales del Sistema	51
Tabla 12. Velocidades Específicas de los Distintos Tipos de Turbinas	52
Tabla 13. Consumo típico de electrodomésticos	91
Tabla 14. Lista de costos	97
Tabla 15. Pruebas experimentales para apertura total de la válvula.	103
Tabla 16. Pruebas experimentales para apertura parcial del 50% de la válvula..	103
Tabla 17. Caudal experimental del sistema	104
Tabla 18. Medidas de generación eléctrica del modelo	106
Tabla 19. Diagnóstico de fallas sistema de almacenamiento de agua	115
Tabla 20. Diagnóstico de fallas de la turbina	116
Tabla 21. Diagnóstico de fallas del generador	116
Tabla 22. Diagnóstico de fallas del sistema de control	117
Tabla 23. Mantenimiento de la turbina.....	118
Tabla 24. Producción de Energía por ciudad.....	119
Tabla 25. Elección del modelo del purificador de agua-lluvia	124
Tabla 26. Presupuesto de la tubería a presión	127

Tabla 27. Presupuesto del tanque y su control.....	128
Tabla 28. Presupuesto de la Turbina	128
Tabla 29. Presupuesto del generador y el almacenamiento energético	128
Tabla 30. Presupuesto de la mano de obra.....	129
Tabla 31. Presupuesto de equipos adicionales (Uso del agua pos-generación) .	129
Tabla 32. Resumen del Presupuesto FIJO	129
Tabla 33. Presupuesto del mantenimiento/año.....	130
Tabla 34. Valor Residual y depreciación anual para 20 años	132
Tabla 35. Periodo de retorno de los casos de estudio	132
Tabla 36. VPN del caso de solo generación eléctrica.....	134
Tabla 37. VPN del caso de generación y purificación del agua-lluvia.....	134
Tabla 38. Tasa interna de retorno de los casos estudiados.....	135
Tabla 39. Indicadores de la Relación de los VPN	136
Tabla 40. Relación de los VPN.	136

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD, pueden ser visualizados en la base de datos de la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander)

ANEXO A PROCESO DE DISEÑO-PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

ANEXO B CALCULOS TIPO

ANEXO C CODIGO EN EES DEL SISTEMA DE ECUACIONES

ANEXO D CODIGO DEL SISTEMA DE CONTROL ON-OFF EN ARDUINO

ANEXO E PLANOS DEL SISTEMA

ANEXO F PLANOS DEL BANCO DE LABORATORIO

ANEXO G FORMATO DE ORDEN DE TRABAJO, MANTENIMIENTO E INSTRUCCIONES TÉCNICAS

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA “PLUVIO-ELÉCTRICO” ADAPTABLE A LA REGIÓN DEL CHOCÓ BIOGEOGRÁFICO COLOMBIANO*

AUTORES:

Manuel Salvador Acosta Castro.

Juan Sebastián Díaz Piedrahita. **

PALABRAS CLAVE

Diseño, Pluvio-eléctrico, Turbina Michell-Banki.

DESCRIPCIÓN:

La lluvia si bien es uno de los recursos más abundantes en el territorio colombiano, con precipitaciones que pueden llegar a superar los 4m por año, no está siendo utilizada en todo su potencial. Por tanto, Se desarrolla el proceso de diseño de una planta “pluvioeléctrica” adaptable a la región del Chocó Biogeográfico Colombiano para la generación de energía eléctrica a base de la lluvia, el cual busque abrir un campo en la investigación de esta temática. Se inicia abordando los lugares y edificaciones donde el sistema se podría implementar junto a los parámetros que lo identifican, posteriormente se realiza la selección de la turbina hidráulica, siendo elegida la turbina Michell-Banki, el diseño del tanque de almacenamiento y recolección del agua-lluvia, junto a sus respectivo control; además de la selección del sistema de generación, almacenamiento y disposición de la electricidad, complementado con un análisis técnico-económico acerca de la viabilidad del proyecto, estudio de los beneficios sociales y ambientales, el alcance de este tipo de sistemas y un manual de mantenimiento que permita un correcto funcionamiento de la planta. Asimismo, se enfatiza la posible aplicabilidad de este proyecto como complemento en equipos de purificación de agua-lluvia actuales. Finalizando con la construcción de un modelo funcional que ejemplifica el funcionamiento de la turbina diseñada.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director de Proyecto: Ing. Javier Rugeles Pérez, Codirector de proyecto: Ing. Manuel de Jesús Martínez

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND ANÁLISIS OF A "PLUVIO-ELECTRIC" " SYSTEM, ADAPTABLE TO THE REGION OF THE COLOMBIAN CHOCÓ-DARIEN ECOREGION*

AUTORS:

Manuel Salvador Acosta Castro.

Juan Sebastián Díaz Piedrahita. **

KEY WORDS

Design, Michell-Banki Turbine, Pluvio-electric.

ABSTRACT:

The rain is one of the most abundant resources in the Colombian territory, with precipitation over 4m per year, it hasn't been used up to its maximum potential. Therefore, it's been develop the deign process of a "pluvial-electric" system, that could adapt to the region of the Colombian Chocó-Darien ecoregion, and capable of generate electricity using the rain, which seeks to open a field of research in this topic. It start by addressing the places and building where this system could be implements, based on the parameters that identify it, afterwards the selection of the type of turbine it's been done, being selected the Michell-Banki turbine, the design of the rainwater collection and storage system, together with its control system, In addition to the selection of the electricity generation, storage and disposal system, complemented with a technical and economic analysis, that defines the viability of the project, a study of the social an environmental benefits, the extend of this type of systems and a maintenance handbook that lead the user toward a good performance of the machinery. The possible applicability of this project is emphasized as a complement to current water-rain purification equipment. Finishing with the construction of a functional model that exemplifies the operation of the designed turbine.

* Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Project Director: Eng. Javier Rugeles Pérez, Project Co-Director: Eng. Manuel de Jesús Martínez

INTRODUCCIÓN

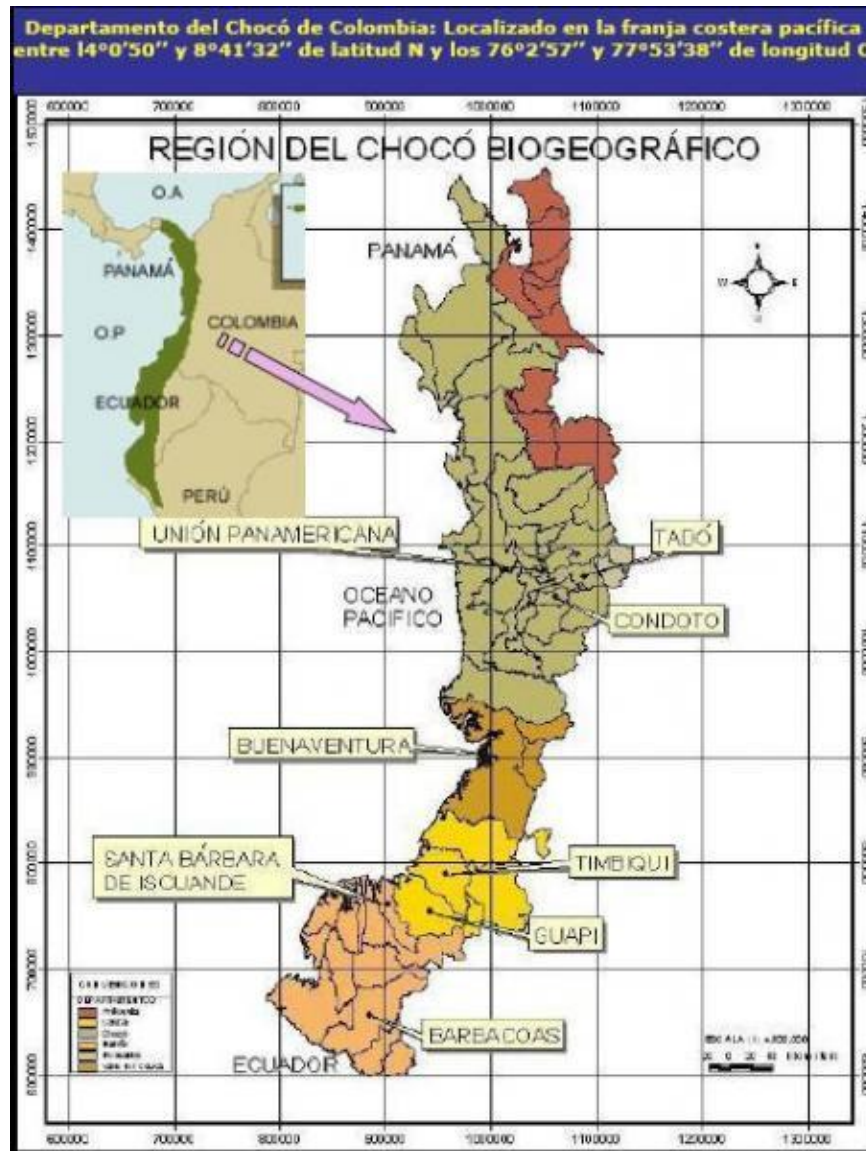
En las últimas décadas, el auge de las energías renovables, ha tenido un aumento de interés a nivel mundial, puesto que una gran cantidad de estudios han evidenciado las consecuencias del uso de combustibles fósiles como lo son el carbón o el petróleo, resaltando al calentamiento global, cambios en los patrones climáticos y fenómenos naturales más extremos. Dicha problemática ha llevado a ciertas naciones a invertir sumas monetarias considerables para el desarrollo y sostenimiento de energías renovables, como es el caso de la Unión Europea, la cual se comprometió para el año 2020 llegar a un 20%¹ de uso de energías renovables en el consumo total de energía. Esta visión se ha ido expandiendo a diferentes países unidos, bajo el objetivo común de reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Es por ello que cada día, investigaciones sobre el uso de nuevas energías verdes surgen para solventar estas problemáticas, basándose en la ubicación geográfica y climática que posee el lugar del estudio. Llevando este planteamiento a nuestro país, Colombia tiene múltiples regiones y posee diferentes climas que lo hacen ser ideal para la implementación de cualquier tipo de energía, desde la solar en la Guajira, hasta grandes represas de agua en los ríos colombianos. Un enfoque en la región del Chocó biogeográfico, donde la alta humedad y pluviosidad dificulta la implementación de energías tales como la solar o eólica, en contraste, esta zona presenta precipitaciones que pueden llegar hasta los 11m de lluvia en ciertos sectores, siendo una invitación al aprovechamiento de este recurso, abriendo las puertas a la oportunidad de realizar una investigación con el fin de obtener energía eléctrica a base de agua-lluvia, y así, diseñar un sistema “pluvio-eléctrico” que logre cumplir dicho propósito. Para lo cual, es necesario el desarrollo de un proceso de diseño, que determine una propuesta viable para esta problemática, incluyendo la selección del tipo de turbina conveniente para la locación, una forma de recolección

¹ ACCIONA, “Top 5 países en energías renovables” [en línea]. [25 Julio 2018]. Disponible en: <https://www.sostenibilidad.com/energias-renovables/top-5-paises-energias-renovables/>

y almacenamiento del agua lluvia y un medio que permita el aprovechamiento de la energía recolectada y la transforme en fluido eléctrico. Este sistema de generación de energía es limpia, renovable y busca como las otras energías, solventar los problemas presentes en el país y el mundo.

Figura 1. Mapa del Chocó Biogeográfico Colombiano



Fuente: INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AMBIENTAL DEL PACÍFICO (IIAP), Instituto de investigaciones Ambiental del pacífico (IIAP), [en línea]. [3, septiembre 2017]. Disponible en: <https://www.emaze.com/@AQOCRORI>.

1. EL DESAFIO DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DEL AGUA-LLUVIA

Colombia es un país que contiene contrastes climáticos extremos que van desde los desiertos en el Huila y el norte de la Guajira, hasta las heladas cumbres de los nevados, además de poseer zonas selváticas con gran pluviosidad como lo es el Choco biogeográfico(ver Figura 1), conocida en términos coloquiales como el Pacifico, la cual presenta una de las mayores precipitaciones del mundo, llegando hasta 12.892 milímetros de lluvia en el año, tal y como sucede en el municipio de López en el Cauca². Esta zona presenta una serie de deficiencias sociales, ecológicas y económicas, entre las cuales destaca el precario suministro eléctrico en la zona, abastecido por electrificadoras regionales como DISPAC y CEDELCA, por lo cual se plantea la posibilidad de buscar en su gran pluviosidad, una fuente de energía alternativa que supere dicha deficiencia.

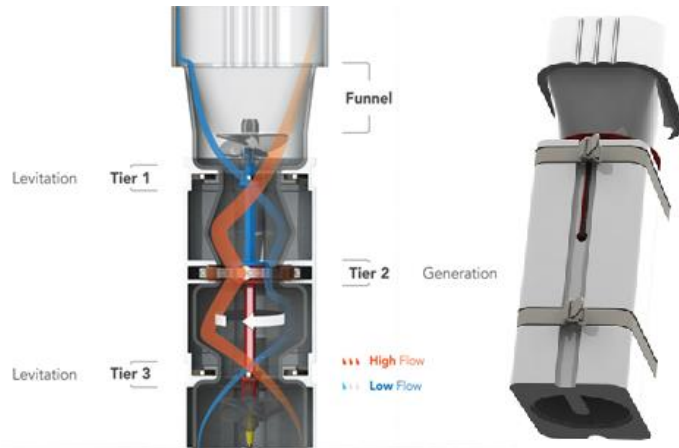
Adicionalmente, las recientes catástrofes climáticas han dejado en evidencia la rápida degradación del medio ambiente a nivel mundial, generando gran preocupación de como suplir la demanda energética mundial. Por consiguiente, se está en proceso de búsqueda de nuevas fuentes de energía alternas; entre las cuales destacan la ya conocida energía solar. Sin embargo, dicha fuente presenta limitaciones climáticas y geográficas, como sucede en zonas de alta pluviosidad, como lo es la región del choco biogeográfica.

Una solución a esta problemática del precario suministro de energía se dará mediante el desarrollo de una planta de energía “pluvio-eléctrica”, que se adapte como un complemento a la red doméstica de los municipios del pacifico colombiano, que aproveche la energía proveniente de la lluvia, permitiendo a su vez contribuir

² DAVIS, Ella. ¿Cuál es el lugar más húmedo del planeta? *BBC Earth* [en línea]. 2015. [20 Octubre 2017]. Disponible en: http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/09/150904_vert_earth_finde_lugar_mas_humedo_planeta

con la investigación y avance de nuevas tecnologías sostenibles. Dicha tecnología ya ha sido implementada de distintas maneras en varios países, cuya complejidad abarca desde sistemas improvisados, hasta el desarrollo de sistemas elaborados cuya implementación ha arrojado resultados satisfactorios en países como: Estados Unidos., México e India (ver figura 2 y 3).

Figura 2. Micro-turbina de flujo axial (EE.UU).



Fuente: SAVANNAH COLLEGE OF ART AND DESIGN, Rainfall energy harvester disguised as a pipe insert(REGN), [en línea]. [15 Febrero 2018]. Disponible en: <http://quillasophink.com/oeuvre/regn/>.

Figura 3. Sistema de generación a partir de agua lluvia implementado un edificio residencial. (India)



Fuente: AL AMIN, Rashed; TALUKDER, Samioul Hasan. Introducing Pico Hydro From Daily Used Water And Rain Water.Mymensingh, Bangladesh. Int. Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol 4, issue 1(Version 2), 2014. Pp. 382-385.

2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Con el desarrollo del diseño de la planta de energía “pluvio-eléctrica”, se espera una serie de beneficios, entre los cuales se destaca la implementación de un nuevo sistema, que solventará las necesidades energéticas en la población vulnerable del pacífico colombiano, bien sea como complemento de la red energética doméstica reduciendo su consumo y a su vez las tarifas, o como un suministro permanente a comunidades que no sean cubiertas por el servicio de los distribuidores de energía. Simultáneamente permitirá el aprovechamiento del agua de la planta para uso doméstico, limitando así el gasto de agua potable de la red solamente para el consumo humano, permitiendo un ahorro significativo del preciado líquido.

Además, el diseño de la planta traerá consigo la oportunidad de abrir un campo de investigación, hacia la implementación e integración de nuevas alternativas de energías renovables para la preservación del medio ambiente, empleando la transferencia de tecnologías ya existentes bajo un nuevo enfoque, logrando el desarrollo de métodos divergentes de los actualmente utilizados en nuestro medio, permitiendo así, el aprovechamiento de una fuente energética subutilizada, siendo una opción sustentable que aporte grandes beneficios a diferentes comunidades de nuestro país.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Cumplir con la Misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander empleando la transferencia y el desarrollo de tecnologías para realizar el diseño y análisis de un sistema “pluvio-eléctrico”, contribuyendo a promover una cultura orientada al aprovechamiento racional de la energía y la conservación de los recursos naturales.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una turbina que cumpla con las especificaciones requeridas del sistema: operando en un rango de 5 a 20 LPS y altura energética entre 6 a 15 m (a implementar en residencias de 2 a 5 pisos, que genere de 0.1 a 1 Kw, nivel típico de una nano-central.
- Desarrollar un sistema de almacenamiento de agua-lluvia adecuado que contemple un control de apertura y cierre del tanque para regular la descarga hacia la turbina, el cual pueda almacenar un volumen de entre 1 y 10 m³.
- Seleccionar un sistema de generación, almacenamiento y distribución del fluido eléctrico a la línea doméstica. El cuál sea capaz de soportar una potencia de hasta 1 Kw. Tensión de trabajo: 24 voltios y una batería mínima de 24 voltios, 800Ah.
- Realizar un análisis técnico-económico que determine la viabilidad financiera del proyecto, empleando un valor presente neto, la tasa de retorno y payback como criterios a evaluar.
- Construir un modelo funcional que ejemplifique el comportamiento del sistema de manera demostrativa.
- Redactar un manual de funcionamiento del sistema diseñado que indique:
 - Especificaciones del sistema, instalación y guía de funcionamiento.
 - Plan de mantenimiento recomendado de la turbina.
 - Tabla de generación de energía según la precipitación.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

4.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD Q.F.D.

Consiste en una metodología que toma los requerimientos del cliente y define las características de diseño establecidas por el ingeniero; a cada criterio se le asigna un valor de la relación con el requerimiento siendo: 9 alta relación, 3 media relación, 1 baja relación y 0 relación nula. A su vez, se les establece una prioridad a los requerimientos, según la consideración del cliente mismo, posteriormente se realiza el producto de la relación con la prioridad en otra matriz, realizando la sumatoria de los resultados de cada criterio y así determinar los 6 más decisivos.

4.1.1 Requerimientos del Consumidor

- Generación de energía: Referente a la cantidad de energía que puede suministrar el sistema.
- Costo: Referente al valor final de la implementación del sistema.
- Tamaño: Referente al volumen que ocupará todo el sistema.
- Seguridad: Implica no presentar riesgos físicos tanto para los usuarios.
- Garantía y durabilidad: Hace referencia al tiempo de vida que se espera del sistema.
- Salubridad y ambiente. Implica que el sistema no genere riesgos a la salud de los usuarios y que no afecte el ambiente del lugar de implementación (Evitando la cría de mosquitos, olores ofensivos, Entre otros factores).
- Ruido: Referente a la cantidad de sonido emitido por el sistema al operar y no genere afectaciones en el confort de los usuarios.
- Operación intuitiva: Referente al fácil uso del sistema por parte del usuario.
- Facilidad de mantenimiento: Implica que las acciones de mantenimiento que requiera el sistema, puedan ser realizadas con facilidad por el usuario.
- Estética: Implica que el sistema cuente con una figura estilizada agradable a la vista.

4.1.2 Criterios del Diseñador

- Economía: Referente al costo de la implementación del sistema, incluyendo el proceso de manufactura.
- Cumplimiento de normas: Referente a la cantidad y complejidad de las normas que debe cumplir el sistema.
- Mantenimiento: Se refiere a la complejidad que puede llegar a presentar la manutención de dicho sistema.
- Impermeabilización: Referente a la superficie que debe de ser impermeabilizada.
- Disposición final del agua: Evalúa el uso que se le dará al agua después de emplearla en la generación de energía.
- Estructuras adicionales: Referente a la cantidad de elementos que se le deberán agregar a la edificación ya existente para ser compatible con el sistema.
- Energía generada: Evalúa la cantidad de energía que puede llegar a suministrar el sistema.
- Reutilización del agua lluvia: Evalúa la manera de disponibilidad del agua después de ser utilizada en el proceso de generación eléctrica.
- Manufactura: Evalúa la dificultad de producir dicho sistema.
- Resistencia a condiciones climáticas: Capacidad del sistema a soportar posibles anomalías climáticas como tormentas o vendavales.
- Estética y confort: Referente a que el sistema resulte agradable y atractivo para los usuarios.
- Dimensiones y magnitudes: Referente a las características físicas del sistema.
- Área de acción: Área o superficie que abarcaría el sistema.

A partir de los criterios decisivos se evaluaron distintas alternativas para solucionar el problema, dicho proceso de selección y descripción de la opción seleccionada se encuentra registrado en el anexo A.

4.2 MATRIZ CALIDAD

Tabla 1. Matriz de Calidad

REQUERIMIENTOS	CRITERIOS													
	PRIORIDAD	Economía	Cumplimiento de normas.	Mantenimiento.	Impermeabilización del techo	Disposición final del agua	Energía generada	Reutilización del agua lluvia	Manufactura	Resistencia a condiciones climáticas.	Estética y confort	Dimensiones y magnitudes	Estructuras adicionales	Área de acción
Generación de energía	10	3	3	1	3	1	9	9	1	1	0	9	1	9
Costo	9	9	3	3	3	9	9	3	9	3	9	9	9	3
Tamaño	8	9	3	1	1	9	9	1	9	3	3	9	9	9
Seguridad	7	3	9	9	0	3	0	0	3	9	0	3	9	0
Garantía y Durabilidad	6	9	3	9	3	3	3	3	3	9	0	0	1	0
Salubridad y ambiente	5	9	9	9	3	9	0	1	0	3	0	0	3	3
Operación intuitiva	4	0	1	3	1	9	3	3	0	1	9	3	1	1
Ruido	3	1	9	9	1	0	3	1	3	3	9	1	0	0
Facilidad de Mantenimiento	2	3	3	9	3	1	3	3	9	1	0	9	3	9
Estética	1	9	0	0	3	9	0	0	9	0	9	3	9	3

Tabla 2. Matriz de Calidad Tabulada

REQUERIMIENTOS	CRITERIOS												
	Economía	Cumplimiento de normas.	Mantenimiento.	Impermeabilización del techo	Disposición final del agua	Energía generada	Reutilización del agua lluvia	Manufactura	Resistencia a condiciones	Estética y confort	Dimensiones y magnitudes	Estructuras adicionales	Área de acción
Generación de energía	30	30	10	30	10	90	90	10	10	0	90	10	90
Costo	81	27	27	27	81	81	27	81	27	81	81	81	27
Tamaño	72	24	8	8	72	72	8	72	24	24	72	72	72
Seguridad	21	63	63	0	21	0	0	21	63	0	21	63	0
Garantía y Durabilidad	54	18	54	18	18	18	18	18	54	0	0	6	0
Salubridad y ambiente	45	45	45	15	45	0	5	0	15	0	0	15	15
Operación intuitiva	4	36	36	4	0	12	4	12	12	36	4	4	4
Ruido	0	3	9	3	27	9	9	0	3	27	9	0	0
Facilidad de Mantenimiento	6	6	18	6	2	6	6	18	2	0	18	6	18
Estética	9	0	0	3	9	0	0	9	0	9	3	9	3
Total	322	252	270	114	285	288	167	241	210	177	298	266	229

5. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DEL PROBLEMA DE LA GENERACIÓN “PLUVIO-ELECTRICA”

5.1 CARACTERÍSTICAS DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA

5.1.1 Energías renovables. Energías de fuentes “inagotables”, capaces de regenerarse naturalmente, en un periodo de tiempo relativamente bajo .

- Energía solar: Emplea paneles solares para obtener energía eléctrica o calentar agua de una manera ecológica.
- Biomasa: Energía almacenada en el proceso de fotosíntesis, que puede llegar a ser transformada en energía térmica o eléctrica, comúnmente es de origen vegetal.
- Energía eólica: Fuente energética proveniente de las fuerzas de los vientos, aprovechando su energía cinética.
- Energía geotérmica: Aprovechamiento del calor del interior de la Tierra.
- Energía mareomotriz: Energía producida por las fuerzas de las olas, mareas, salinidad y diferencias de temperatura del océano.
- Energía Hidráulica: Aprovechamiento de la energía cinética o potencial de los saltos de agua.

5.1.2 Centrales hidroeléctricas. Lugares diseñados con el objetivo de transformar la energía hidráulica en energía eléctrica, y así poder abastecer las necesidades energéticas de una comunidad. Por lo general están compuestas de una turbina, un alternador, un transformador, entre otros elementos. La tabla 3, menciona la clasificación correspondiente para las centrales hidroeléctricas según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

Tabla 3. Tipo de centrales hidroeléctricas según OLADE.

Potencia (KW)	Tipo
Vatios hasta 1 KW	Nanocentral
1 KW hasta 5 KW	Picocentral
5 hasta 50 KW	Microcentral
50 hasta 500 KW	Minicentral
500 hasta 5000 KW	Pequeña central

Fuente: INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS, “Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas”, Santafé de Bogotá, 1997. Comúnmente, toda central hidroeléctrica que genere un valor menor o igual a 5 MW se clasifica como pequeña central³.

5.1.2.1 Tipos de pequeñas centrales hidroeléctricas⁴. Este tipo de centrales hidroeléctricas están condicionadas por las diferentes características que posee el lugar donde se desea instalar (salto y caudal), como se observa en la tabla 4. Es importante tener presente muchos factores, como la pluviosidad.

Tabla 4. Tipo de caída en las pequeñas centrales hidroeléctricas.

Tipo de caída	Salto
Alta caída	Más de 100 m
Media caída	30 a 100 m
Baja caída	2 a 30 m

Fuente: SECRETARIA DE ENERGÍA, Energías Renovables 2008-Pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, Argentina, 2008.

³ Instituto de ciencias nucleares y energías alternativas, “Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas”, Santafé de Bogotá, 1997.

⁴ Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), “Manuales de Energías Renovables- Minicentrales Hidroeléctricas”, Madrid, España, Octubre de 2006.

- Central de pie de presa: Aprovechamiento con posibilidad de embalse en el cauce del río, se puede controlar el caudal.
- Central de agua fluyente: Se logra desviar una cierta parte del caudal del río, para llevarlo hasta donde se encuentra la turbina por medio de canales.
- Central hidroeléctrica en canal de riego: Utilizan los desniveles que tiene el propio canal o con el curso del río.

5.1.3 Maquinas hidráulicas⁵. Dispositivos con finalidad de convertir la energía hidráulica en energía mecánica; Pueden ser de dos tipos, turbinas (motrices) o bombas (generatrices), como se menciona en la tabla 5, cuya función principal es la modificación de la energía total que trae el flujo que la atraviesa. En la mayoría de los casos de estudio, no es necesario el análisis térmico. En estas máquinas se suele dar el intercambio de energía mediante un mecanismo de revolución, dicho modelo contiene ruedas (rodetes o rotores), provistas de alabes que permiten el flujo de agua y así obtener la energía deseada.

Tabla 5. Clasificación de las turbo-máquinas hidráulicas.

TURBOMAQUINAS		
Motrices	Generatrices	Reversibles
Transforman energía hidráulica en mecánica (Turbinas y ruedas)	Transforman energía mecánica en hidráulica (Bombas)	Cumplen funciones específicas, puede ser motriz o generatriz.

Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.

⁵ FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.

- Grupos de transmisión o acoplamiento: Combinación de máquinas motrices y generatrices (turbina-bomba), alimentadas por un fluido, en general aceite.

5.2 TURBINAS HIDRÁULICAS⁶

Máquinas hidráulicas que transforman la energía del agua en energía mecánica rotacional, se compone de tres elementos fundamentales que el fluido va atravesando, los cuales son:

- El difusor, recupera parte de la energía cinética a la salida del rodete. Si la turbina no tiene, se le llama escape libre.
- El distribuidor, dirige el agua desde la entrada de la maquina hacia la entrada del rodete, en otras palabras, regula el caudal que entra a la turbina. También tiene la capacidad de transformar la energía de presión en energía de velocidad.
- El rodete es el elemento fundamental de una turbina, contiene alabes que permiten dar el intercambio de energía entre el agua y la maquina hidráulica.

⁶ FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.

5.2.1 Clasificación de las turbinas hidráulicas. La clasificación de las turbinas dependiendo a la entrada del flujo, se detalla más en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de las turbinas hidráulicas.

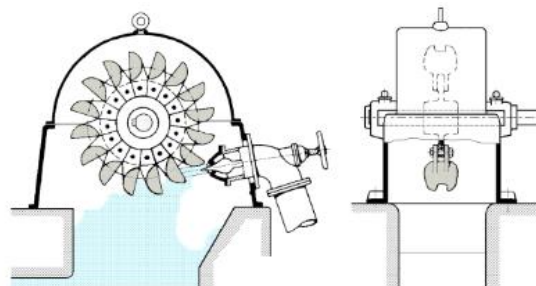
TURBINAS HIDRÁULICAS			
Axiales	Radiales	Mixtas	Tangenciales
Flujo de agua entra paralelo al eje (Kaplan, Hélice, Bulbo)	Flujo de agua entra perpendicular al eje (Francis)	Combinación de turbinas axiales y radiales	El agua ingresa tangencialmente contra las palas (Pelton)
<p>El diagrama muestra tres tipos de turbinas: 1. Axial: un rodete con un distribuidor que permite el flujo de agua paralelo al eje de rotación. 2. Radial: un rodete con un distribuidor que permite el flujo de agua perpendicular al eje de rotación. 3. Tangencial: un rodete con un distribuidor que permite el flujo de agua tangencialmente contra las palas.</p>			

Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.

5.2.1.1 Turbina de acción. En este tipo de turbina, el agua sale del distribuidor a la presión atmosférica, llegando al rodete con la misma; por consiguiente, toda la energía potencial del salto se transmite al rodete en forma de energía cinética. El empuje y la acción del agua coinciden.

- Turbina Pelton: Caracterizada por ser de tipo tangencial. Turbina empleada para saltos elevados y poco caudal. El agua entra por medio de uno o varios inyectores.

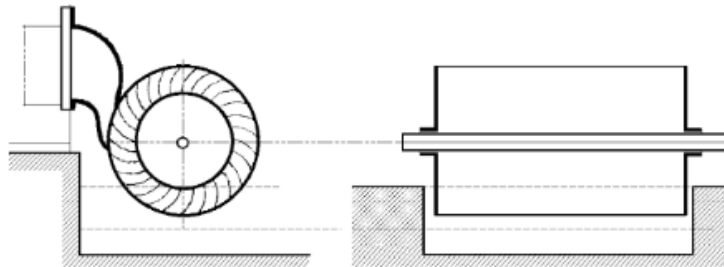
Figura 4. Turbina Pelton.



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.

- Turbina Michell-Banki: Se fundamenta en la capacidad que tiene el agua de poder pasar dos veces por los alabes del rodete, construido en forma de tambor, se utiliza para pequeños y grandes saltos. La eficiencia rodea entre 70 a 84%⁷. También es conocida como turbina de flujo cruzado u Ossberger.

Figura 5. Turbina Michael-Banki.



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.

- Turbina Turgo (1919): Diseñada para saltos de desnivel medio, es una modificación de la turbina Pelton, la transferencia de energía ocurre en la tobera de entrada, tiene rendimientos mayores de 90% con menores costos del generador y de la instalación; beneficiosa para instalaciones hidráulicas pequeñas.

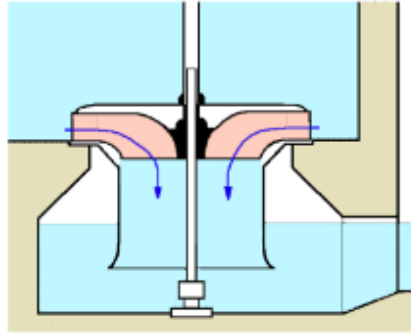
5.2.1.2 Turbina de reacción. El agua en este tipo de turbina sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que atraviesa los alabes del rodete, de forma que, a la salida, la presión puede ser nula o incluso negativa; en otras palabras, el agua circula a presión en el distribuidor y en el rodete, por lo tanto, la energía potencial del salto se convierte, una parte en energía cinética, y la otra, en energía de presión. El empuje y la acción del agua son opuestas.

- Turbina Francis (1849): Caracterizada por ser radial centrípeta, con tubo de aspiración (difusor); el rodete es de fácil acceso, por lo que la hace una turbina muy práctica. Es fácilmente regulable y funciona a diversos números de

⁷ Soluciones prácticas ITDG, "Ficha Técnica Turbina Michell-Banki", Lima, Perú, [en línea]. [25 Enero 2018]. Disponible en: : www.solucionespracticas.org.pe

revoluciones; es el tipo de turbina más utilizado en la actualidad y se utiliza fundamentalmente para saltos variables (0.5 m a 180 m).

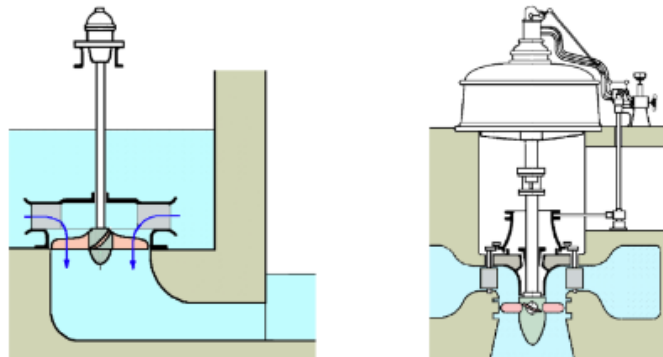
Figura 6. Turbina Francis.



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.

- Turbina Kaplan (1912): Caracterizada por poseer unas palas en el rodete que tienen forma de hélice (palas fijas); se emplea en saltos de pequeña altura y gran caudal, obteniéndose con ella elevados rendimientos.

Figura 7. Turbina Kaplan.



Fuente: FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.

5.3 RANGOS DE UTILIZACIÓN Y RENDIMIENTOS DE LAS TURBINAS⁸

El rango de uso de cada tipo de turbina depende del salto y del caudal que posee el lugar de operación. El rendimiento de la turbina depende principalmente del caudal de funcionamiento que se encuentra en el lugar de instalación de la central hidroeléctrica, no obstante, también depende del salto. Es importante tener presente el concepto de potencia nominal, que significa la máxima potencia producida por el generador en condiciones de diseño. En todo proyecto hidroeléctrico, debido a la falta de datos para poder estimar el rendimiento del sistema, inicialmente se asume un 95% para condiciones de diseño.

$$P_N = 9.81 * Q_N * H_N * R_t * R_g \quad (1)$$

P_N : Potencia nominal en KW.

Q_N : Caudal de equipamiento en m³/s.

H_N : Salto neto de diseño en m.

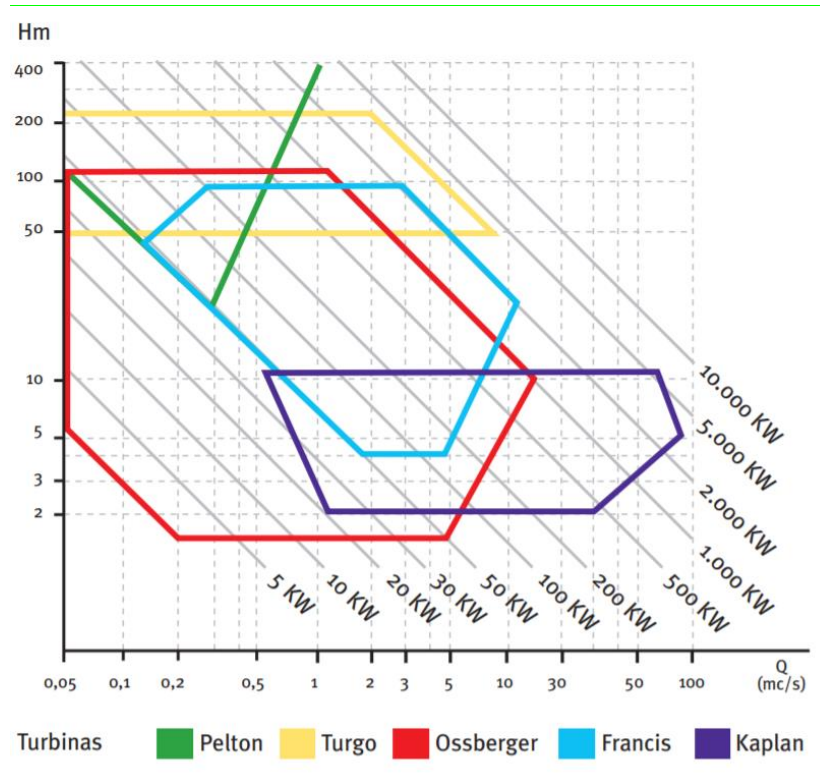
R_t : Rendimiento de la turbina para H_N y Q_N de diseño.

R_g : Rendimiento nominal del generador.

Comúnmente, existen mecanismo para la selección de la turbina convencional como la carta de selección de turbinas, que abarca los rangos tanto de caudal como de altura que tiene cada tipo, siendo una herramienta muy útil a la hora de tomar decisiones (Ver figura 8).

⁸ INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE), "Manuales de Energías Renovables- Minicentrales Hidroeléctricas", Madrid, España, Octubre de 2006.

Figura 8. Diagrama de rangos de operación de distintos tipos de turbinas.



Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE), “Manuales de Energías Renovables- Minicentrales Hidroeléctricas”, Madrid, España, Octubre de 2006.

5.4 COSTOS DE INVERSIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA⁹

Los costos dependen de muchos factores como orografía del terreno, los accesos, el tipo de instalación, el tamaño, entre otros: en los últimos tiempos se ha demostrado unos estándares que permiten identificar el porcentaje de inversión de cada parte como se puede observar en la Tabla 7.

⁹ INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE), “Manuales de Energías Renovables- Minicentrales Hidroeléctricas”, Madrid, España, Octubre de 2006.

Tabla 7. Costos típicos de un sistema de generación hidroeléctrico.

Grupo turbogenerador	30%
Equipos eléctricos, regulación, control y línea	22%
Ingeniería y dirección de obra	8%
Obra civil	40%

Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE), “Manuales de Energías Renovables- Minicentrales Hidroeléctricas”, Madrid, España, Octubre de 2006.

Para finalizar el proceso de funcionamiento de la central hidroeléctrica, se debe analizar los gastos de mantenimiento y reparación, que vienen correlacionados con costos de personal, materiales de repuestos, seguros e impuestos. El cálculo de estos costos se realiza anualmente y depende de factores como el tipo de instalación, el grado de automatismo e índice de averías. Se pueden estimar que estos gastos equivalen del 2 al 5% de la inversión a realizar.

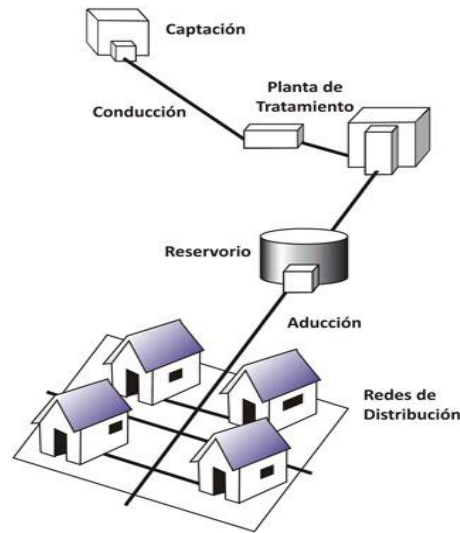
5.5 RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Permite captar, almacenar, tratar y distribuir el agua en condiciones aptas para consumo, a partir de una fuente hídrica. Dicha fuente puede ser:

- Agua de manantiales.
- Agua de mar, la cual implica la desalinización.
- Agua superficial, como ríos, embalses o lagos.
- Agua subterránea, proveniente de acuíferos.
- Otras fuentes como piscinas artificiales, aljibes o tanques de recolección.

El proceso puede ser dividido en 4 etapas; captación y almacenamiento de agua bruta, tratamiento del agua, almacenamiento del agua tratada y distribución por medio de conducciones, dichas etapas pueden observarse en la figura 9.

Figura 9. Partes de una red de abastecimiento de agua.



Fuente: BEDOYA, Fernando. Obras Civiles, [en línea]. [25 Febrero 2018].
 Disponible en: http://fernando-teg-obrasciviles.blogspot.com/p/acueductos_24.html.

5.6 MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO DE AGUA¹⁰

Tabla 8. Métodos de almacenamiento de agua.

Deposito	Recipiente diseñado para soportar una presión interna manométrica superior a 98 kPa ($1 \frac{Kg}{cm^2}$).
Tanque:	Recipiente diseñado para soportar una presión interna manométrica no superior a 98 kPa ($1 \frac{Kg}{cm^2}$).
Tanque atmosférico	Recipiente diseñado para soportar una presión interna manométrica de hasta 15 kPa ($0'15 \frac{Kg}{cm^2}$), No se utilizan para almacenamiento de líquidos a su temperatura de ebullición o superior.

¹⁰ MAPFRE, "Depósitos y tanques: Tipos, mantenimiento y causas de rotura o deterior", [en línea]. [15 Febrero 2018]. Disponible en: https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/imagen_id.cmd?i_dimagen=1030494

Tanque a baja presión	Recipiente diseñado para soportar una presión interna manométrica superior a 15 kPa ($0'15 \frac{Kg}{cm^2}$) y no superior a 98 kPa ($1 \frac{Kg}{cm^2}$).
Tanque de techo flotante	Recipiente con o sin techo fijo que lleva una doble pared horizontal flotante o una cubierta metálica, soportada por flotadores metálicos estancos (que pueden mantenerse a flote aún con la mitad de los flotadores perforados).
Venteo	Sistema diseñado para prevenir los efectos de las alteraciones bruscas de la presión interna de un tanque de almacenamiento, como consecuencia de las operaciones de trasvase o de las variaciones de temperatura ambiente.
Cubeto	Recipiente abierto que contiene en su interior algunos elementos de almacenamiento y cuya misión es retener los productos contenidos en estos elementos, en caso de rotura de los mismos o de funcionamiento incorrecto del sistema de trasiego o manejo.
Depósitos de doble pared	Depósito construido con dos paredes y fondos dobles, separados uno de otro por un material intermedio, el cual crea un espacio con intersticios que permite la detección de fugas.
Sistema de almacenamiento subterráneo de agua	Alimenta un acuífero para poder extraer el agua posteriormente mediante un pozo.

5.7 GENERADOR ELÉCTRICO

Dispositivo que transforma la energía mecánica en energía eléctrica, empleando un campo magnético que produce un movimiento de electrones, al girar una bobina conductora entre los polos de un imán, produce una variación en el flujo del campo magnético y una fuerza electromotriz que induce una corriente eléctrica alterna.

5.7.1 Clasificación de generadores según la corriente suministrada.

Tabla 9. Clasificación de generadores según el tipo de corriente.

CORRIENTE ALTERNA	CORRIENTE CONTINUA
Genera un voltaje variable en el tiempo con una frecuencia determinada por la legislación nacional, en el caso de Colombia es de 60hz, es empleado para uso cotidiano	Genera un voltaje constante y pequeño, es empleado para sistemas de menores dimensiones, implica la utilización de baterías e inversores para convertir la alimentación a corriente alterna.

5.7.2 Generador de imanes permanentes (PMG). Generador cuyo bobinado ha sido sustituido por un sistema de imanes permanentes que suministra un campo de excitación constante. Por lo cual, al cargar el generador, la tensión cae sin opción de regulación, es empleado cuando se presentan caídas de tensión y aplicado para la generación eólica.

5.8 LEGISLACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE AGUA

- DECRETO NÚMERO 1575 DE 2007 (mayo 9) ¹¹

Por el cual se establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para consumo humano. Este artículo aplica a todas las personas que busquen suministrar o distribuir agua para consumo humano, ya sea cruda (agua natural que no ha sido sometida a proceso de tratamiento para su potabilización) o tratada.

¹¹COLOMBIA, MINISTERIO DE PROTECCION SOCIAL. "Decreto 1575 de 2007". Bogotá, 2007.

- LEY 1715 de 2014¹²

Esta norma establece la debida regulación para la integración de las energías renovables no convencionales al sistema Energético Nacional, promueve el desarrollo y la utilización de dichas fuentes energéticas, fomenta la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías relacionadas con el tema.
- Ley 142 de 1994

“Establece estímulos por parte del gobierno para los usuarios que consumen gas combustible en particular, con el objetivo de atender el uso de fuentes alternativas de energía.”¹³
- Ley 143 de 1994

“Establece el sistema para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el país, la norma establece la potente del Ministro de Minas y Energías que tiene para definir criterios económicos para la utilización convencional o no convencional de energía en un marco eficiente y sostenible para el país.”¹⁴

¹²COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPUBLICA. “Ley 1715 de 2014”. Bogotá, 2014.

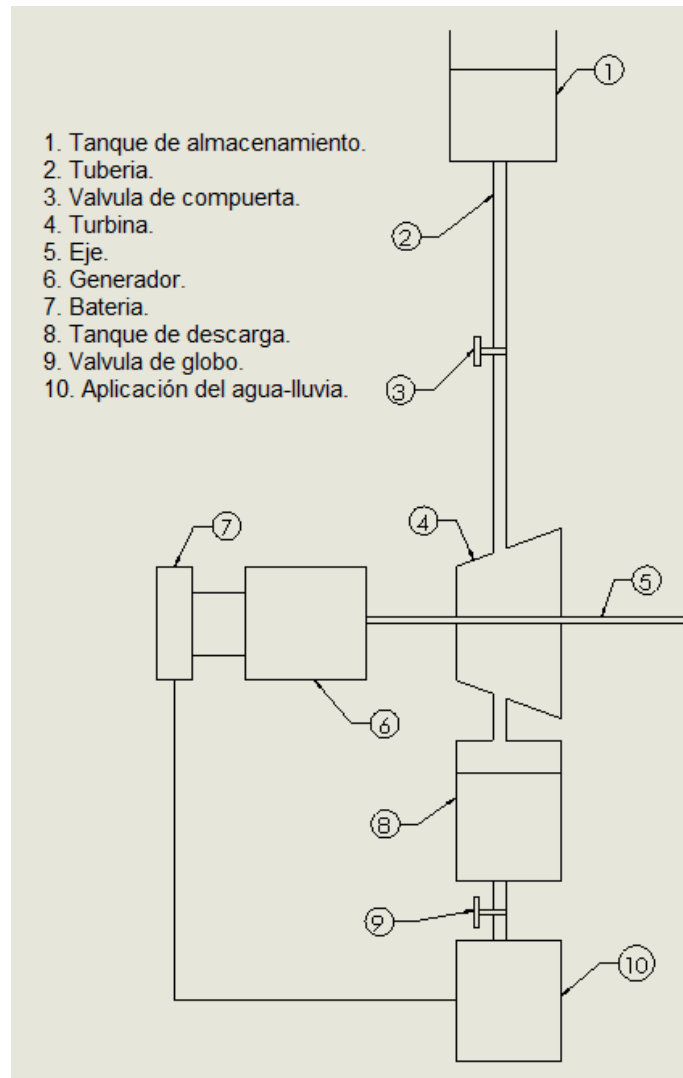
¹³ Gualteros, Martha Viviana y Hurtado, Enrique. (2013). “Revisión de las regulaciones e incentivos para el uso de las energías renovables en Colombia”. JURÍDICAS. No. 1, Vol. 10, pp.209-224. Manizales: Universidad de Caldas.

¹⁴ Gualteros, Martha Viviana y Hurtado, Enrique. (2013). “Revisión de las regulaciones e incentivos para el uso de las energías renovables en Colombia”. JURÍDICAS. No. 1, Vol. 10, pp.209-224. Manizales: Universidad de Caldas.

6. DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA PLUVIO-ELÉCTRICO

Con el objetivo de permitir un avance en la investigación de nuevas energías alternativas, conservación del medio ambiente y mejora de la calidad de vida de las comunidades; se plantea el desarrollo de un sistema “pluvio-eléctrico” para la región del choco biogeográfico colombiano; el cual comprende elementos que permiten el filtrado y almacenamiento del agua-lluvia más el complemento de la generación de energía eléctrica empleando dicho fluido. La representación conceptual puede observarse en la Figura 10.

Figura 10. Esquema de la central “Pluvio-eléctrica”.



Las condiciones geográficas y climáticas de la región del Choco Biogeográfico Colombiano, hacen oportuno el desarrollo de este nuevo sistema de generación energética, siendo una de las zonas con los más altos niveles de pluviosidad al año en el mundo, a su vez la presencia de un coliseo en esta zona, es una gran oportunidad para implementar este tipo de sistema, puesto que presenta una amplia superficie de recolección, una altura relativamente elevada y un consumo de agua menor a edificaciones de varios pisos como lo son los departamentos.

El sistema de generación de energía a base de agua-lluvia, está compuesto principalmente de:

- Superficie de recolección: Elemento que recolecta el agua-lluvia en un área comprendida de un edificio a trabajar, debe tener la capacidad de transportar el agua hasta el filtro y posteriormente al tanque. Comúnmente sería el mismo techo de la edificación.
- Filtro: Componente que cumple el objetivo de separar los contaminantes sólidos que puede tener el agua-lluvia en el momento de ser recolectada en la superficie, permitiendo que solo el líquido pueda pasar al tanque de almacenamiento.
- Tanque de almacenamiento: Contenedor que permite el almacenamiento del agua-lluvia hasta cierto nivel; estará ubicada en la parte superior de la edificación y comprenderá todo el perímetro del mismo; permitiendo la distribución de la carga del agua; incluyendo un sistema de control.
- Control de nivel en el tanque de almacenamiento: Elemento electrónico que permite identificar cuando el tanque tiene el nivel deseado para trabajar y da apertura a la válvula.

- Válvula de Compuerta: Elemento que permite el paso del flujo hacia la turbina.
- Tubería: Sistema que permite el transporte de agua-lluvia por medio de la gravedad, del tanque de almacenamiento hacia la turbina hidráulica.
- Turbina hidráulica: Sistema que permite la transformación de la energía de presión del agua-lluvia en energía mecánica de rotación; dicha turbina está comprendida de dos elementos: el rodete, encargado de la transformación de la energía, diseñado para que el agua pueda pasar por el mismo, este elemento va acoplado al eje de la turbina y el Inyector, el cual tiene la función de dirigir el agua desde la entrada de la turbina hasta el rodete.
- Generador: Dispositivo que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica; está acoplado directamente al eje de la turbina para aumentar la eficiencia mecánica al máximo.
- Baterías: Elemento interconectado con el generador que permitirá el almacenamiento de energía eléctrica.

7. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS

Todos los cálculos tipo realizados con las ecuaciones del presente capítulo, se encuentran estipuladas en el anexo B, además el sistema de ecuaciones es resulta mediante el programa EES presente en el anexo C.

7.1 PARÁMETROS GENERALES

El sistema diseñado requiere la determinación de ciertos parámetros de operación para su dimensionamiento; por consiguiente, como punto de partida se emplean los rangos estipulados en los objetivos, la turbina deberá poseer un Caudal de operación de 5 a 20 L/s , un salto entre 6 a 15 m y ser capaz de generar una potencia contenida entre 0.1 a 1 kW , además el sistema deberá contar con un tanque de almacenamiento con capacidad de 1 a 10 m^3 .

7.1.1 Cálculo de las dimensiones del edificio

Figura 11. Dimensiones del Coliseo.



Fuente: GOOGLE LLS; Mapa del coliseo del Pueblo Tumaco, [en línea]. [21 Noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Coliseo+Del+Pueblo/@1.8073303,-78.764204,307m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e2d0211ed996755:0x9c47386917ebe473!8m2!3d1.8073351!4d-78.7638466>.

Para la obtención de los parámetros de la edificación tales como área, altura y perímetro, se precisó de la herramienta informática Google Maps, que posee la capacidad de ubicar el lugar y estimar dichos valores como se representa en la figura 11, en ella se muestra el coliseo “Del Pueblo” ubicado en el municipio de Tumaco.

7.1.2 Volumen de agua disponible. En primer lugar, fueron seleccionadas 4 posibles zonas para implementar el sistema (ubicadas en la región del chocó biogeográfico): Buenaventura, Tumaco, Popayán y Quibdó. Obteniéndose datos de Pluviosidad Media¹⁵, selección del edificio con su altura y área aproximada del techo; para encontrar la cantidad de agua que será recolectada a lo largo de un año por medio de la ecuación 2.

$$Vol_{año} = Pb * \Omega_T \quad (2)$$

Pb: Pluviosidad Media $\left[\frac{m}{año} \right]$

Ω_T : Area de techo aproximada $[m^2]$

Los resultados se exponen en la tabla10, determinando al “coliseo el cristal” como el que ofrece no solo la mayor altura sino a su vez la mayor área, mostrando una pluviosidad bastante considerable, por lo tanto, presenta la mayor disponibilidad energética, siendo este el criterio decisorio para su selección.

¹⁵ IDEAM, “Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [en línea]. [5 Abril 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>.

Tabla 10. Análisis de Pluviosidad por Ciudad.

CIUDAD	PLUVIOSIDAD MEDIA [m/ AÑO] ¹⁶	LUGAR (COLI-SEO)	ALTURA DE LA EDIFICACIÓN[m] APROX.	ÁREA DEL TECHO [m ²] ¹⁷ APROX	VOLUMEN OBTENIDO POR AÑO [m ³ / año]	VOLUMEN OBTENIDO POR DÍA [m ³ /día]
Buenaventura	6,275	El Cristal	15	4200	26357,52	72,212383
Quibdó	8,130	El Jardín	9	2500	20325	55,684931
Popayán	2,127	La Estancia	9	3600	7657,2	20,978630
Tumaco	2,292	Del Pueblo	9	2000	4584	12,558904

7.1.3 Potencia disponible. El cálculo de la potencia disponible es un criterio fundamental que da una visión inicial de la viabilidad del proyecto, por lo tanto, se busca obtener un valor superior al kilovatio, debido a que la pérdida generada por las distintas eficiencias del sistema (Volumétrica, Mecánica, de transmisión, del generador), podrían llevar a una generación muy inferior de la deseada. Para dicho cálculo se emplea la ecuación 3.

$$Pot = Q * \Delta P \quad (3)$$

Q : Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

ΔP : Cabeza de Altura [Pa]

Para obtener el caudal de trabajo que operará la turbina a una altura de 15 m, se establece una potencia entre 1250 y 1500 vatios, con el fin de que sea cercana a los 1000 vatios; obteniéndose un caudal contemplado entre 0.0085 y 0.0102 [m³/s], se elige 10 [L/s] como el valor deseado.

¹⁶ IDEAM, "Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [en línea]. [5 Abril 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>.

¹⁷ <https://www.google.com/maps/>

7.1.4 Tiempo de operación de la turbina. Debido a que el suministro de agua que se posee es limitado en un día, se calcula el tiempo que llegará a operar la turbina con el caudal hallado anteriormente, empleando un cálculo simple estipulado en la ecuación 4.

$$Q = \frac{Vol}{t} \quad (4)$$

A partir del volumen de agua diario y el caudal seleccionado, se calcula el tiempo de descarga; obteniéndose que la turbina puede llegar a operar aproximadamente 2 horas por día, sin embargo, esta operación no puede ser continua ya que implica la creación de un tanque capaz de almacenar 72 toneladas de agua en el techo de una estructura, por consiguiente, se diseña un tanque de una capacidad máxima de 10 m^3 con el fin de generar 7 ciclos de llenado y descarga del mismo para mover la turbina, cada ciclo de vaciado constará de 17 minutos, dichos ciclos serán regulados por un sistema de control, activándose al momento que el tanque albergue su máxima capacidad y descargue hasta un nivel mínimo, para que siempre haya agua en el sistema de tuberías que alimenta la turbina.

$$t_{descarga} = \frac{72,21[\text{m}^3]}{0,01 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]} = 7221 [\text{s}] \approx 2 \text{ Horas}$$

$$t_{descarga} = \frac{10[\text{m}^3]}{0,01 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]} = 1000 [\text{s}] \approx 17 \text{ minutos}$$

Las características generales del sistema que se definieron se pueden observar en la tabla 11:

Tabla 11. Características Generales del Sistema.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA	
Caudal	10 [LPS]
Altura	15 [m]
Potencia	1,471 [kW]
Tiempo de operación por ciclo	16,7 [min]
Numero de Ciclos por día	7
Volumen del tanque	10 [m^3]

7.1.5 Proceso de selección de la turbina Michell Banki. Se inicia ingresando a la carta de selección de turbinas (ver figura 8). Para las condiciones de diseño del sistema, cuyo caudal rodea los valores de 10 l/s y la altura en un valor de 15 m, solo aparece la posibilidad de aplicación de la turbina Michell-Banki, ya que se aproximan a sus límites de trabajo. Utilizando las leyes de semejanza y mediante una serie de iteraciones, se encontró que en las turbinas Kaplan, Francis y Pelton, los valores de diámetro exterior del rodete y revoluciones no se encuentran en el rango de aplicación, por las altas velocidades específicas recomendadas. Se decidió analizar y adoptar la posibilidad de una turbina Michell-banki, que presenta un rango de aplicación que abarca las condiciones de diseño del proyecto como se ve en la carta de selección. Con el valor de velocidad específica requerida en el proyecto, $N_s = 40.72$, y contrastando con los valores de la tabla 12, incluida en una tesis de investigación¹⁸, se confirma que se puede diseñar una turbina que cumple con la aplicación estipulada del tipo Michell-Banki. El proceso de selección seguido, se ejemplifica mediante un diagrama de flujo en la figura 12.

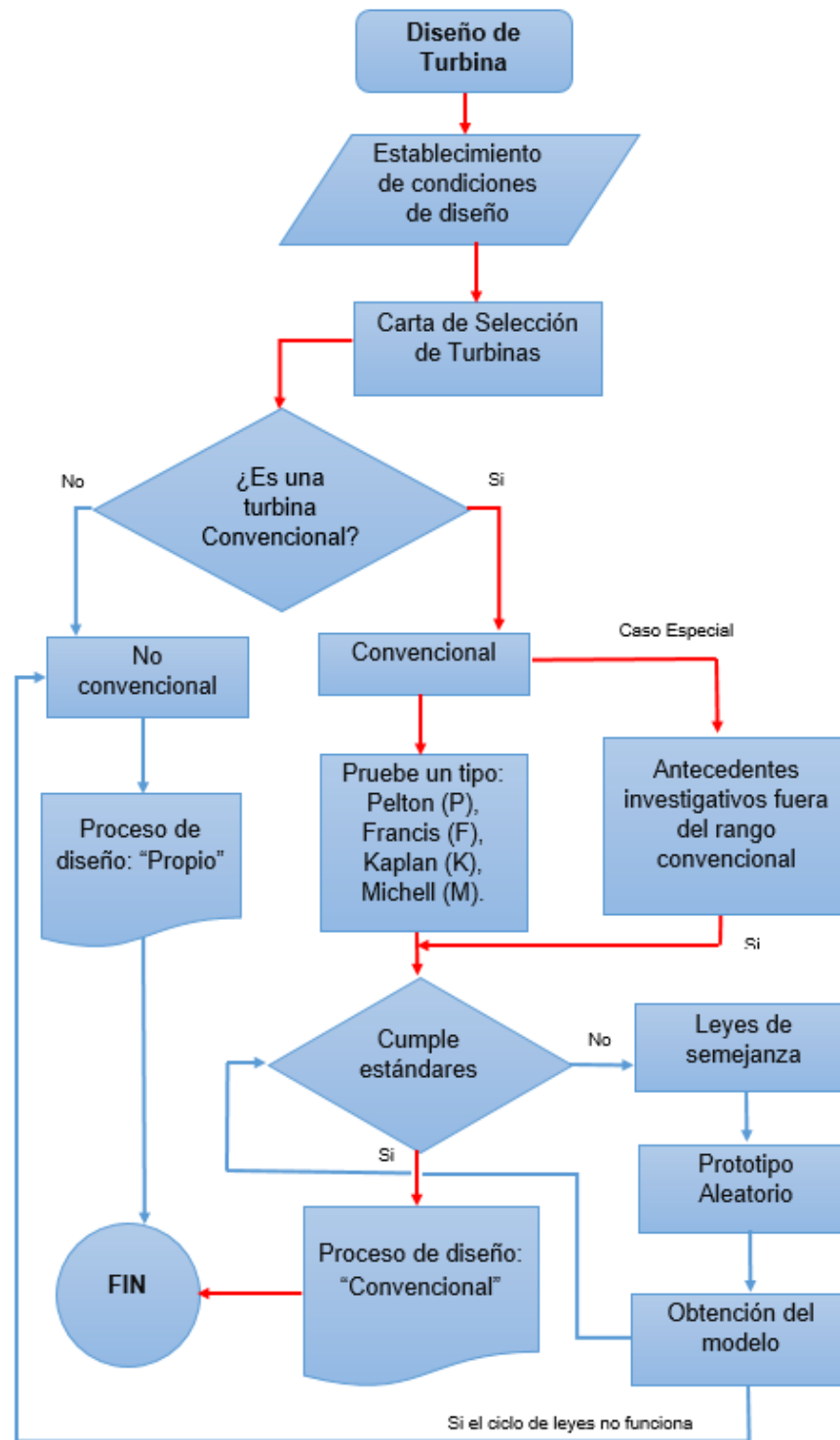
¹⁸ LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCIA GARCIA, José Saúl, "Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomaquinas hidráulicas de la UIS", Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

Tabla 12. Velocidades Específicas de los Distintos Tipos de Turbinas

TIPO DE TURBINA	N_s	N_q
Pelton de una tobera	10 a 29	3 a 8
Pelton de dos o más toberas	29 a 59	8 a 18
Michell-Banki	29 a 220	8 a 68
Francis Lenta	59 a 124	18 a 38
Francis Normal	124 a 220	38 a 68
Francis Rápida	220 a 440	68 a 135
Hélice y Kaplan	342 a 980	105 a 300

Fuente: LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

Figura 12. Diagrama de flujo del proceso de selección de una turbina.



7.2 CÁLCULO DE PERDIDAS DE LA TUBERIA

Para realizar el cálculo de las pérdidas de una tubería, es importante saber el concepto de una red hidráulica, que se define como el sistema que conduce el fluido por una red de tuberías, hasta un lugar donde este cumplirá una función determinada. Las tuberías pueden ser de varios materiales, dependiendo a la presión para la cual están diseñadas, pueden ser metálicas, de hormigón o de materiales compuestos.

El análisis de pérdidas de fricción en la tubería, se realiza con el objetivo de conocer la disipación de energía o de altura piezométrica por el paso de agua mientras avanza por esta; se dividen en dos tipos, aquellas que son provocadas por cortante en la pared de la misma y las que son inducidas por sus componentes. La primera se distribuye a lo largo de la tubería y la segunda se analiza como discontinuidad de la línea piezométrica y en línea de energía, también es conocida como pérdidas menores.

En primer lugar, en el análisis de pérdidas, se deben buscar los parámetros que posee el fluido, comúnmente son la temperatura de operación, presión de operación, viscosidad tanto cinemática como dinámica, entre otros. Algunos de estos parámetros fueron hallados con el programa EES, que se basa en comandos dependientes a la temperatura y presión del lugar. El coliseo seleccionado en la ciudad de Buenaventura tiene una temperatura promedio de 26 °C y una presión de 100 KPa.

$$\rho = \text{DENSITY}(\text{water}, T = T_{op}, P = P_{ref})$$

$$\mu = \text{VISCOSITY}(\text{water}, T = T_{op}, P = P_{ref})$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

$$\gamma = \rho * g \quad (6)$$

Además, se deben introducir los valores del diámetro de la tubería del sistema, longitud, caudal, rugosidad de la tubería (en este caso será PVC), entre otros parámetros que se tengan ya determinados.

$$L_{12} = 15 \text{ m}$$

$$D_{12} = \frac{66}{1000} = 0.066 \text{ m}$$

$$Q_{12} = \frac{10}{1000} = 0.01 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\epsilon = \frac{0.0015}{1000} [\text{m}]$$

Desde el punto de vista académico la ecuación de Darcy-Weisbach, es la más utilizada y la más completa para todos los fluidos. Para implementar esta ecuación, se debe buscar el parámetro adimensional de Reynolds, que indica el grado de turbulencia que presenta el flujo en la tubería.

$$A_{12} = \pi * \frac{D_{12}^2}{4} \quad (7)$$

$$Q_{12} = V_{12} * A_{12} \quad (8)$$

$$Re_{12} = V_{12} * \frac{D_{12}}{\nu} \quad (9)$$

Una vez realizada esta operación, se procede al cálculo del factor de fricción de Darcy para encontrar las pérdidas de fricción de la tubería. Utilizando el comando MoodyChart del EES que requiere como argumentos el valor de Reynolds y la rugosidad relativa se determina dicho coeficiente.

$$f_{12} = \text{MoodyChart}(Re_{12}, \epsilon/D_{12})$$

Luego se encuentra por medio de la ecuación de C.F Colebrook, el factor de fricción a total turbulencia, indicador que permite estimar el valor de las perdidas menores que son producidas por los accesorios instalados en el sistema de tubería.

$$f_{T12} = \left(\frac{\frac{1}{0.86}}{\ln\left(\frac{\epsilon}{\frac{D_{12}}{3.7}}\right)} \right)^2 \quad (10)$$

El proceso para hallar las pérdidas de fricción en la tubería debido al paso del agua (r_{12}) y las perdidas menores debido a los elementos que componen el sistema (m_{12}), es como se representa en las ecuaciones 11 y 12 respectivamente.

$$r_{12} = \frac{8 * f_{12} * L_{12}}{\pi^2 * g * D_{12}^5} \quad (11)$$

$$m_{12} = \frac{8 * K_{12}}{\pi^2 * g * D_{12}^4} \quad (12)$$

La pérdida total del sistema se representa en la siguiente ecuación.

$$DELTAH_{12} = (r_{12} + m_{12}) * Q_{12}^2 \quad (13)$$

Para el cálculo de la constante de perdidas menores, es importante realizar la suma de diferentes valores que ya están estandarizados en el manual de CRANE¹⁹ y su valor depende del accesorio utilizado.

$$K_{12} = \sum k_i \quad (14)$$

En el caso actual, solo se incluyó una válvula de compuerta que permite el paso del líquido y el número 1, puesto que va de tanque al sistema.

$$k_{12} = 0.5 + (8) * f_{T12} + 1$$

¹⁹ CRANE, "Apéndice A: Propiedades físicas de algunos fluidos y características del flujo en Válvulas, accesorios y tuberías", en "Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías", McGraw-Hill, 2012, pág. A-41-49.

7.3 DISEÑO DE LA TURBINA MICHELL-BANKI²⁰²¹

El presente capítulo está basado en los apuntes para un manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), con referente a la turbina Michell Banki, además se incluyeron ecuaciones y conceptos deducidos por los ingenieros mecánicos Tomas Lerzundy Salamanca y José Saúl García García, estipulados en el proyecto de grado “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomaquinas hidráulicas de la UIS”, de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander en el año de 1983.

En primer lugar, se debe establecer unos parámetros que restrinjan los diferentes cálculos que se van a realizar y son de vital importancia al momento de llevar a la práctica, ya sea para reducir espacio de aplicación o costos en el momento de ejecutarlo, estas variables representaran los conceptos básicos que se necesitan en una turbina para identificar otros como: potencia, velocidades específicas y revoluciones por minuto a las que debe trabajar el sistema, además, son parámetros que por lo general se pueden deducir del mismo lugar de ejecución, en este caso, ya que se cuenta con un tanque que podrá regular el caudal, se puede variar dependiendo a la pluviosidad del lugar, como también la altura a la que se encuentre el edificio a utilizar. Basados en lo anterior, se escogieron los siguientes valores y restricción para el presente proyecto:

²⁰ LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

²¹ HERNANDEZ, Carlos, et.al. Apuntes para un Manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas-turbinas Michell Banki, OLADE (Organización Latinoamericana de Energía), 1988.

$$Q = 10 \frac{L}{s} = 0.010 \frac{m^3}{s}$$

$$H_N = 15 \text{ m}$$

$$D_E = 0.20 \text{ m}$$

$$N < 1000 \text{ rpm}$$

Estos parámetros no son definitivos, simplemente son indicadores que ayudan a evidenciar la veracidad de los cálculos correspondientes al sistema, con el fin de llevarlos a la práctica, es decir, el caudal puede variar como también el diámetro exterior del rodete. Con referente a la altura, solamente puede llegar a disminuir por pérdidas en la tubería y accesorios a utilizar; las revoluciones por lo general dependerán del generador a utilizar y el sistema de transmisión de potencia que se vaya a implementar, ya sea correas, engranajes o simplemente un acople directo con el eje de la turbina.

Continuando con los conceptos involucrados en los sistemas de turbo maquinas, se encuentran las velocidades específicas, una depende del caudal a utilizar y la otra de la potencia obtenida de la turbina; las velocidad específicas han sido utilizadas para clasificar las turbinas dependiendo a su valor, comúnmente se sabe que un valor alto dependiente de la potencia, significa una turbina Kaplan y si es lo contrario sería una turbina Peltón; pero esto solamente es un indicador para clasificarlas. Los valores de velocidades específicas para cada uno de las turbinas son los estipulados en la tabla 12.

$$N_Q = N * \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H_N^{\frac{5}{4}}} \quad (15)$$

$$N_S = N * \frac{P_T^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (16)$$

(Q) Caudal máximo de diseño [m^3/s].

(H_N) Altura neta de trabajo [m].

(P_T) Potencia al freno [Kw].

(N) Numero de revoluciones [rpm].

Posteriormente se inicia la comprobación de los parámetros anteriormente mencionados, empezando por el caudal, el diámetro exterior y la potencia de frenado que tiene la turbina a utilizar. Es importante considerar que la eficiencia hidráulica, teóricamente se obtiene por medio de los diagramas de velocidades de las turbinas.

$$Q = \frac{P_T}{9.807 * H * \eta_T} \quad (17)$$

$$D_E = \frac{39.85 * H^{0.5}}{N} \quad (18)$$

(D_E) Diámetro externo del rodete [m].

(η_T) Eficiencia de la turbina.

Para la planta eléctrica, lo beneficioso es lograr entregar la potencia directamente al generador, sin necesidad de un sistema mecánico de transferencia de potencia, por consiguiente, se coloca directamente a la función de las revoluciones del generador con la del eje presente en la turbina, colocando el número de polos que tiene el generador eléctrico a utilizar.

$$P_T = \frac{P_G}{\eta_G * \eta_{Tr}} \quad (19)$$

$$N = \frac{120 * F}{N_{polos}} \quad (20)$$

$$\eta_T = \eta_{Tr} * \eta_V * \eta_M * \eta_H \quad (21)$$

(η_V) Eficiencia volumétrica.

(η_H) Eficiencia Hidráulica.

(η_M) Eficiencia Mecánica

(P_G) Potencia máxima entregada al generador [Kw].

(η_G) Eficiencia del generador.

(η_{Tr}) Eficiencia de la transmisión mecánica utilizada.

Dado el caso que no sea viable el acople directo generador-turbina, es necesario realizar los cálculos de transmisión de potencia ya sea por correas o engranajes para así, saber el valor de las revoluciones por minutos de la turbina y el generador, por consiguiente, tendrá valores de eficiencias que tienden a disminuir la eficiencia de la turbina.

7.3.1 Diseño del rodete de la turbina. El rodete es uno de los componentes principales de las turbinas, cumple la función de transformar la energía cinética del agua en energía mecánica para ser conducida a un generador eléctrico.

El rodete de la turbina Michell-Banki, se caracteriza y se diferencia en que permite el paso del agua dos veces por el mismo, comúnmente se le llama turbina de flujo cruzado por este motivo, por consiguiente, es necesario el análisis de los triángulos de velocidades en cada una de estas etapas, tanto en la entrada como en la salida de cada una de ellas.

7.3.1.1 Diseño hidráulico. Este primer paso para el diseño de rodete se fundamenta en el análisis de triángulos de velocidades en cada una de las etapas del mismo, tanto en la entrada como en la salida. Los parámetros utilizados en dicho contexto fueron los de la OLADE²², que estipula las velocidades absolutas (C), velocidades relativas (W) y las velocidades tangenciales (U), estandarizando los ángulos entre velocidades de la siguiente manera:

²² HERNANDEZ, Carlos, et.al. Apuntes para un Manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas-turbinas Michell Banki, OLADE (Organización Latinoamericana de Energia), 1988.

α = Angulo formado entre la velocidad absoluta y la velocidad tangencial.

β = Angulo formado entre la velocidad relativa con la contraria de la velocidad tangencial.

Teniendo claro estos conceptos, es importantes entender la nomenclatura a utilizar, en este caso, va a ser utilizado el subíndice 1, para referirse a la salida de la primera etapa y la entrada de la segunda etapa, en esta última estará con ('); el sub índice 2, se utilizará para lo relacionado con la entrada del agua al rodete y la salida del mismo solo que nuevamente tendrá el icono (').

Empezando el diseño del rodete, es necesario hallar la velocidad absoluta con la que el agua entra al rodete, dicha velocidad es la misma con la que el agua sale del inyector de la turbina, que anteriormente se había mencionado.

$$C_1 = C_2 \quad (22)$$

Teniendo presente el ángulo de ingreso del rodete y el coeficiente de velocidad tangencial, se puede hallar el valor de la velocidad tangencial a la entrada del rodete en la primera etapa, el ángulo de orientación del inyector al rodete es de 16° , ya que es un valor que se ha comprobado experimentalmente que puede obtener una eficiencia más alta. Lo mismo ocurre con la velocidad relativa a la entrada del rodete; ambas ecuaciones se representan a continuación.

$$U_2 = K_U * C_2 * \cos(\alpha_2) \quad (23)$$

$$W_2 = C_2 * \sqrt{1 - k_U * (2 - K_U) * \cos^2(\alpha_2)} \quad (24)$$

(U_2) Velocidad Tangencial a la entrada del rodete

(K_U) Coeficiente de velocidad tangencial, tiene un valor de 0.5.

(α_2) Angulo de ingreso al rodete, por cálculos experimentales se recomienda un valor de 16° .

(W_2) Velocidad relativa a la entrada del rodete.

En el interior del rodete se observa que las diferentes velocidades y parámetros pueden llegar a ser iguales y con pérdida despreciable, según lo menciona la OLADE. Siguiendo estas condiciones se concluye que siempre existirá un ángulo recto entre la velocidad relativa y tangencial en el interior del rodete, es decir, en la salida de la primera etapa y en la entrada de la segunda etapa, por consiguiente en valor de $\beta_1 = 90^\circ$.

$$U_1 = U'_1 \quad (25)$$

$$C_1 = C'_1 \quad (26)$$

$$\alpha_1 = \alpha'_1 \quad (27)$$

$$\beta'_1 = 180 - \beta_1 \quad (28)$$

Para finalizar el proceso de los triángulos de velocidades del rodete, se especifica que el agua debe salir del rodete totalmente con la misma velocidad tangencial con el que entro; por consiguiente, se recomienda un valor de beta igual tanto en la entrada de la primera etapa del rodete como en la salida del segundo; dicho valor del ángulo entre la velocidad relativa y la contraria de la velocidad tangencial a la salida del rodete se especifica a continuación.

$$U'_2 = U_2 = K_U * C_2 * \cos(\alpha_2) \quad (29)$$

$$\beta_2 = \beta'_2 \quad (30)$$

$$\beta'_2 = \arcsen\left(\frac{\text{sen}(\alpha_2)}{(1 - K_U * (2 - K_U) * \cos^2(\alpha_2))^{0.5}}\right) \quad (31)$$

En el cálculo de la velocidad relativa a la salida de la segunda etapa del rodete, se especifica que pueden llegar a existir pérdidas pequeñas en este valor debido a fricción con los alabes, por consiguiente, es importante multiplicar el valor de la velocidad relativa a la entrada del rodete con un coeficiente de velocidad relativa

cuyo valor es 0.98, comprobado experimentalmente. Además, las ecuaciones para hallar los valores de la velocidad absoluta y el ángulo formado entre este y la velocidad tangencial se mencionan de la siguiente manera:

$$W'_2 = W_2 * K_F \quad (32)$$

$$C'_2 = C_2 \sqrt{K_F^2 (1 - K_U (2 - K_U) \cos^2(\alpha_2)) + K_U^2 \cos^2(\alpha_2) - 2K_F \cos^2(\alpha_2) K_U (1 - K_U)} \quad (33)$$

$$\alpha'_2 = \arcsen \left(\frac{K_F * \sen(\beta'_2) \sqrt{(1 - K_U (2 - K_U) \cos^2(\alpha_2))}}{\sqrt{K_F^2 + K_U \cos^2(\alpha_2) * (K_U - K_F^2 (2 - K_U) - K_F)}} \right) \quad (34)$$

U'_2 : Velocidad Tangencial a la salida del rodete.

W'_2 : Velocidad Relativa a la salida del rodete.

K_F : Coeficiente de velocidad relativa cuyo valor es cercano a 0.98.

C'_2 : Velocidad absoluta a la salida del rodete.

α'_2 : Angulo de salida en el rodete.

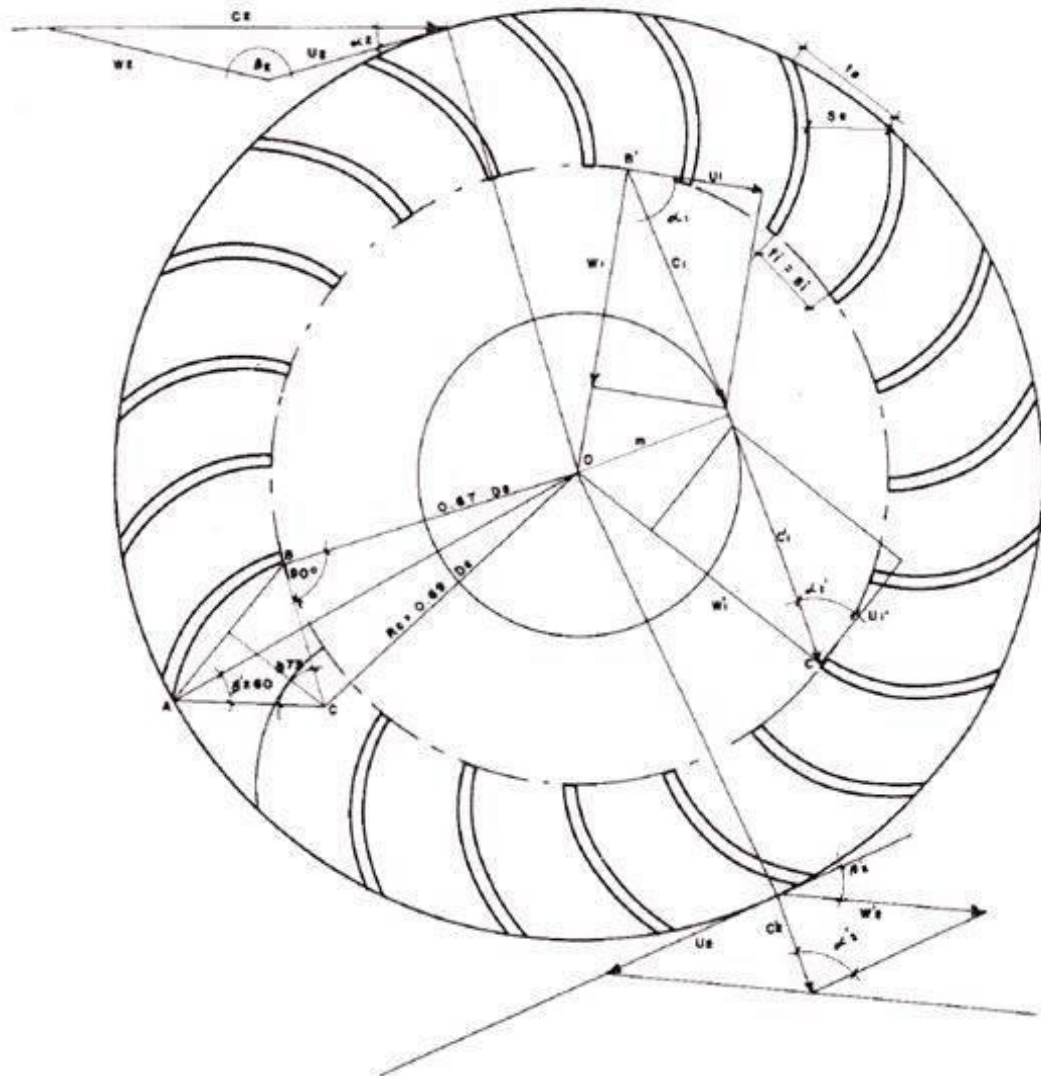
El valor de la velocidad absoluta a la salida del rodete normalmente es casi un cuarto de la velocidad absoluta a la entrada del rodete, esto comprobado experimentalmente.

Para determinar la eficiencia hidráulica del sistema, se define por medio de la ecuación de Euler, teniendo presente que en las turbinas Michell-Banki existen dos etapas de paso por el rodete, es importante mencionarlos en dicha ecuación para identificarlos. Aunque, las expresiones que complementan la parte interior del rodete se consideran iguales, la ecuación termina siendo válida solamente incluyendo los parámetros de entrada y salida del rodete. Los triángulos de velocidades de cada una de las etapas se muestran en la figura 13.

$$\eta_H * g * H = U_2 * W_2 - U_1 * W_1 + U'_1 * W'_1 - U'_2 * W'_2$$

$$\eta_H * g * H = U_2 * W_2 - U'_2 * W'_2 \quad (35)$$

Figura 13. Diagrama de Velocidades de una Turbina Michell-Banki.



Fuente: HERNANDEZ, Carlos, et.al. Apuntes para un Manual tecnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas-turbinas Michell Banki, OLADE (Organización Latinoamericana de Energia), 1988.

7.3.1.2 Diseño y geometría del rodete. En primer lugar, se debe encontrar una relación de los diámetros interior y exterior del rodete de la turbina Michell-Banki, esta se obtiene de la ecuación de la energía total, es una de las relaciones más importantes en la geometría del rodete y se representa de la siguiente manera:

$$D_I = \frac{2}{3} * D_E \quad (36)$$

Posteriormente se busca el radio de curvatura de los alabes, este valor es el relacionado con el grado de curvatura que tienen los alabes con un punto específico llamado OO, el cual se ve representado en la figura 14, dado de la siguiente manera:

$$R = \frac{D_E}{4 * \cos(\beta'_2)} * \left(1 - \left(\frac{D_I}{D_E} \right)^2 \right) \quad (37)$$

$$OO = R_E^2 + \delta^2 - 2 * (R_E) * (\delta) \cos(\beta_2) \quad (38)$$

(R) Radio de curvatura.

(δ) Ángulo de curvatura del alabe.

El ángulo de curvatura de los alabes o ángulo central, es aquel ángulo que comprende la totalidad de los alabes desde el radio interior hasta el radio exterior y permite limitar el valor del radio de curvatura, es decir, los puntos en los cuales se ubican, el inicio y el final del alabe.

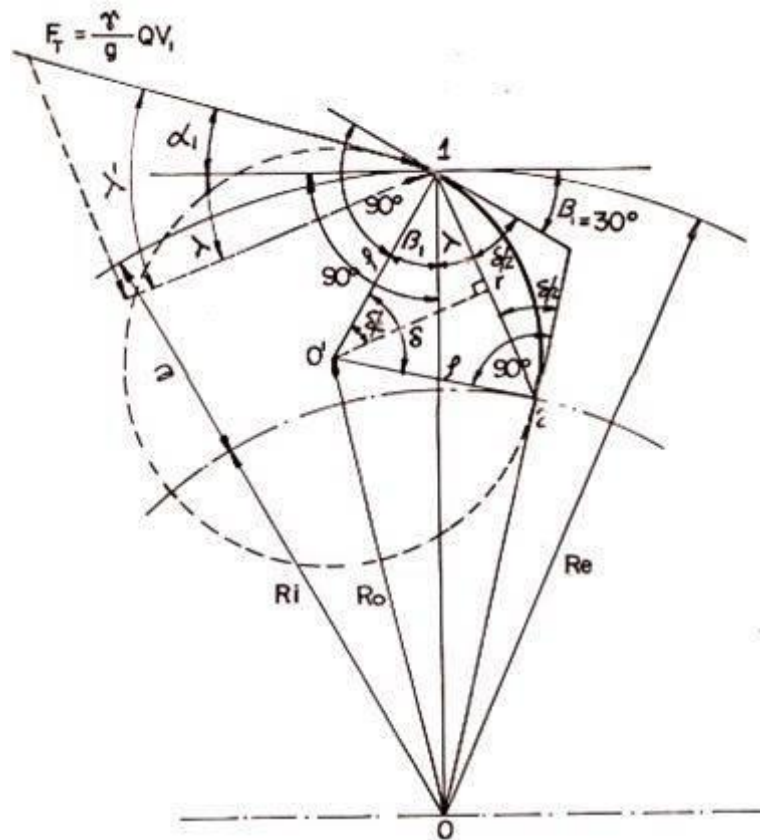
$$\delta = 2 * \arctang \left(\frac{\cos(\beta'_2)}{\frac{D_I}{D_E} + \text{sen}(\beta'_2)} \right) \quad (39)$$

El ancho radial de los alabes es una diferencia entre los diámetros exterior e interior del rodete, es como tal el espacio utilizado de los alabes en el mismo rodete, se halla de la siguiente manera:

$$An_R = 0.17 * D_E \quad (40)$$

(An_R) Ancho Radial de los alabes.

Figura 14. Diagrama de Radios y Ángulos.



Fuente: LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, "Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS", Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

Para la determinación del arco total de trabajo, es importante entender que existen varios arcos involucrados, como lo es el arco de admisión que es un tercio de una circunferencia, el arco de trabajo de la etapa 1 y el de trabajo de la etapa 2; estos valores son obtenidos asumiendo el máximo valor del diámetro del eje, con un ángulo α a la salida de la primera etapa de la turbina de 60° .

$$\theta_T = \theta_o + \theta_1 + \theta_2 + BOC \quad (41)$$

$$\theta_o = K_o * 360 \quad (42)$$

$$BOC = 2 * arctang \left(\frac{\sqrt{1 - k_U * (2 - K_U) * \cos^2(\alpha_2)}}{\frac{D_I}{D_E} * K_U * \cos^2(\alpha_2)} \right) \quad (43)$$

$$K_o = \frac{BOC}{360} \quad (44)$$

$$\theta_1 = \left(\frac{R * \delta}{W_2} \right) * \left(\frac{N}{60} * 360 \right) \quad (45)$$

$$\theta_2 = \frac{\theta_1}{K_F} \quad (46)$$

(θ_o) Arco de admisión.

(θ_1) Arco de la primera parte de la turbina.

(θ_2) Arco de la segunda parte de la turbina.

(BOC) Angulo recorrido en el interior del rodete de la turbina.

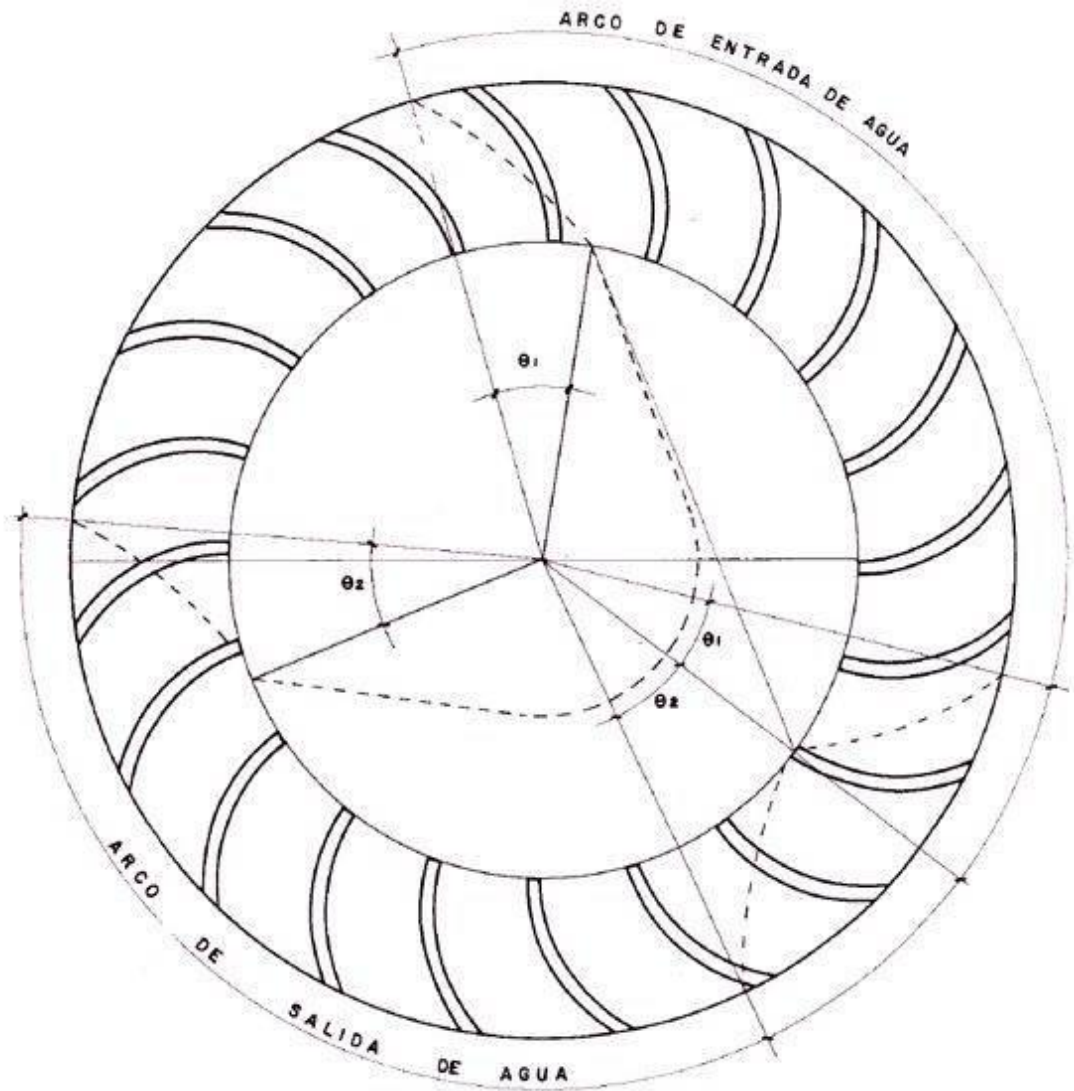
La trayectoria que recorre el agua al interior del rodete puede observarse en la figura 15.

Luego, se procede a hallar el ancho total del rodete (B_r), donde el valor del ancho del inyector (B), sale en la sección del diseño del inyector; el valor de incremento del ancho del rodete puede variar desde 1.3 a 1.5 dependiendo a estándares de diseño.

$$B_R = 1.5 * B \quad (47)$$

$$B = \frac{0.96 * Q}{D_E * \sqrt{H}} \quad (48)$$

Figura 15. Trayectoria de al Agua a través de la turbina.



Fuente: HERNANDEZ, Carlos, et.al. Apuntes para un Manual tecnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas-turbinas Michell Banki, OLADE (Organización Latinoamericana de Energia), 1988.

Para determinar el espaciamento de los alabes y el ángulo central entre dos alabes, se utilizó la siguiente metodología, la cual consiste en hallar el perímetro total del diámetro externo y en base a este, obtener los espaciamentos en el exterior e

interior del rodete para cada uno de los alabes y por consiguiente se divide toda la circunferencia en el número de alabes presentes, para saber el correspondiente espacio que tiene cada uno.

$$L_1 = \pi * D_E - e * z \quad (49)$$

$$t_1 = \frac{L_1}{z} \quad (50)$$

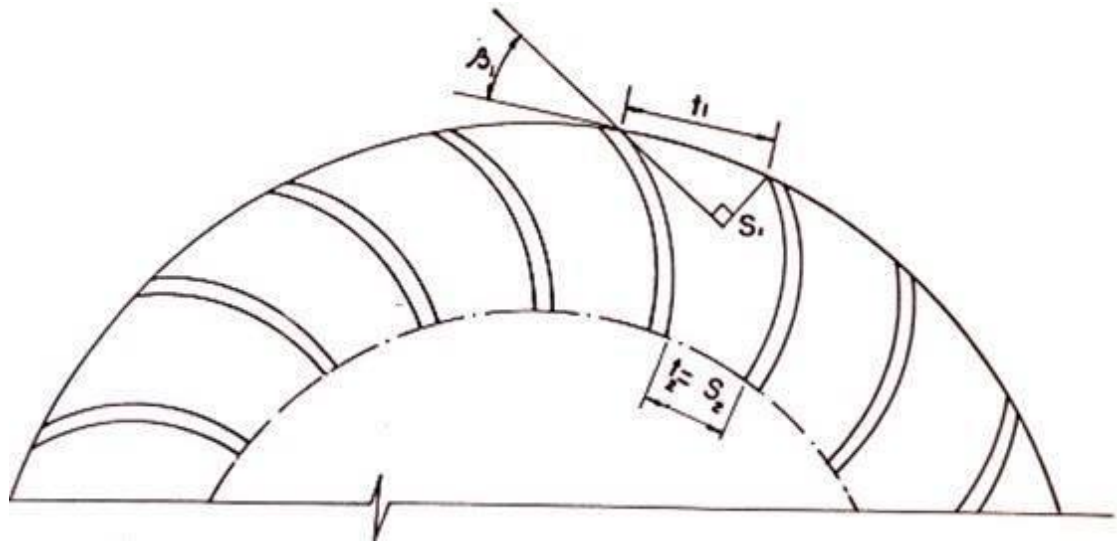
$$t_2 = \left(\frac{D_I}{D_E}\right) * t_1 \quad (51)$$

$$\theta_{CENTRAL} = \frac{360}{z} \quad (52)$$

(e) espesor de los alabes [m].

(z) Numero de alabes, varía entre 20 a 30.

Figura 16. Espaciamiento de los alabes.



Fuente: LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, "Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS", Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

Ya con las ecuaciones anteriormente planteadas, se puede llegar a obtener la razón de potencia, un valor que permitirá saber la relación energética entre la primera parte y segunda parte del rodete, expresada de la siguiente manera:

$$\Psi = \frac{M_{1-2}}{M_{3-4}} = \frac{P_{1-2}}{P_{3-4}} = \frac{R_E * V_{U2} - R_I * V_{U1}}{R_I * V'_{U1} - R_E * V'_{U2}} \quad (53)$$

$$V_{U2} = U_2 + W_2 * \cos(\beta_2) \quad (54)$$

$$U_1 = \frac{2}{3} * U_2 \quad (55)$$

$$V_{U1} = V'_{U1} = U_1 \quad (56)$$

$$V'_{U2} = U'_2 - W'_2 * \cos(\beta'_2) \quad (57)$$

Es importante establecer que la componente de la velocidad absoluta en línea con la velocidad tangencial es la que se representa con un subíndice U, las cuales permitirán hallar los valores correspondientes a las potencias de cada una de las etapas y por consiguiente el valor de la razón de potencia, que tanta potencia se realiza en la segunda etapa en base a la primera del rodete. Además, la velocidad tangencial en el interior del rodete tendrá una relación igual a la de los diámetros, es decir de 2/3 de la velocidad tangencial a la entrada del rodete.

7.3.1.3 Verificación del espesor del alabe. Para la verificación del espesor del alabe se necesita calcular la cantidad de fuerza que se logra ejercer en cada alabe, escrita de la siguiente manera:

$$F_A = \frac{1000 * Q * C_2 * \cos(\theta')}{g * K_O * Z} \quad (58)$$

$$\theta' = \alpha_2 + \theta_{OR} \quad (59)$$

$$\theta_{OR} = \arccos\left(\frac{R_E^2 + R_3^2 - R_I^2}{2 * R_E * R_3}\right) \quad (60)$$

$$R_3 = 2 * R * \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (61)$$

Con esta fuerza se procede a hallar la fuerza distribuida en cada alabe (R_A), obteniendo el momento máximo y por consiguiente el esfuerzo de fluencia máximo. Se debe considerar que para este proceso es de suprema importancia encontrar el momento de inercia respecto al centro de gravedad de la sección del alabe, dichas formulas estas estipuladas de la siguiente manera:

$$R_A = \frac{F_a}{BR} \quad (62)$$

$$M_R = R_A * \frac{BR^2}{12} \quad (63)$$

$$\sigma_{MAXR1} = \frac{M_R * E_{CG}}{I_{GX}} \quad (64)$$

$$I_{GX} = \frac{(R_{IE}^4 - R^4)}{8} * (\delta + \text{sen}(\delta) - \frac{8}{9} * \left(\frac{(R_{IE}^3 - R^3)^2}{R_{IE}^2 - R^2} \right) * \frac{\text{sen}^2\left(\frac{\delta}{2}\right)}{\delta} \quad (65)$$

$$R_{IE} = R + E \quad (66)$$

$$E_{cg} = R_{IE} - C_G \quad (67)$$

$$C_G = \frac{2}{3} * \frac{\text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right)}{\frac{\delta}{2}} * \left(\frac{R_{IE}^3 - R^3}{R_{IE}^2 - R^2} \right) \quad (68)$$

(I_{GX}) Inercia presente en un alabe [m^4].

(E) Espesor de la lámina a utilizar.

(E_{CG}) Espesor experimental.

El valor que da anteriormente se debe comparar con el esfuerzo máximo del material, garantizando que este valor obtenido sea menor al esfuerzo máximo.

7.3.1.4 Verificación para el espesor de los discos del rodete. Para realizar dicha verificación, es necesario hallar el esfuerzo máximo al que se encuentran los discos en el rodete, teniendo conceptos importantes como el peso de cada uno de los alabes o de todos, el determinar el volumen de cada uno de los alabes y la velocidad embalamiento de la turbina:

$$\sigma_{MAXDR} = \frac{\left(W_A + \frac{\pi}{4} * (D_E^2 - D_C^2) * \rho_A * T_E\right) * U_E^2}{\left(G * \frac{\pi}{2}\right) * D_E * D_C * T_E} \quad (69)$$

$$V_A = \left(\frac{R * \delta * \pi}{180}\right) * E * BR \quad (70)$$

$$W_A = \rho_A * Z * V_A \quad (71)$$

$$U_E = 2 * K_U * C_2 * \cos(\alpha_2) \quad (72)$$

(W_A) Peso de todos los alabes.

(V_A) Volumen de un alabe.

(ρ_A) Peso específico del material a utilizar, comúnmente acero.

(T_E) Espesor de las láminas a utilizar.

(D_C) Diámetro del cubo del eje [m].

(U_E) Velocidad de embalsamiento.

El valor del esfuerzo máximo anteriormente dado se compara con el valor del esfuerzo máximo de material.

7.3.2 Diseño del eje de la turbina. Para el diseño del eje es importante encontrar y determinar cada una de las fuerzas presentes en el rodete, una vez realizado este proceso se traslada al eje, generando momentos que están descritos de la siguiente manera para cada una de las etapas del rodete.

$$M_{1-2} = (M_{1-2})_I + (M_{1-2})_{II} \quad (73)$$

$$M_{3-4} = (M_{3-4})_I + (M_{3-4})_{II} \quad (74)$$

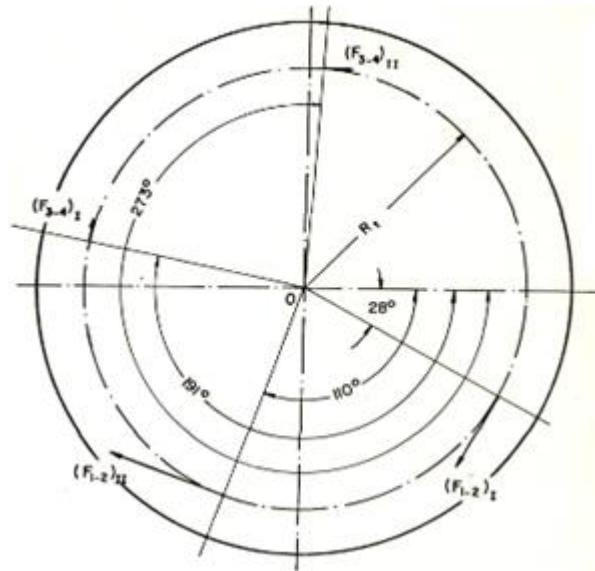
$$(M_{1-2})_I = \frac{\rho_{H2O} * Q_I}{G} * (R_E * V_{U2} - R_I * V_{U1}) \quad (75)$$

$$(M_{1-2})_{II} = \frac{\rho_{H2O} * Q_{II}}{G} * (R_E * V_{U2} - R_I * V_{U1}) \quad (76)$$

$$(M_{3-4})_I = \frac{\rho_{H2O} * Q_I}{G} * (R_I * V'_{U1} - R_E * V'_{U2}) \quad (77)$$

$$(M_{3-4})_{II} = \frac{\rho_{H2O} * Q_{II}}{G} * (R_I * V'_{U1} - R_E * V'_{U2}) \quad (78)$$

Figura 17. Fuerzas mecánicas en el rodete.



Fuente: LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

$$\theta_{QI} = 28$$

$$\theta_{QII} = 110$$

$$2 * \alpha_1 = 120 \quad (79)$$

$$\theta_{QI_2} = \theta_{QI} + 2 * \alpha_1 + \theta_1 + \theta_2 \quad (80)$$

$$\theta_{QII_2} = \theta_{QII} + 2 * \alpha_1 + \theta_1 + \theta_2 \quad (81)$$

$$R_T = R_I + \frac{AN_R}{2} \quad (82)$$

$$(F_{1-2})_I = \frac{(M_{1-2})_I}{R_T} \quad (83)$$

$$(F_{1-2})_{II} = \frac{(M_{1-2})_{II}}{R_T} \quad (84)$$

$$(F_{3-4})_I = \frac{(M_{3-4})_I}{R_T} \quad (85)$$

$$(F_{3-4})_{II} = \frac{(M_{3-4})_{II}}{R_T} \quad (86)$$

$$T_T = (M_{1-2})_I + (M_{1-2})_{II} + (M_{3-4})_I + (M_{3-4})_{II} \quad (87)$$

$$(F_{1-2})_{IX} = (F_{1-2})_I * \text{sen}(\theta_{QI}) \quad (88)$$

$$(F_{1-2})_{IY} = (F_{1-2})_I * \text{cos}(\theta_{QI}) \quad (89)$$

$$(F_{1-2})_{IIX} = (F_{1-2})_{II} * \text{cos}(\theta_{QII} - 90) \quad (90)$$

$$(F_{1-2})_{IIY} = -(F_{1-2})_{II} * \text{sen}(\theta_{QII} - 90) \quad (91)$$

$$(F_{3-4})_{IX} = -(F_{3-4})_I * \text{sen}(\theta_{QI_2} - 180) \quad (92)$$

$$(F_{3-4})_{IY} = -(F_{3-4})_I * \text{cos}(\theta_{QI_2} - 180) \quad (93)$$

$$(F_{3-4})_{IIX} = (F_{3-4})_{II} * \text{cos}(\theta_{QII_2} - 270) \quad (94)$$

$$(F_{3-4})_{IIY} = (F_{3-4})_{II} * \text{sen}(\theta_{QII_2} - 270) \quad (95)$$

$$F_X = (F_{1-2})_{IX} + (F_{1-2})_{IIX} + (F_{3-4})_{IX} + (F_{3-4})_{IIX} \quad (96)$$

$$F_Y = (F_{1-2})_{IY} + (F_{1-2})_{IIY} + (F_{3-4})_{IY} + (F_{3-4})_{IIY} \quad (97)$$

$$F_R = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} \quad (98)$$

$$TANG(\theta_R) = \frac{F_X}{F_Y} \quad (99)$$

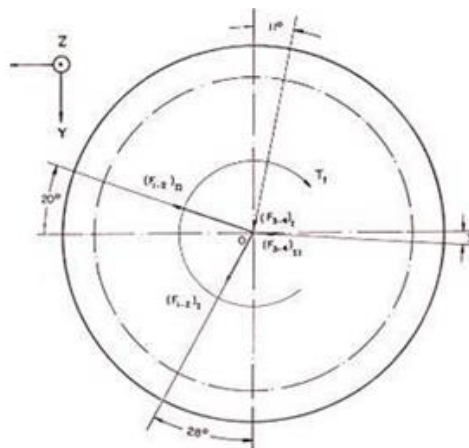
$$R_R = \frac{F_R}{BR} \quad (100)$$

$$R_{RX} = \frac{F_X}{BR} \quad (101)$$

$$R_{RY} = \frac{F_Y}{BR} \quad (102)$$

A continuación, se puede detallar las direcciones que toman las fuerzas sobre el eje.

Figura 18. Sentido de las fuerzas en el eje.



Fuente: LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

El eje de la turbina debe ser capaz de soportar los esfuerzos generados por 3 elementos, la turbina y 2 rodamientos para poder transmitir el torque, dichos cálculos se encuentran en el anexo B.

7.3.3 Diseño del inyector. La función principal del inyector es transformar la presión estática a presión dinámica o de velocidad, pero a su vez puede ser empleado para cambiar el caudal que ingresa a la turbina. Además, es una pieza fundamental para el funcionamiento de una turbina Michell-Banki, ya que no solo acelera el flujo de agua, sino que aprovechará al máximo la energía del mismo. En primera instancia se calcula la velocidad con la que llega el flujo al inyector, esta se halla de la siguiente manera:

$$C_1 = K_V * \sqrt{2 * g * H_n} \quad (103)$$

K_V = Coeficiente de velocidad de la tobera [0,97 a 0,99]

Posteriormente se calculan el diámetro máximo del eje del alabe directriz y el torque máximo que este puede recibir, permitiendo tener un punto de partida limite.

$$d_{max} = 0.096 D_e \quad (104)$$

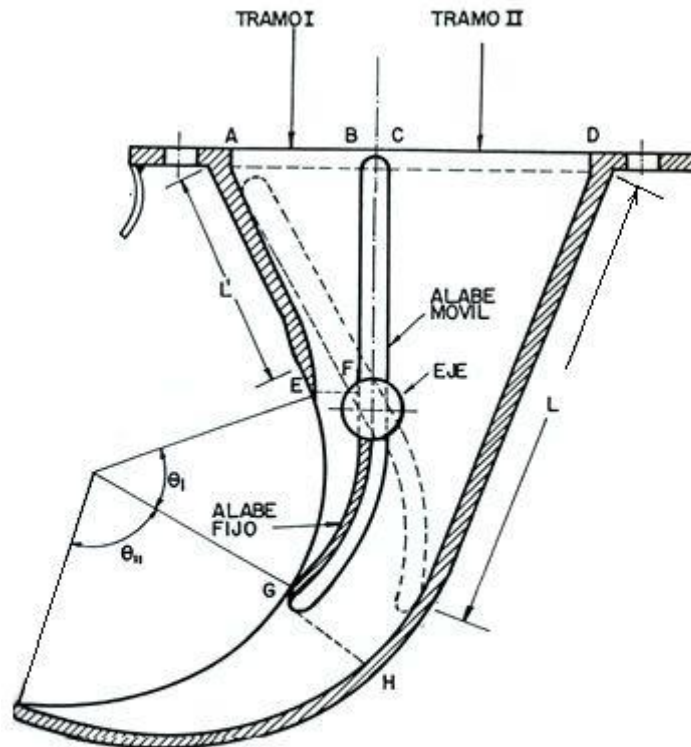
$$T_{max} = 31 * D_e * Q * \sqrt{H_n} \quad (105)$$

7.3.3.1 Cálculo de las dimensiones del inyector. Las dimensiones del inyector son las siguientes:

- B : Ancho del inyector
- e : Espesor del inyector
- z : Numero de álabes
- r_l : Radio de curvatura del alabe
- \overline{FB} : Longitud tramo I
- \overline{AB} : Longitud interior tramo I
- \overline{CD} : Longitud Interior tramo II
- BC : Espesor del alabe móvil
- Rel_Q : Relación de caudales
- \overline{EF} y \overline{GH} : Salidas de los tramos
- e_f : Espesor del alabe fijo

Dichas dimensiones se ven evidenciadas en la figura 19.

Figura 19. Dimensiones Primarias del Inyector.



INYECTOR MICHELL-BANKI
 $\theta_I + \theta_{II} = \text{ARCO TEORICO DE ADMISION}$

Fuente: LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

Se inicia calculando el arco de admisión del inyector el cual es 1/3 del D_e del rodete.

$$\theta_I + \theta_{II} = \text{Arco de admision} \quad (106)$$

Posteriormente, la eficiencia del inyector será el coeficiente de la tobera al cuadrado. Además, se calcula el ancho del inyector, el cual es de vital importancia, debido a que el ancho de la turbina depende de él.

$$\eta_I = C_v^2 \quad (107)$$

$$B = \frac{Q}{(\pi * D_e - e * z) * K * K_0 * V_1 * \text{sen}\alpha_1} \quad (108)$$

Durante este paso se calculan las dimensiones principales que deberá tener el inyector, para suministrar el flujo de agua de manera adecuada. Inicialmente se busca una relación entre los anchos en la entrada del inyector.

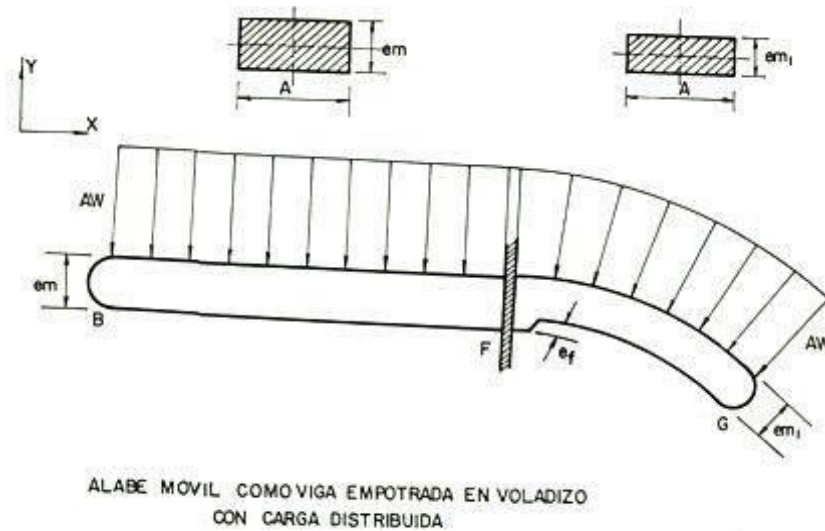
$$\overline{AB} + \overline{CD} = 0,75 D_e \quad (109)$$

Además, se calcula los anchos correspondientes del alabe del inyector, el cual separará el flujo en 2 tramos tal y como se evidencia en la figura 20.

$$e_m = \overline{BC} = 0,075 D_e \quad (110)$$

$$e_F = 0,2 * e_m \quad (111)$$

Figura 20. Cargas sobre el Alabe del Inyector.



Fuente: LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.

Se halla una relación de caudales entre los tramos que es equivalente a la relación entre los arcos de admisión. A partir de esta correlación se hallan los valores de los anchos de la entrada y salida del inyector (Ver anexo B).

$$Rel_Q = \frac{Q_{II}}{Q_I} = \frac{\theta_{II}}{\theta_I} \quad (112)$$

$$r_I = \frac{D_e}{2} \quad (113)$$

$$\overline{AB} = 0,75D_E * \left[\frac{1}{1 + Rel_Q} \right] \quad (114)$$

$$\overline{CD} = 0,75D_E * \left[\frac{Rel_Q}{1 + Rel_Q} \right] \quad (115)$$

$$\overline{EF} = \frac{Q_I}{V_I * B} \quad (116)$$

$$\overline{GH} = \frac{Q_{II}}{V_I * B} \quad (117)$$

$$\overline{FB} = \frac{D_e}{2} \quad (118)$$

$$\overline{AD} = \overline{AB} + e_m + \overline{CD} \quad (119)$$

Finalmente se calculan los parámetros correspondientes a las áreas del inyector.

$$\Omega_R = \overline{AD} * B \quad (120)$$

$$\Omega_R = \Omega_C \quad (121)$$

$$\Omega_C = \pi * \frac{D_t^2}{4} \quad (122)$$

$$\theta_I + \theta_{II} = 360^\circ * K * K_o \quad (123)$$

La relación R es comprobada a partir del anexo B (Diseño hidráulico del inyector).

7.3.3.2 Comprobación del alabe del inyector. El alabe del inyector es una parte fundamental del sistema de una turbina Michell-Banki, puesto que divide el flujo en 2, una parte de este pasará por 2 etapas en la turbina mientras que el restante pasará por solo una etapa, esto genera un mayor aprovechamiento de la energía del flujo.

Para su análisis se asumirá la geometría del alabe del inyector como una barra de sección transversal rectangular, que consta de 2 secciones, una recta y otra curva

Análisis sección curva:

$$M_{\max C} = 0.0744 * D_E^2 * B * W \quad (124)$$

El momento máximo también es igual a

$$M_{\max C} = 0.25 * D_E^2 * B * W * (1 - \cos\phi_1) \quad (125)$$

Se halla el espesor mínimo del alabe del inyector y con este se halla el esfuerzo máximo en dicha sección.

$$e_{ml} = e_m - e_F \quad (126)$$

$$\sigma_{maxC} = 0.4464 * D_E^2 * \frac{W}{e_{ml}^2} \quad (127)$$

Análisis sección Recta:

$$M_{maxR} = 0,125 * D_E^2 * B * W \quad (128)$$

$$\sigma_{maxR} = 0,75 * D_E^2 * \frac{W}{e_{ml}^2} \quad (129)$$

Esfuerzo admisible:

$$\sigma_{ad} = 0.66 * S_y \quad (130)$$

7.3.3.3 Análisis de las paredes del inyector. Las paredes del inyector deben ser capaces de soportar la fuerza generada por el agua sin deformarse, ya que se podría generar un desvío del agua antes de entrar a la turbina, por lo cual no dirigián el flujo de manera adecuada hacia el rodete.

En primera instancia, se calcula el momento máximo que llega a soportar las paredes del inyector, se expresa de la siguiente manera:

$$M_{max} = \frac{\rho * Q_I * B * K_c * \sqrt{G * H * [1 - \cos\phi_1]}}{6 * G} \quad (131)$$

A continuación, se busca el espesor real, determinando el radio externo y el centro de gravedad de la sección transversal.

$$R_{ce} = R_{ci} + e_f \quad (132)$$

$$C_{ge} = \frac{\left(2 * \sin \frac{\phi_1}{2}\right)}{3 * \frac{\phi_1}{2} * \left[\frac{\pi}{60}\right]} * \left[\frac{R_{ce}^3 - R_{ci}^3}{R_{ce}^2 - R_{ci}^2}\right] \quad (133)$$

$$E_f = R_{ce} - C_{ge} \quad (134)$$

Después de calculados estos parámetros se encuentra la inercia del estator en cm^4 .

$$I_{cg} = \frac{R_{ce}^4 - R_{ci}^4}{8} * \left[\phi_1 * \frac{\pi}{60} + \text{sen}(\phi_1) \right] - \frac{8}{9} \left[\frac{R_{ce}^3 - R_{ci}^3}{R_{ce}^2 - R_{ci}^2} \right] * \frac{\text{sen}^2\left(\frac{\phi_1}{2}\right)}{\phi_1 * \frac{\pi}{60}} * 10^8 \quad (135)$$

Con estos valores se finaliza hallando el esfuerzo máximo soportado, el cual debe de ser menor a 1,5 veces el esfuerzo de fluencia del material.

$$\sigma_{max} = M_{max} * \frac{E_f}{I_{cg}} \quad (136)$$

Finalmente se comprueba el espesor de las paredes del inyector con un valor de lámina comercial, aclarando nuevamente que valor del esfuerzo debe ser menor al esfuerzo de fluencia del material.

Además, se debe calcular el ancho de las paredes de la siguiente forma:

$$L = 0.85D_e \quad (137)$$

$$\sigma_{max} = \frac{W * B^2}{2 * \left[1 + 0,2 * \left(\frac{B}{L} \right)^4 \right] * T_L^2} \quad (138)$$

$T_L = \frac{0,25}{100}$ Espesor de una lámina a nivel comercial

Lo mismo ocurre para la otra pared, escrita de la siguiente manera:

$$L' = 0.575 * D_E \quad (139)$$

$$\sigma'_{maxL} = \frac{0.1554 * W * L'^2}{T_L^2} \quad (140)$$

7.4 DISEÑO DEL TANQUE

El tanque a diseñar será realizado de una manera personalizada y no seleccionado, con el fin de aumentar la cantidad de agua que puede ser almacenada, además de distribuir la carga por las columnas principales de la estructura para evitar una carga puntual debido al peso del agua, por lo tanto, el tanque será de una geometría distribuida por todo el perímetro del techo.

En primera instancia se define el perímetro de la estructura a calcular, debido a que se seleccionó el coliseo el cristal empleando la herramienta de google maps, se suministra la dimensión aproximada de dicho techo, el cual es de 239 m tal y como se puede observar en la figura 21.

Figura 21. Dimensiones del Coliseo.



Fuente: GOOGLE LLS; Mapa del coliseo el Cristal Buenaventura, [en línea]. [21 Noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Coliseo+El+Cristal/@3.8805433,-77.0172705,1136m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3724ac11f6dedd:0x8dad11f6795f92e6!8m2!3d3.8805433!4d-77.0150818>

A partir de esto, se determinará el área de la sección transversal para a dicho tanque, el cual debe permitir almacenar 10 m^3 , siendo su área transversal de $0,0418 \text{ m}^2$, en términos de un tanque cilíndrico sería el equivalente a uno con un diámetro de 23 cm.

A su vez el peso de 10 toneladas debe ser soportado por la estructura por lo cual la distribución por metro es de solo $41,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$.

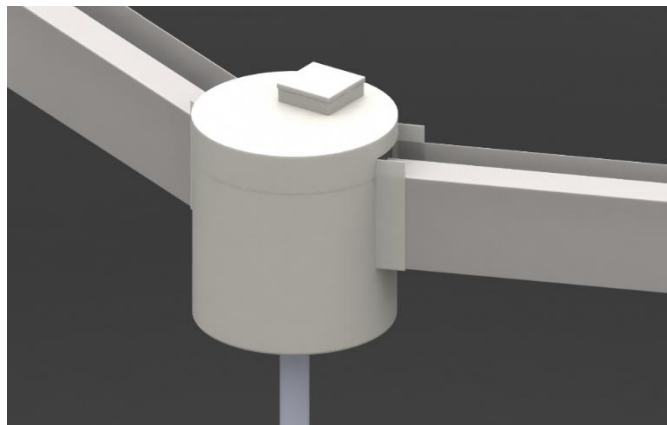
Otra consideración fundamental, es evitar la estanqueidad del agua para poder suministrar un caudal constante a la turbina, para solventar esta problemática, el sistema constará de distintas partes.

Parte 1: Se ubica justo por encima de la zona en la cual se localiza la turbina, consta de un tanque convencional con una capacidad de 80 L, un filtro de malla a la entrada del agua, complementado con una válvula de compuerta pilotada por un sistema de control de nivel, con el fin de determinar los ciclos de descarga.

Parte 2: El sistema de tuberías de recolección también funciona como tanque, se ubica en el perímetro del coliseo justo en el borde del techo, consta de un total de 8 secciones presentando una leve inclinación que dirija el agua hacia el tanque principal.

Dichas partes se pueden evidenciar en la figura 22.

Figura 22. Sistema de recolección y almacenamiento de agua-lluvia.



7.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Con el fin de generar el ciclo de llenado y descarga del tanque necesario para la operación de la turbina, se diseñará un sistema de control que cumpla con dichas necesidades, para esto el sistema deberá realizar un ciclo de apertura total de una válvula cada vez que el tanque llegue al nivel de altura y posteriormente, esta se cierre cuando el nivel sea 0. Para esta razón se implementará un sistema ON-OFF en Arduino y un sensor ultrasónico HC-SR04, este censará el nivel de agua en una sección del tanque. Brindará una el dato del nivel del tanque al controlador, delimitado por las dimensiones del mismo y la distancia al sensor, el cual a su vez mandará una señal que active a la moto-reductor para abrir o cerrar a la válvula, dicho programa se encuentra en el anexo D.

Elementos del sistema

- Válvula: elemento que regula la descarga y llenado del tanque al impedir el flujo de agua hacia la turbina, la válvula seleccionada será de compuerta, esta debe ser de 2" para acoplar directamente a la tubería.
- Placa arduino: Hardware que contendrá los comandos del sistema de control.
- Placa electrónica: Hardware que incluye los relés electromecánicos que activan o desactivan la señal.
- Moto-reductor: este permitirá la apertura y cierre de la válvula. El motoreductor seleccionado posee un torque de 30N-cm. (Ver figura 23)

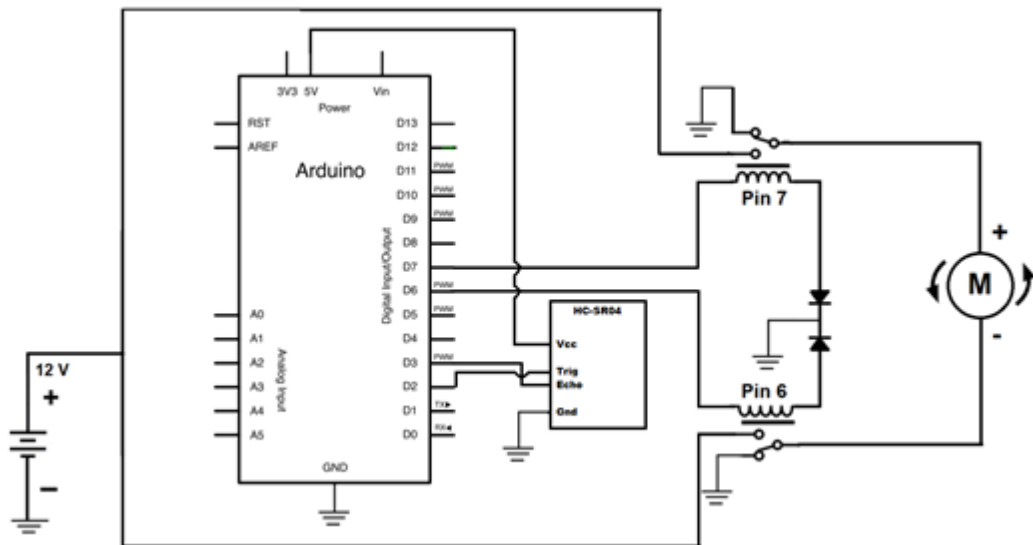
Figura 23. Motoreductor Seleccionado.

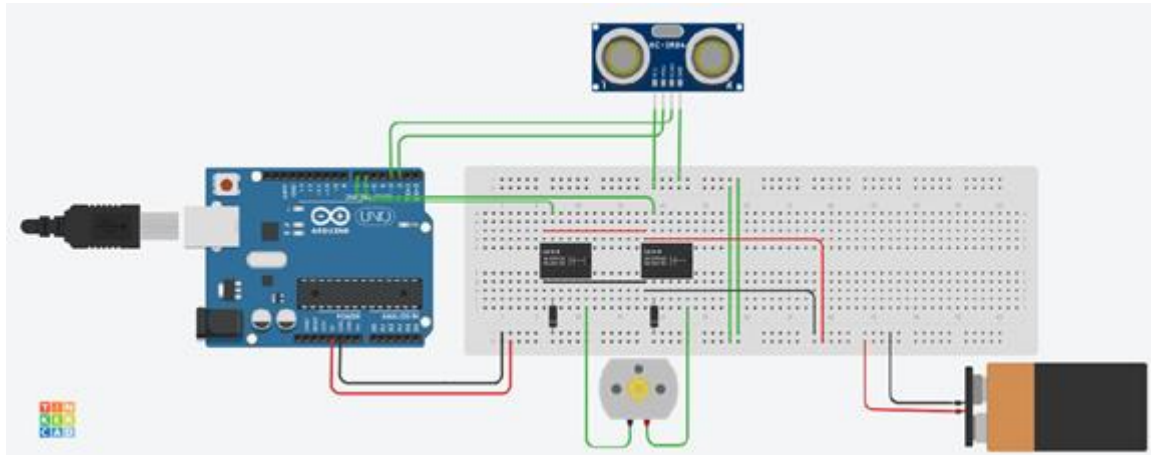


37mm 12v 60 Rpm
Eléctrico Mini Caja
Motorreductor Dc Motor

Fuente: MERCADO LIBRE, “37mm 12v 60 Rpm Eléctrico Mini Caja Motorreductor Dc Motor”, [en línea]. [27 Julio 2018]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-476261291-37mm-12v-60-rpm-electrico-mini-caja-motorreductor-dc-motor-_JM.

Figura 24. Placa electrónica.





Fuente: TINKERCAR, “Circuits”. [en línea]. [27 de Julio 2017]. Disponible en: <https://www.tinkercad.com/>

Con el propósito de adaptar el sistema a una válvula de cualquier proveedor, se flexibilizó el control, para esto se sugiere cambiar la programación en la línea (13), reemplazando el valor de “Tcerrado” por el tiempo que tarda la válvula en abrirse o cerrarse, este puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$T_{\text{cerrado}}[S] = \frac{N_{\text{vueltas}}}{RPM_{\text{motorreductor}}} * 60 \quad (141)$$

7.6 SELECCIÓN DEL GENERADOR

Con el objetivo de convertir la energía rotacional del eje en energía eléctrica, es necesario determinar el tipo de generador que se adapte a las necesidades del sistema, este debe ser capaz de soportar la potencia que transmite la turbina.

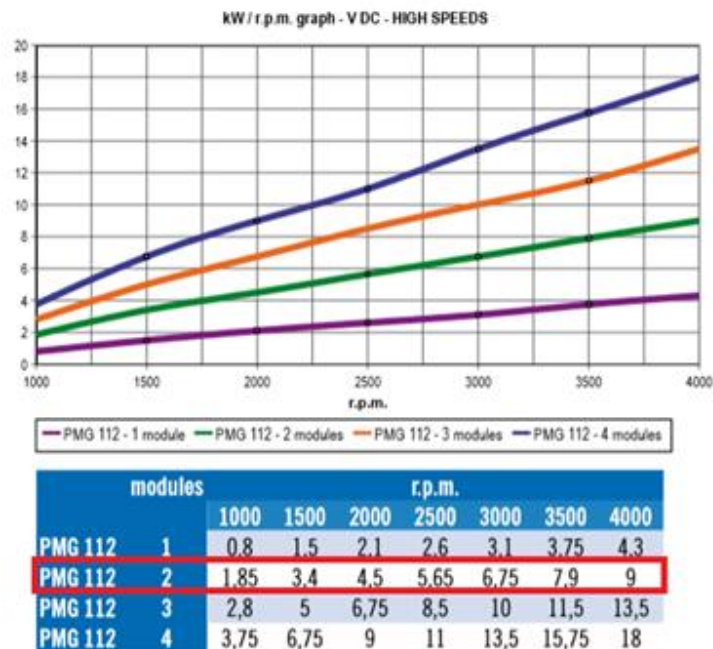
A partir del análisis previo de los requerimientos del sistema, se elegirá el equipo adecuado para cumplirlos, iniciando con el tiempo de operación, debido a que el sistema maneja ciclos cortos de no más de 20 minutos, un generador síncrono se descarta, puesto que no se utiliza el torque generado durante el tiempo requerido para alcanzar la sincronización. La implementación de un generador asíncrono estándar, presenta el inconveniente de requerir la integración de un sistema de condensadores con alto nivel de calibración, para poder operar de manera

autónoma sin conexión a la red nacional, aumentando considerablemente el costo del sistema. Por lo tanto, se decantó por emplear un generador de imanes permanentes que solventa ambas problemáticas, puesto que no requiere un tiempo de sincronización y posee una fácil instalación en un sistema autónomo, véase el caso de los dínamos de las bicicletas. Además, este tipo de generadores presenta muy pocas averías, permite un acople directo al sistema motriz y es empleada para aplicaciones de baja potencia.

Otros parámetros a considerar para la selección del generador, son la tensión a generar, la velocidad de rotación, la frecuencia a generar y el número de pares de polos.

La potencia a la cual operará el generador será de 1 [KW], puesto que este fue el valor en el cual se basaron los cálculos hidráulicos previamente realizados en el numeral 7.1.3. A partir de esto se buscará un generador con una capacidad ligeramente superior.

Figura 25. Curva Potencia contra R.P.M generador PMG 112.

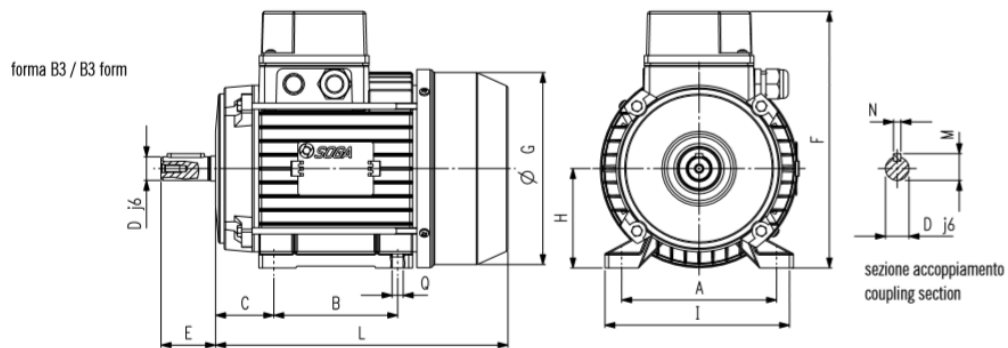




Fuente: SOGA S.P.A, "Generatori a magneti permanente per velocita medio alte", 2011.

Figura 26. Dimensiones del generador PMG112.

modelli / models	characteristics		dimensioni forma B3 (mm) - dimensions B3 form (mm)												
	poles	rpm max	A	B	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	Q
PMG 90 S	8	4500	140	100	56	24	50	220	176	90	170	254,5	27	8	9
PMG 90 L	8	4500	140	125	56	24	50	220	176	90	170	279,5	27	8	9
PMG 112	12	4000	190	140	70	28	60	262	215	112	220	328,5	31	8	11
PMG 160 M	18	3000	254	210	108	42	110	382,5	311	160	318	494	45	12	13
PMG 160 L	18	3000	254	254	108	42	110	382,5	311	160	318	538	45	12	13



Fuente: SOGA S.P.A, "Generatori a magneti permanente per velocita medio alte", 2011.

Se seleccionó a partir del catálogo de Sogaenergies²³, el generador PMG 112 de 2 módulos, debido a que la velocidad de operación es de 900 RPM y soporta una potencia de hasta 1,67 KW, la curva característica del generador se encuentran en la figura 25 y sus respectivas dimensiones se encuentran en la figura 26. Este a su vez incluye un rectificador con el fin de suministrar corriente eléctrica continua.

7.7 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE ELÉCTRICA

Estos elementos permiten que la energía eléctrica generada sea aprovechada al dar un suministro continuo que pueda abastecer a distintos elementos del coliseo. Como pueden ser electrodomésticos, luces, etc.

7.7.1 Selección de la batería. Para brindar un almacenamiento y posterior distribución de la energía eléctrica, es necesario seleccionar una batería que cumpla dicha función, la cual operará bajo los siguientes parámetros: 24 voltios y 800A-h; con un rendimiento de descarga del 50% y una pérdida por inversores asumida de cerca del 10%. Una batería de estas características puede llegar a alimentar un consumo diario de 8,7 KW-h. Sin embargo, se determinó en buscar una alternativa más práctica tanto en términos económicos como técnicos, puesto que los costos de una batería de este tipo pueden superar los \$10'000.000 COP, además de que la máxima producción de la turbina es de 2 KW-h al día, por lo cual, la carga duraría 5 días para alimentar los equipos por solo un día. Por esta razón se decidió buscar una alternativa más viable. Inicialmente se definió un consumo diario menor, en el cual solo se abarcarán los siguientes electrodomésticos encontrados típicamente en una cafetería de un coliseo (ver tabla 13).

²³ SOGA S.P.A, "Generatori a magneti permanente per velocita medio alte", 2011.

Tabla 13. Consumo típico de electrodomésticos.

Electrodoméstico	Potencia [KW]	Tiempo de uso por mes	Consumo mensual [KW-h]	Consumo diario [KW-h]
Nevera	0,180	300	54	1,8
Microondas	1	10	10	0,33
Cafetera	0.9	10	9	0,3
Bombillo LED	0,007	120	0,84	0,028
Bombillode 100W	0,1	120	12	0,4
Licuadaora	0,4	15	6	0,2

Fuente: EPM, “Uso inteligente de la energía eléctrica- Banco de recomendaciones”, [en línea]. [20 Junio 2018]. Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/2/documentos/banco_de_recomendaciones_uso_inteligente_energia_electricamarzo_27.pdf.

Debido a que se buscará una recarga diaria, el consumo propuesto no debe de superar los 2KW-h. Considerando que en un momento dado la demanda puede subir un 25%, se asumirá un consumo de 1,6KW-h al día: Debido a que las baterías no se descargan completamente, se plantea, que su utilización se limita a solo un 50% de su capacidad, además del hecho de que estos electrodomésticos trabajan en corriente alterna, lo que agrega una pérdida del 10% en la transformación. La carga debe ser:

$$Carga = \frac{Consumo * Perdida_{transformación}}{V * \%descarga} \quad (142)$$

$$Carga = \frac{1600 [W - h] * 1,1}{12[V] * 0,5} = 293[A - h]$$

$$Carga = \frac{1600 [W - h] * 1,1}{24[V] * 0,5} = 146,6[A - h]$$

Se selecciona una batería comercial de 12V y 300A-h, o una de 24V y 150 A-h.

7.7.2 Selección del inversor. Con el objetivo de poder suministrar la corriente eléctrica almacenada a los electrodomésticos, es necesario seleccionar un inversor que cumpla dicha función, este debe ser de 12 V o 24V, de manera congruente a la batería y una potencia determinada por los electrodomésticos a conectar; debido a que el sistema no es capaz de mantener en funcionamiento la nevera, se decidió considerar el resto de electrodomésticos para una potencia combinada de 2,4 KW, la cual se aumentará a 3KW con el fin de dar un margen de seguridad, sin embargo para esta potencia los inversores de 12 V son escasos y altamente costosos, por lo cual se decantó por uno de 24 V y 3KW, como el que se puede observar en la figura 27.

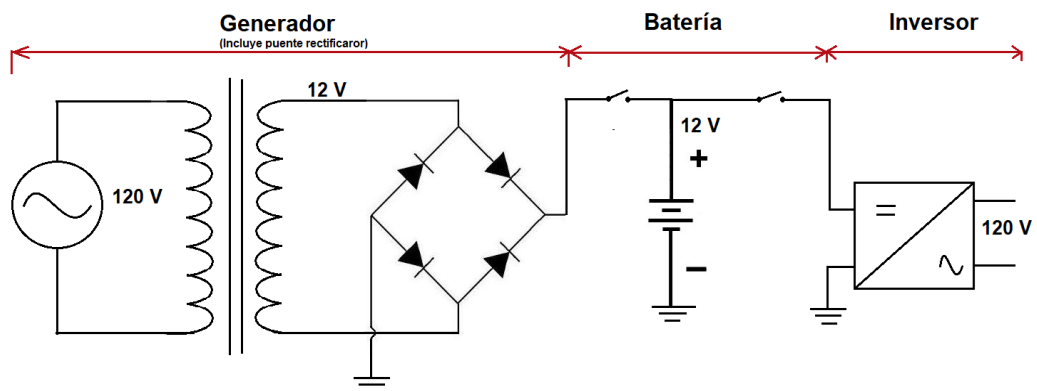
Figura 27. Inversor seleccionado.



Fuente: <https://listado.mercadolibre.com.co>

El sistema diseñado de generación, almacenamiento y distribución de la energía eléctrica se encuentra expresado de manera básica en el siguiente esquema.

Figura 28. Esquema Eléctrico.



8. CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

Este capítulo aborda el diseño, fabricación, adquisición y ensamblaje de los componentes de un modelo funcional, que caracterice el comportamiento del sistema de turbina propuesto y permita pruebas de desempeño. Además, se incluye la propuesta de diseño de un banco de laboratorio que ejemplifique el funcionamiento de este tipo de sistemas.

A partir de las dimensiones halladas en el capítulo 7, se empleó el CAD SOLIDWORKS para realizar el modelado de cada uno de los elementos del sistema y sus respectivos planos, se encuentran en el anexo E.

8.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FUNCIONAL

El diseño, fabricación y construcción del modelo funcional, se basó principalmente en el diseño de la turbina estipulado en el capítulo 7, con el objetivo de identificar el adecuado funcionamiento del componente principal de la central pluvio-eléctrica en su escala real.

Adicionalmente, Se optó por mantener las dimensiones obtenidas inicialmente en el proceso de diseño, debido a que el sistema se encuentra en el límite del tipo de turbina mencionado: una reducción de sus parámetros, siguiendo las leyes de semejanza, generaría un aumento considerable de las revoluciones de la turbina, restándole capacidad de torque.

8.1.1 Fabricación de la turbina. La mayor parte del modelo de la turbina fue fabricado en talleres especializados; el inyector, la carcasa, la transición de tubería y el rodete en un taller de láminas y el eje en un torno, bajo las especificaciones dadas en el anexo E, manteniendo las dimensiones originales. Los rodamientos y chumaceras fueron comprados a un distribuidor.

Figura 29. Manufactura del modelo de la turbina.



8.1.2 Selección de la bomba. Para emular la caída de agua, la circulación de caudal por la turbina, se obtiene mediante el uso de un sistema de bombeo. Es necesario seleccionar una bomba con el suministro de agua y altura de trabajo que se ajuste al punto de diseño de la central. sin embargo, Una bomba con un caudal de 10 LPS, implica un alto costo. Por estas razones, se seleccionó una bomba hidráulica Humbolt 296065 de 1/2 HP, que pueden llegar a suministrar un caudal de hasta 85 LPM y una altura de 21 m.

Figura 30. Bomba Humboldt 296065 de ½ HP.



8.1.3 Selección de los elementos de tubería. Tomando como base la salida y entrada de la bomba, es necesaria una tubería de 1", una reducción de 2" a 1", para poder acoplarse a la tubería de entrada de la turbina.

También, se seleccionó para un calibre de 1" los siguientes elementos: Codos; Uniones roscada, y las respectivas válvulas, una de globo y una válvula de pie. Además, de una manguera para realizar la succión en el tanque.

Figura 31. Sistemas de Tuberías.



8.1.4 Selección del tanque de suministro. El modelo funcional opera como un sistema cerrado, lo que requiere de un tanque de suministro y retorno del agua. Es necesario garantizar un recipiente capaz de suministrar el caudal de funcionamiento

del sistema, manteniendo un estado estacionario con un nivel suficiente que evite arremolinamientos en la entrada de la bomba que permitan el ingreso de aire a esta, además de soportar todo el volumen de agua que recircula por el sistema estando en reposo, por tanto, se seleccionó un recipiente de 50 L. (Ver figura 32).

Figura 32. Recipiente de 50 L.



8.1.5 Selección del sistema de generación y almacenamiento de energía eléctrica. Para el modelo funcional, se seleccionó un alternador Wasshardt, por motivos de bajo costo y fácil adquisición, además de que genera en corriente continua. La batería elegida tiene una capacidad de 12 V con 2.5 A. Dicho sistema se observa en la figura 33.

Figura 33. Alternado Wasshardt.



8.1.6 Lista de costos.

Tabla 14. Lista de costos.

Sistema	Pieza	Concepto	Cantidad	Costo [COP]	Costo Total [COP]
Turbina	Componentes en lamina	Carcaza, Rodete, inyector y transición de tubería	1	465.000	465.000
	Eje	Eje	1	100.000	
	Chumaceras y Rodamientos	Rodamiento	2	6.000	12.000
		Chumacera	2	14.000	28.000
Sistema de suministro de agua	Bomba	Bomba Centrifuga 0.5 HP	1	231.200	231.200
	Tubería PVC	Tubería PVC 1"	3m	4.000	12.000
		Tubería PVC 2"	1m	16.900	16.900
	Codos	Codo 90X1"	3	1.100	3.300
	Adaptador	Adaptador macho 1"	2	1.100	2.200
	Buje	Buje soldado 2 ^a 1	1	5.200	5.200
	Válvulas	Válvula de globo 1"	1	6.000	6.000
Sistema de Generación	Alternador	Alternador Wasshardt	1	220.000	220.000
	Batería	12 V 2.5 A	1	35.000	35.000
	Cableado	Cableado	2 m	2.000	4.000
Sistema de Soporte	Madera	Tablas	5	2.000	10.000
	Tornillería	Tornillería	-	-	30.000

8.2 ENSAMBLAJE

Se realizó el ensamble de las piezas del modelo funcional en los siguientes pasos:

- Acople del rodete de la turbina sobre el eje, fijado mediante una chaveta y pernos de sujeción.
- Ubicación de los rodamientos a un espaciado adecuado según las dimensiones de la carcasa.

Figura 34. Elementos del eje.



- Posteriormente se procedió a perforar la carcasa para la sujeción de los respectivos elementos del sistema, taladrando los agujeros con una broca de $\frac{1}{4}$ " y asegurando todos los componentes tanto a la carcasa como al marco, asegurando el inyector y la transición de tubería con cinta de ducto para evitar fugas.

Figura 35. Apertura de orificios.



Figura 36. Elementos del subsistema de la turbina.



Figura 37. Sistema desarrollado en el CAD.

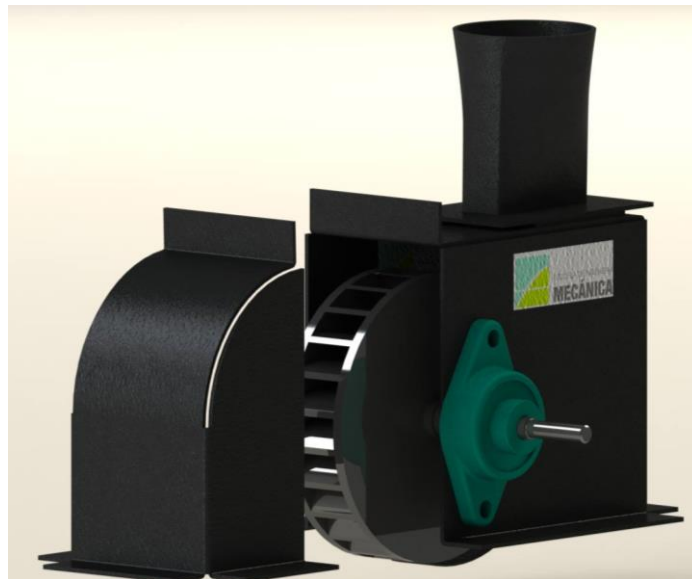


Figura 38. Sistema de la turbina ensamblado.



Se realizó un ensamble provisional de los componentes del modelo funcional con miras a desarrollar las pruebas preliminares de funcionamiento. Se construyó un marco de madera al cual se asienta el sistema.

Figura 39. Marco de Madera.



A continuación, se procedió a realizar los cortes de tubería para conectar la bomba a la turbina, empleando codos para cambiar la dirección del flujo e incluyendo una válvula de globo para poder regular el caudal y una reducción de 2" a 1", para poder acoplar la tubería a la entrada de la turbina.

Subsiguientemente, se procedió a conectar la tubería a la salida de la bomba, empleando un adaptador roscado recubierto con teflón para evitar fugas, y un adaptador de manguera a la entrada para poder realizar la succión.

Finalmente se unió el sistema de la bomba con el de la turbina y se procedió a probar el equipo

Figura 40. Sistema Funcionando.



8.3 RESULTADOS DEL MODELO FUNCIONAL

La toma de medidas para el modelo funcional, comprendido específicamente en la turbina, se decidió realizar para el caudal y las revoluciones del eje del rodete. No obstante, se desarrolló pruebas de generación eléctrica.

8.3.1 Medición del caudal de la bomba. Se realizó la medida empleando la toma de datos de volumen llenado en un periodo de tiempo de 10 segundos, para así

encontrar el valor del caudal, enfatizando en la apertura total de la válvula a la salida de la bomba como en la condición de una apertura al 50%.

Figura 41. Bomba del sistema.



Las medidas del tanque rectangular en profundidad y ancho son respectivamente 56.5 cm y 42 cm, lo que equivale a un área de 2373 cm^2 (Ver figura 42). Con respecto a la altura del tanque, se empleó un sistema de medición que contemplaba como primer parámetro, la altura inicial del tanque (H_1) y después de pasados los 10 segundos, la altura final del tanque (H_2), la diferencia entre estas dos alturas ($H_2 - H_1$), multiplicada por el área, resultaría en el volumen total trasladado; como se muestra en la ecuación 143. Estas mediciones se realizaron manteniendo constante el volumen del tanque de succión.

$$V_T [L] = 56.5 * 42 * \frac{H_2 - H_1}{1000} \quad (143)$$

Por consiguiente, para determinar el caudal que pasa por la bomba, se utiliza la ecuación 144.

$$Q_T \left[\frac{L}{s} \right] = \frac{V_T}{t} = \frac{V_T}{10} \quad (144)$$

Las tablas 15 y 16, muestran los valores tomados para cada uno de los parámetros, tomando 5 pruebas experimentales, tanto para la apertura total de la válvula como de una apertura parcial del 50%.

Figura 42. Tanque rectangular.



Tabla 15. Pruebas experimentales para apertura total de la válvula.

% APERTURA	H_1(cm)	H_2 (cm)	V(L)	Q(L/S)
100	19.5	27	17.7975	1.77975
100	25	32.5	17.7975	1.77975
100	21	29	18.984	1.8984
100	20	28	18.984	1.8984
100	23	31	18.984	1.8984

Tabla 16. Pruebas experimentales para apertura parcial del 50% de la válvula.

% APERTURA	H_1(cm)	H_2 (cm)	V(L)	Q(L/S)
50	23	27	9.492	0.9492
50	19	23	9.492	0.9492
50	23	27	9.492	0.9492
50	27	30.5	8.3055	0.83055
50	27.5	31	8.3055	0.83055

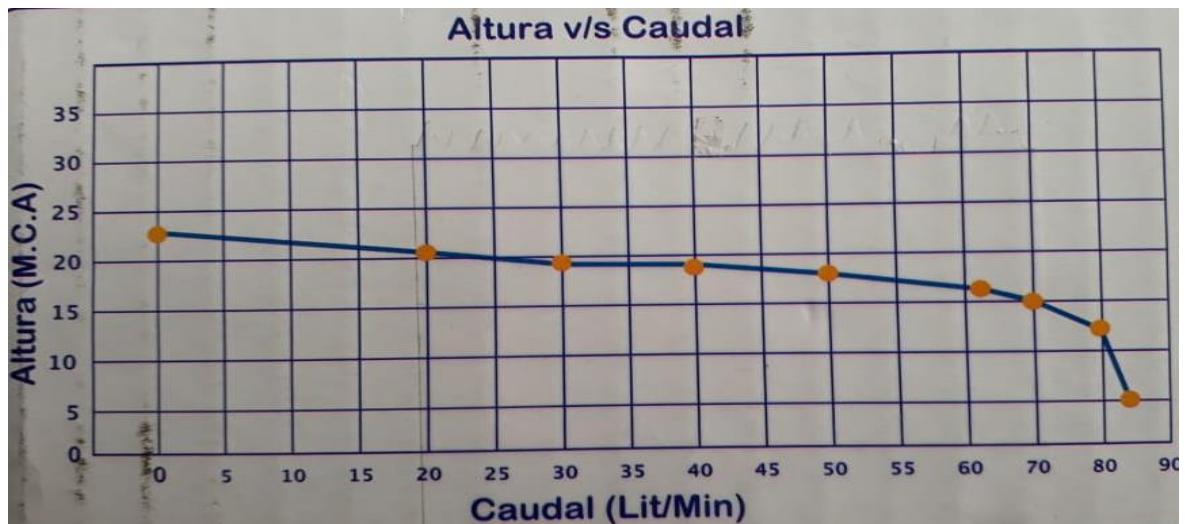
Realizando el correspondiente promedio de los caudales para cada uno de los casos planteados, los resultados se estipulan en la tabla 17.

Tabla 17. Caudal experimental del sistema.

% APERTURA	Q (L/S)
100	1.85094
50	0.90174

Los resultados de la medida del caudal muestran una congruencia con lo estipulado en la gráfica del fabricante de la bomba.

Figura 43. Curva altura vs caudal de la bomba.



8.3.2 Medición de las RPM. Para la toma de medidas de las revoluciones por minuto que presenta el eje de la turbina, se implementó un programa en ARDUINO, el cual mide dicho parámetro. Los resultados obtenidos abarcaban un promedio de 240 rpm.

8.3.3 Generación eléctrica del modelo funcional. Como complemento al análisis de funcionamiento del sistema, se incluye al modelo funcional un sistema de generación de energía eléctrica, a partir del cual se busca determinar la eficiencia global del conjunto de turbina y generador, partiendo de la potencia entregada por la bomba, posteriormente calculando la potencia eléctrica suministrada por el generador, mediante mediciones de voltaje y amperaje.

Figura 44. Sistema de generación acoplado a la turbina.



Para tal propósito se seleccionó el alternador wasshardt 31400-60B11, este generador requiere una alimentación externa para comenzar la generación para lo cual se conectó una batería de 12 V presentado en el numeral 8.1.4. Al probarlo mediante un acople directo al sistema no arrojó una generación de energía significativa, puesto que el sistema no logra RPM óptimas para el funcionamiento de este tipo de alternadores el cual debe de superar las 1800 RPM; resultando una generación, dichas pruebas se encuentran registrados en la tabla 18. En esta se puede observar que el sistema requiere cerca de 10 W para generar, sin embargo, la generación de energía es cercana a 1 W. La potencia del sistema inicia a partir de la bomba, la cual es capaz de suministrar 373 W (0,5 HP), y en la turbina se observó previamente que alcanzó las 240 RPM, por lo cual este mínimamente debía de superar el torque de arranque el cual fue:

$$P = T * \omega = I * \alpha * \omega \quad (145)$$

El sistema arranca casi instantáneamente, asumiendo 1s.

$$\alpha = \frac{(200 - 0)RPM}{1 s} * \frac{2\pi}{60} = 20.944 \left[\frac{1}{s^2} \right]$$

Para la inercia se asume que el rodete es un cilindro macizo de 4,5Kg

$$I = \frac{1}{2} * m * r^2 = 0,5 * 4,5[Kg] * 0.16^2[m^2] = 0,0576[Kg * m^2]$$

$$P = 0,0576 * 20,944 * 240 * \frac{2\pi}{60} = 30,32[W]$$

Por lo cual se denota que la mayor caída de eficiencia del sistema construido es el generador. Para solventar dicha problemática es necesaria aumentar las RPM, proponiendo un sistema de transmisión con relación de transmisión que permita aumentar al máximo las RPM, complementado con un aumento del caudal del sistema, empleando una bomba de mayor caudal o un arreglo en paralelo, el cual brinde unas condiciones de operación más cercanas a los parámetros de diseño.

Tabla 18. Medidas de generación eléctrica del modelo.

PRUEBA	TENSIÓN SUMINISTRADA	INTENSIDAD SUMINISTRADA	POTENCIA SUMINISTRADA	TENSION OBTENIDA	INTENSIDAD OBTENIDA	POTENCIA GENERADA
1	6.4 V	1.5 A	9.6 W	1,2 V	1.1 A	1.32 W
2	5.5 V	1.1 A	6.05 W	1.1 V	0.9 A	0.99 W
3	4.7 V	0.9 A	4.23 W	0.4 V	0.7 A	0.28 W
4	6.3 V	1.7 A	10.71 W	1.4 V	1.1 A	1.54 W
5	5.8 V	1.3 A	7.54 W	1.1V	0.9 A	0.99 W
6	4.9 V	1.0 A	4.9 W	0.5 V	0.8 A	0.4 W
7	4.2V	0.6 A	2.5 W	0.2 V	0.6 A	0.12 W
8	6.5V	1.6 A	9.75 W	1.1 V	1.1 A	1.21 W

8.4 DISEÑO DEL BANCO DE LABORATORIO

Con el fin de aportar al desarrollo de la investigación en este tipo de sistemas en la Universidad Industrial de Santander, se realiza el diseño de un banco de laboratorio para fomentar la práctica de los conceptos del funcionamiento de una turbina Michell-Banki, vertederos y generación a base de turbinas hidráulicas.

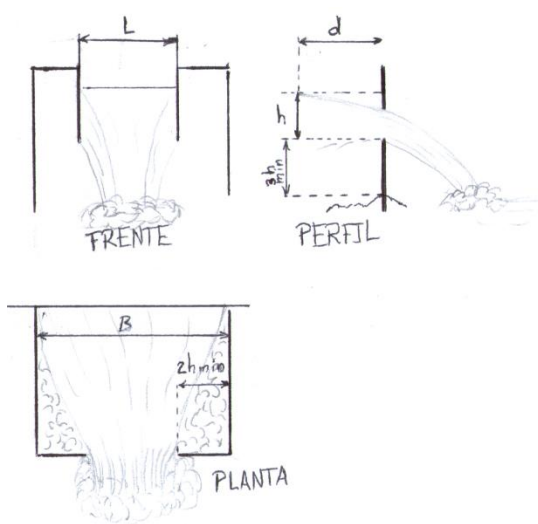
8.4.1 Componentes del banco. El banco tendrá una serie de componentes extras no contemplados en los objetivos del presente proyecto, para de una manera pedagógica realizar pruebas que correlacionen los diferentes parámetros del sistema.

8.4.1.1 Selección de la bomba. Para emular la caída de agua, la circulación de caudal por la turbina, se obtiene mediante el uso de un sistema de bombeo. Es necesario seleccionar una bomba con el suministro de agua y altura de trabajo que se ajuste al punto de diseño de la central. Sin embargo, una bomba con un caudal de 10 LPS, implica un alto costo. Por estas razones, se seleccionaron dos bombas hidráulicas Humbolt 296065 de 1/2 HP, para trabajar en paralelo, que pueden llegar a suministrar un caudal de hasta 150 LPM (25% del caudal de diseño) y una altura de 21 m. Este arreglo de bombas en paralelo permite una regulación adecuada del sistema.

8.4.1.2 Diseño del tanque. Es necesario garantizar un recipiente capaz de suministrar el caudal de funcionamiento del sistema, manteniendo un estado estacionario con un nivel suficiente que evite arremolinamientos en la entrada de la bomba que permitan el ingreso de aire a esta, y siendo capaz de soportar todo el volumen de agua estando en reposo.

8.4.1.3 Vertedero²⁴. Es un dispositivo hidráulico que consiste en una escotadura donde se hace circular el agua, permitiendo la medición del caudal que pasa por el sistema. Existen varios tipos de vertederos, sin embargo, se decantó por incorporar al banco un vertedero de pared delgada, cuyas paredes coinciden con las paredes del canal, debido a la practicidad que implica su incorporación.

Figura 45. Dimensiones de un vertedero.



Fuente: TRUEBA CORONEL, Samuel. “Circulación del agua en vertederos”, en “Hidráulica sexta edición”, México D.F., Compañía editorial continental S.A., 1964, pág. 81-106.

El gasto se encuentra regido por la Fórmula de Francis, la cual permite realizar un cálculo inicial de las dimensiones que pueda requerir el vertedero.

$$Q = 1.84(L - 0.1nh)h^{\frac{3}{2}} \quad (146)$$

Q: Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

L: Ancho del vertedero [m]

n: Numero de contracciones laterales (0,1 o 2)

²⁴ TRUEBA CORONEL, Samuel. “Circulación del agua en vertederos”, en “Hidráulica sexta edición”, México D.F., Compañía editorial continental S.A., 1964, pág. 81-106.

h:carga del vertedor[m]

Empleando un proceso iterativo para un 120% del caudal máximo de trabajo de la bomba, es decir 1,8LPS, fueron determinadas las siguientes dimensiones:

$L=0,12[m]$, $n=0$ debido a que no hay contracciones, para dar una carga máxima $h=0,04051[m]$

La altura de la pared de descarga es de 13 cm; la distancia $d=25\text{cm}$ a la cual se mide la cresta, es para evitar una afectación por el abatimiento del manto sobre la cresta.

El vertedero recibirá el agua proveniente de la descarga de la turbina, por lo cual es necesario diseñar un estabilizador de flujo que evite que se transforme en turbulento y genere una cresta no uniforme, será una placa con pequeños orificios circulares que busquen estabilizar la corriente, ubicada justo al salida de la zona de descarga de la turbina.

Las dimensiones finales del vertedero se pueden observar en el anexo F.

8.4.1.4 Cálculo del volumen del tanque. Este será definido a partir del volumen de agua que llega a fluir en el circuito, una vez que este haya alcanzado un estado de operación permanente, el volumen es comprendido por el agua en el vertedero, en el sistema de tubería y en el tanque en ese momento dado.

Durante la operación en régimen permanente, el volumen de agua máximo aproximado que circulará por el vertedero será: $V_v = 0,7 * 0,17 * 0,12 = 0,0143[m^3] = 14,3[L]$

En el sistema de tuberías, asumiendo un total de 3 metro de tubería de 1 pulgada será: $V_t = 3 * \frac{0,0254^2}{4} * \pi = 0,0015[m^3] = 1,5[L]$

El tanque debe tener un nivel lo suficientemente alto para evitar arremolinamientos en la entrada de la bomba que permita el ingreso de aire a esta, por lo cual se establecerá un nivel mínimo de 20 cm, dichas dimensiones pueden observarse en

el anexo F, este se llenará en un inicio hasta una altura de 30 cm con un volumen de $V_{T_{inicial}} = 0,35 * 0,6 * 0,3 = 0,063[m^3] = 63[L]$ cuando el sistema esté operando el tanque tendrá una altura de 22 cm.

8.4.1.5 Diseño del marco. Con el fin de brindar un soporte para todos los elementos del banco, es necesario diseñar una estructura, que brinde no solo el apoyo necesario, sino que permita un fácil acceso a cada uno de los subsistemas necesarios para comprender el funcionamiento del banco, por esta razón, se decidió crear una estructura de 4 niveles. En el nivel superior se encontrará la turbina junto al sistema de transmisión, el generador y la batería; en el nivel intermedio se ubicará el vertedero, el cual descargará hacia al tanque, tendrá una salida hacia el nivel inferior donde se encontrará la bomba, para evitar problemas de succión.

Figura 46. Banco de laboratorio Turbina Michell-Banki



9. MANUAL DE MANTENIMIENTO

Para asegurar un correcto desempeño del sistema “pluvio-eléctrico” y garantizar la perdurabilidad del mismo durante su vida útil, es necesario brindar las pautas de su correcta operación y mantenimiento. Por lo tanto, es necesario desarrollar un manual de mantenimiento que incluya la descripción de la operación correcta del sistema, un plan de mantenimiento que indique las acciones respectivas a tomar y un diagnóstico de falla para enfrentar las ocurrencias más comunes que se puedan presentar.

9.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL SISTEMA “PLUVIO-ELÉCTRICO”.

Esta sección introduce al usuario a los componentes principales del sistema.

Turbina: Este comprende toda la parte concerniente a la turbina Michell-Banki, su eje, rodamientos y la carcasa en la cual está soportada.

Sistema de almacenamiento: Consta de un tanque longitudinal ubicado en la periferia del techo de la estructura, permite almacenar el agua lluvia hasta que pueda descargarla hacia la turbina, este sistema consta a su vez de las tuberías que conducen el agua hacia la turbina, un filtro que evita el paso de material de gran tamaño a la misma y la válvula de descarga hacia la turbina.

Sistema de control: Este consta de un pequeño tablero electrónico, el cual activa los comandos del sistema de control que indica la abertura o cierre de la válvula de descarga del sistema.

Sistema de generación: Consta del generador de imanes permanentes, articulado al eje de la turbina mediante un acople, recibe el torque generado y convierte la energía mecánica en eléctrica, entregando 12V de corriente continua gracias al rectificador incorporado, la energía producida es almacenada en una batería para su posterior utilización.

9.2 MANUAL DE INSTALACIÓN

Con el fin de suministrar la información necesaria para la instalación, se detallarán los requerimientos necesarios para implementar el sistema.

9.2.1 Adecuación de la sala de la turbina. Es indispensable contar con un espacio destinado para la ubicación de la turbina, el sistema de generación y los mandos del sistema de control. Para esto se requiere adecuar un espacio con las siguientes características:

En primera instancia, es necesaria la construcción de un soporte que apoye la turbina, las especificaciones de las dimensiones se centran en la sección de construcción, sumidero o depósito de agua en la planta baja, con el fin de poder recibir el caudal proveniente de la turbina. Si se quiere disponer de esta, se recomienda la construcción de un reservorio, de lo contrario se puede comunicar directamente, ya sea a un tanque inferior o bien directamente al alcantarillado. Las dimensiones mínimas de la base serán estipuladas en la fase de construcción. Además, se debe incluir un soporte para el generador.

9.2.2 Instalación del tanque. Se requiere mano de obra especializada, puesto que implica un trabajo en altura, debido a que el tanque tiene una estructura que recuerda a una canaleta que se requiere ubicar en la periferia del techo, apoyada en el marco estructural, cabe resaltar la importancia de instalar las secciones del tanque en el orden estipulado para evitar un desnivel o estanquidad en el mismo (Ver figura 47).

Figura 47. Estructura del coliseo.



Fuente: GOOGLE LLS; Vista de carretera del coliseo el Cristal Buenaventura, [en línea]. [21 Noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/@3.8800219,-77.015068,3a,30.4y,343.23h,117.3t/data=!3m6!1e1!3m4!1sZ924oSopvtigTkgUbmY5gg!2e0!7i13312!8i6656>

Posteriormente, se procede a instalar la tubería que dirige a la turbina, el tramo inicial se conecta a la salida del tanque. Debe acoplarse con la válvula de descarga. Finalmente, se instala la turbina junto al conjunto del generador y el banco de baterías.

9.3 MANUAL DE OPERACIÓN

Para brindarle al operario una descripción del funcionamiento general del sistema, se desarrolló un manual de operación que indica los tipos de actividades necesarias para garantizar el correcto funcionamiento y manipulación del sistema, para lo cual se describirán la secuencia de pasos a realizar.

9.3.1 Puesta en marcha

Paso 1; Revisar el estado del sistema de almacenamiento en búsqueda de posibles obstrucciones.

Paso 2; Revisar que el subconjunto de la turbina y el sistema de generación, los cuales deben de estar libres de objetos o materiales que no correspondan a sus componentes, además de realizar un giro manual de la turbina para verificar que no existe ningún tipo de impedimento en el giro.

Pasó 3; Verificar que las conexiones eléctricas del tablero de control estén en buenas condiciones, haciendo énfasis en que el interruptor se encuentre en apagado.

Paso 4; Accionar el almacenamiento de agua, es necesario esperar al llenado completo del tanque con el fin de determinar si el sistema funciona correctamente.

9.3.2 Parada de planta. El apagado del sistema solo consta de un paso, el cual es apagar el sistema de control y accionar la descarga del tanque, el agua se empezará a drenar sobre la turbina. Este paso es necesario antes de cualquier acción de manteamiento y el proceso de descarga dura aproximadamente 20 minutos.

9.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO

Con el fin de mantener la disponibilidad del sistema, es necesario desarrollar un plan que integre las acciones a realizar, una lista de las posibles fallas con sus respectivas causas y soluciones; además de un formato donde el operario pueda escribir todas las acciones y observaciones pertinentes, para caracterizar el comportamiento del sistema.

9.4.1 Registro de mantenimiento. En este documento se registrarán todos los acontecimientos percibidos durante la operación normal, como en rutinas de mantenimiento con el fin de caracterizar el comportamiento del sistema, de esta manera, se tendrá un registro estadístico de paramentos como la tensión e

intensidad eléctrica. En cada acción de mantenimiento se diligenciará el documento estipulado en el anexo G.

9.4.2 Localización de averías. Para poder tener un marco de referencia frente a averías comunes del sistema, se listarán posibles fallas, sus probables causas y soluciones.

9.4.2.1 Diagnóstico de fallas. A continuación, se detallan las fallas más relevantes en una microcentral, y las posibles alternativas de solución:

Tabla 19. Diagnóstico de fallas sistema de almacenamiento de agua.

Síntomas	Diagnósticos y causa(s) Probables	Soluciones Probables
El caudal suministrado no es el establecido	<ul style="list-style-type: none"> • Obstrucción en uno de los filtros • La válvula de descarga no se abre completamente 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoción y limpieza cambio de los filtros • Prueba de la válvula con el sistema de control
El nivel del agua supera el nivel establecido	<ul style="list-style-type: none"> • La válvula no abre completamente • El conducto de drenaje de seguridad en la parte superior del tanque está bloqueado 	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba de la válvula con el sistema de control • Revisión del tubo en busca de obstrucciones
Fugas de agua entre las uniones	<ul style="list-style-type: none"> • El ajuste entre uniones del tanque es insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> • Reajuste de la tornillería

Tabla 20. Diagnóstico de fallas de la turbina.

Síntomas	Diagnósticos y causa(s) Probables	Soluciones Probables
La turbina no gira	<ul style="list-style-type: none"> Bloqueo de las partes móviles de la turbina 	<ul style="list-style-type: none"> Revisión manual del giro del eje y retirar cualquier cuerpo ajeno atascado
La turbina no gira a la velocidad estipulada (disminución de potencia)	<ul style="list-style-type: none"> Insuficiente agua llega al inyector Elevación del nivel de agua de la fosa de la turbina 	<ul style="list-style-type: none"> Revisión del sistema de almacenamiento en busca de obstrucciones Revisión del canal de descarga en busca de taponamientos.
Presencia de ruidos al interior de la carcasa	<ul style="list-style-type: none"> El agua lleva consigo sedimentos Los rodamientos están flojos 	<ul style="list-style-type: none"> Esperar en uno ciclos de descarga más, si persiste revisión de la superficie de recolección Apretar los tornillos de sujeción
Vibración excesiva de la turbina	<ul style="list-style-type: none"> Rodamientos desgastados 	<ul style="list-style-type: none"> Revisión y cambio de rodamientos

Tabla 21. Diagnóstico de fallas del generador.

Síntomas	Diagnósticos y causa(s) Probables	Soluciones Probables
No hay generación	<ul style="list-style-type: none"> Problemas de conexión 	<ul style="list-style-type: none"> Revisar las salidas de los terminales
Vibración fuerte del generador	<ul style="list-style-type: none"> Desalineamiento del eje Pernos de sujeción flojos 	<ul style="list-style-type: none"> Consulte un técnico especialista Ajuste de tornillería
Calentamiento excesivo o presencia de humo	<ul style="list-style-type: none"> Cortocircuito en el equipo por presencia de humedad 	<ul style="list-style-type: none"> Apagar el sistema revise la fuente de la humedad, seque el equipo.

Tabla 22. Diagnóstico de fallas del sistema de control.

Síntomas	Diagnósticos y causa(s) Probables	Soluciones Probables
El sistema no abre o cierra la válvula	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de conexión con la válvula • Sistema del accionamiento de la válvula defectuoso o Sistema de control descalibrado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Revisar las salidas de los terminales • Revisión del accionamiento de manera manual y posteriormente empleando el sistema de control de ser el sistema de control contacte a un técnico especializado

9.4.3 Acciones de mantenimiento. Para evitar paradas innecesarias, mantener un buen funcionamiento del equipo y extender al máximo la vida útil del sistema, se recomiendan una serie de acciones de mantenimiento preventivo para el equipo, estas se encuentran expresadas en forma de instrucciones técnicas, junto a un formato de orden de mantenimiento en el anexo H y el anexo I.

9.4.3.1 Mantenimiento del sistema de almacenamiento. Debido a la gran superficie de captación que representa el techo del coliseo, es muy posible que ramas y hojas se asienten sobre su superficie y estas sean arrastradas por la lluvia. El sistema cuenta con un filtro que mantiene la mayor parte, fuera del ducto de descarga, por tanto, se recomienda una limpieza periódica. El tiempo entre limpiezas dependerá de cuanto material llegue a acumularse, sin embargo, como no hay árboles más altos aledaños a la edificación, los periodos podrán inclusive ser superiores al año.

9.4.3.2 Mantenimiento de la turbina. Desde el momento de la puesta en servicio del rodete debe controlarse las fisuras y desgastes en los periodos indicados a continuación:

Tabla 23. Mantenimiento de la turbina.

Periodo de revisión	Tipo de revisión	Equivalencia aproximada en días, meses y años.
24 horas de servicio	Control visual	10 días
450 horas de servicio	Control visual	180 días 6 meses
900 horas de servicio	Control a fisuras superficiales en los cangilones y en la raíz de los mismos.	1 año
1800 horas de servicio	Control visual	2 años
4000 horas de servicio	Control a fisuras superficiales en todo el rodete. Este control debe repetirse cada 4000 horas.	4 años y medio

Para la equivalencia, se asume que la turbina trabaja durante 140 minutos por día. Estos intervalos de tiempo se repiten para rodetes en los que fueron efectuados soldaduras de reparación.

9.5 APLICABILIDAD A OTRAS ESTRUCTURAS

Con el fin de globalizar la implementación de este tipo de sistemas, a continuación, se mostrará una tabla que contenga las producciones de energía por mes por metro cuadrado de superficie de recolección, para distintas locaciones de Colombia y el mundo, considerando edificios de las mismas características. La siguiente ecuación permite calcular la energía teórica que puede llegar a producir un sistema “pluvio-eléctrico” por mes por metro de recolección.

$$E = Pot * t \quad (147)$$

$$Pot[W] = Q * \Delta h * 9810 \quad (148)$$

$$t[s] = T_{descarga} = \frac{V_{recolectado}}{Q} = \frac{Pluviosidad_{anual} * \Omega_{recoleccion}}{Q} \quad (149)$$

$$E[J] = \frac{Q * \Delta h * 9810 * Pluviosidad_{anual} * 1[m^2]}{Q} * \frac{1[W - h]}{3600[J]} * \frac{1}{12} \quad (150)$$

$$E_{m^2} \left[\frac{W - h}{m^2 * mes} \right] = 0.227 * \Delta h * Pluviosidad_{anual} \quad (151)$$

A Continuación, se puede observar la tabla 24 que expresa la producción real del sistema propuesto, en distintas ciudades.

Tabla 24. Producción de Energía por ciudad.

CIUDAD / PAIS	PLUVIOSIDAD MEDIA ²⁵	ENERGÍA PRODUCIDA MENSUALMENTE POR M ²
Buenaventura / Colombia	6,275	14 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$
Quibdó / Colombia	8,130	18 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$
Popayán / Colombia	2,127	5 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$
Barrancabermeja / Colombia	2.836	6.5 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$
Hilo / Hawái (USA)	3.218 ²⁶	7 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$
Kuala Lumpur / Malasia	2.427	5.5 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$
Bergen / Noruega	2.250	5 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$
Bombay / India	2.258	5 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$
Singapur / Singapur	2.150	5 $\frac{W-h}{m^2 * mes}$

Nota. La tabla está corregida con las eficiencias.

²⁵ IDEAM, "Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [en línea]. [5 Abril 2018]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>

²⁶ Organización Meteorológica Mundial, "Servicio de Información Meteorológica Mundial" ", [en línea]. [15 Julio 2018]. Disponible en: <http://wwis.aemet.es/es/city.html?cityId=22>

10. UTILIDAD DEL AGUA POS-GENERACION

Para proyectar la aplicación del sistema a distintos escenarios, se planteó un modelo de aplicación que permita solventar problemáticas de tipo sociales y ambientales. Consiste en la construcción de un sistema de suministro de agua potable doméstico, integrando los sistemas de recolección, almacenamiento y generación del proyecto junto a una planta de purificación de agua. En conjunto permitirán brindar con agua potable una casa sin necesidad de una conexión proveniente del acueducto.

10.1 PROYECCIÓN SOCIAL

Colombia es el tercer país con más agua dulce disponible, sin embargo, cerca del 40% de la población no tiene acceso a agua potable²⁷, gran parte de estas comunidades se encuentran rodeadas de ríos en las regiones más húmedas del planeta; no solo ocurre en la zona rural, centros urbanos del calibre de Santa Marta y Buenaventura, también son afectados por dicha problemática^{28,29}. Vivir en este tipo de condiciones permite la proliferación de enfermedades, causadas por beber agua contaminada con mercurio, jabón, detergente, eses, desechos industriales entre otros contaminantes. Estos elementos reducen la expectativa de vida de toda la comunidad, siendo la causa de la muerte 1300 niños a nivel nacional³⁰. Por tanto, este sistema permitiría solventar la problemática, al recolectar y generar la energía

²⁷ PORTAFOLIO, “Solo el 60% de los colombianos recibe agua potable”, [en línea]. [20 Noviembre 2017]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/economia/finanzas/60-colombianos-recibe-agua-potable-55800>.

²⁸ EL TIEMPO, “Santa Marta aún no ha superado problemas de acueducto y alcantarillado”, [en línea]. [20 Mayo 2018]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/problemas-de-acueducto-y-alcantarillado-en-santa-marta-178744>.

²⁹ EL PAIS, “¿Por qué ninguna plata alcanzo para llevar agua a Buenaventura?”, [en línea]. [20 Noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.elpais.com.co/valle/por-que-ninguna-plata-alcanzo-para-llevar-agua-a-buenaventura.html>.

³⁰ SEMANA, “Cada año mueren 1300 niños por falta de agua potable y saneamiento básico”, [en línea]. [20 Noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.semana.com/noticias/recuadro/cada-ano-mueren-1300-ninos-falta-agua-potable-saneamiento-basico/131193-3>

suficiente a partir del agua lluvia, para utilizarla en la purificación del líquido. Brindado una mejor calidad de vida a comunidades olvidadas por el estado.

Este tipo de sistema sería capaz de solventar dicha necesidad fácilmente en zonas con precipitación mínima de 2 m por año, tan solo se necesitaría una superficie de recolección de 62 m^2 que solventaría el consumo de una familia promedio.

Un sistema de estas características fomenta la auto-sostenibilidad, una tendencia que busca que las futuras casas sean capaces de autoabastecerse, empleando un diseño que minimice al máximo el consumo de energía, la cual sea suministrada de manera autónoma a partir de fuentes renovables, nuestro sistema amplia este concepto a otros servicios domiciliarios, enfocándose al suministro de agua potable, el cual llegaría a ser independiente de la red local, fomentando a su vez un uso responsable de dicho recurso.

10.2 PROYECCIÓN AMBIENTAL

El suministro de agua en Colombia se basa principalmente en la recolección proveniente de ríos empleando plantas de almacenamiento por bombeo, las cuales captan parte del caudal del río y la bombean a zona habitable, otro método es la construcción de embalses, los cuales interrumpen el caudal de un río hasta alcanzar un nivel de almacenamiento que suministra agua a la población, sin embargo, este método trae consigo una serie de consecuencias ambientales similares a las de una represa hidroeléctrica, destacando la interrupción del flujo de sedimentos río abajo, reducción de productividad de las tierras río abajo, afectación a la fauna y flora local al crear una barrera que impide la migración de peces hacia sus zonas de desove, pérdida de la calidad del agua río abajo y la creación de un nuevo micro clima en la zona debido al espejo de agua generado. El sistema propuesto carece de todas estas problemáticas debido a que es una planta que se limita al agua que cae en la superficie de recolección.

10.3 PURIFICADOR DE AGUA

El caso de estudio se enfoca principalmente a la utilización de un purificador de agua, que pueda complementar el sistema de generación de energía eléctrica a base del agua-lluvia, es decir, dicho sistema debe ser la utilidad del agua-lluvia, una vez este pasa por el ciclo de generación. La energía proveniente del generador será la fuente que abastecerá dicho purificador, lo que haría que este fuera un sistema auto-sustentable y limpio ecológicamente.

10.3.1 Purificación del agua-lluvia. El objetivo que tiene un purificador, es brindar un tratamiento adecuado y limpio al agua, para eliminar aquellos organismos o residuos con el fin de aumentar la pureza y calidad del líquido para utilizarlo tanto en tareas domésticas como en consumo sin riesgos. Existen diferentes métodos que permiten la correcta purificación del agua-lluvia; entre ellas se encuentran: Cloración, Filtración, Carbón activado, suavización del agua, osmosis inversa, rayos de luz ultravioleta y la ozonificación del agua³¹.

Es posible encontrar en la industria, múltiples purificadores de diferentes empresas a nivel mundial que tienen los distintos métodos anteriormente mencionados, su instalación es realmente fácil, no obstante, se debe tener en cuenta los diferentes parámetros que piden los fabricantes para que pueda funcionar de manera óptima en el lugar deseado.

Para el caso de estudio, se eligió el purificador de agua-lluvia de desinfección y limpieza automática ultravioleta (UV) de la empresa Jiangsu YLD Water Processing Equipment Co. Ltd ubicada en China; Hay diferentes modelos que dependen principalmente del caudal a purificar. Posee características generales tales como: Presión máxima de 1.0 Mpa, fuente de alimentación de 100-120 V a 50/60 Hz,

³¹ PLANETA AZUL. "Aprende más acerca del agua - Métodos para purificar el agua en casa". [en línea]. [26 Junio 2018]. Disponible en: <http://comunidadplanetaazul.com/agua/aprende-mas-acerca-del-agua/metodos-para-purificar-el-agua-en-casa/>

Temperatura entre (0-60) °C, Ph del agua purificada entre 6.5 a 9.5, con proyección de una vida útil entre 15 a 20 años.

10.3.1.1 Tratamiento del agua-lluvia por rayos ultravioleta (UV)³². Tratamiento del agua-lluvia que cumple la función de matar aquellos microorganismos o bacterias que se encuentra en el agua para asegurar su suministro de manera óptima, regularmente es utilizado para la industria alimentaria debido a legislaciones. Es un mecanismo que no necesita de ningún producto químico que pueda afectar la pureza del agua. Funciona con una lámpara fluorescente germicida que genera una longitud de onda de 254 nm. Este sistema solamente puede utilizarse para aquellas fuentes no contaminadas por otros agentes como la lluvia.

10.3.1.2 Selección del purificador del agua-lluvia. Las condiciones de trabajo especifican que la generación de electricidad va ser por 2 horas, donde aproximadamente deberán pasar 72 m³, es decir, va a tener un caudal de 36m³/h. Como se representa en la tabla 25, el modelo que más se acerca a lo planteado es el YLC-1000 que trabaja a una potencia de 360 W. Las dimensiones de los componentes están de manera adecuada para ser instalada en el coliseo.

El anterior equipo fue seleccionado para una operación de dos horas diarias, no obstante, la purificación no tiene un limitante de tiempo, por lo cual puede llegar a escogerse un modelo como el YLCn-300 de 12m³/h con potencia de 160 W, que trabaje a 6 horas diarias.

³² Alibaba, "Luz UV esterilizadores", [en línea]. [26 Junio 2018]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/rain-water-disinfection-system-automatic-cleaning-ultraviolet-uv-water-purifier-685377735.html?spm=a2700.8698675.29.2.7330460aoQ20EY&s=p>

Tabla 25. Elección del modelo del purificador de agua-lluvia.

Model	Water Flow	Power	Inlet/Outlet Diameter		Reactor Diameter(L*W*H)	Control Cabinet(L*W*H)
	(m ³ /h)	W	mm	in	mm	mm
YLCn-005	0.3	16	20	1/2"	350*63*110	N/A
YLCn-008	1	25	20	1/2"	470*63*110	N/A
YLCn-050	2	40	25	1"	930*76*130	N/A
YLCn-150	6	80	32	1+1/4"	930*108*240	250*140*300
YLCn-200	8	120	40	1+1/2"	930*133*270	250*140*300
YLCn-300	12	160	50	2"	930*159*290	300*150*400
YLC-360	15	200	65	2+1/2"	930*159*370	300*150*400
YLC-500	20	240	65	2+1/2"	930*159*370	300*150*400
YLC-600	25	280	80	3"	930*159*370	300*150*400
YLC-700	30	320	100	4"	930*159*370	300*150*400
YLC-1000	40	360	100	4"	930*159*370	350*200*450
YLC-1200	50	400	125	5"	930*219*450	350*200*450
YLC-1500	60	420	150	6"	1630*219*450	400*200*500
YLC-2000	80	560	150	6"	1630*219*450	400*200*500
YLC-2500	100	700	150	6"	1630*219*450	400*200*500
YLC-3000	125	840	150	6"	1630*219*450	500*200*600
YLC-4000	150	1120	200	8"	1630*273*530	500*200*600
YLC-5000	200	1400	200	8"	1630*273*530	500*200*600
YLC-7000	300	2100	250	10"	1630*325*580	500*350*1000
YLC-10K	400	2520	250	10"	1630*325*580	500*350*1000
YLC-15K	600	3080	300	12"	1630*377*640	600*350*1200

Fuente: ALIBABA, "Luz UV esterilizadores", [en línea]. [26 Junio 2018]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/rain-water-disinfection-system-automatic-cleaning-ultraviolet-uv-water-purifier-685377735.html?spm=a2700.8698675.29.2.7330460aoQ20EY&s=p>

Figura 48. Purificador de Agua-lluvia por rayos ultravioleta.



Fuente: ALIBABA, “Luz UV esterilizadores”, [en línea]. [26 Junio 2018]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/rain-water-disinfection-system-automatic-cleaning-ultraviolet-uv-water-purifier-685377735.html?spm=a2700.8698675.29.2.7330460aoQ20EY&s=p>

Luego de efectuarse la purificación, este pasara a un sistema de almacenamiento, donde a decisión del propietario, se podría utilizar en el coliseo para cumplir con las necesidades propias del mismo o suministrar el líquido a viviendas aledañas al lugar.

11. ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO

Todo proyecto debe ser sometido a un análisis económico con el fin de identificar la viabilidad del mismo, dicho proceso debe incluir métodos o criterios decisorios que puedan permitir que beneficios o desventajas puede llegar a tener el desarrollo del sistema en referencia a lo económico. El objetivo de tomar la decisión debe ser en base a lograr cuantificar las características económicas que posee el proyecto para concluir si es viable o no el desarrollo del mismo, a este enfoque se le denomina evaluación económica de proyectos³³, que en base a conceptos tales como valor presente neto (VPN), valor futuro neto (VFN), valor anual neto (VAN) o tasa interna de retorno (TIR), se logra identificar la viabilidad del proyecto. En el presente capítulo enfocado al análisis económico del sistema de generación de energía eléctrica a base de agua-lluvia se mencionará los costos del proyecto tanto fijos como de operación, el análisis del periodo de retorno (payback) y VPN.

11.1 BENEFICIOS ECONÓMICOS

No solo basándose en la parte de si hay o no ingreso monetario al implementar la planta de generación de energía eléctrica a base de agua-lluvia o de reducir los gastos de energía, también se debe dar un grado de importancia a que sería el inicio de un nuevo tipo de energía limpia y renovable que permita la conservación de los ecosistemas; no se puede ignorar que son escasos los conocimientos y avances en referencia a la utilización del agua-lluvia como fuente prima de dicha generación, sobresaliendo la dificultad de obtener caudales de gran valor y a su vez potencias que permitan girar el eje de una turbina si no se lograra almacenar previamente, y es ahí, donde el reto de la generación de energía a base de este elemento cobra un valor significativo, que mediante investigaciones futuras no necesite este almacenamiento o con un método diferente logre ser efectiva desde la parte técnica

³³ VARELA VILLEGAS, Rodrigo, "Evaluación Económica de Proyectos de Inversión Séptima Edición", Bogotá, McGraw-Hill, 2010.

(como el presente diseño), y así, rompa este paradigma para lograr la viabilidad económica.

No obstante, Con el objetivo de proyectar la utilización del sistema a diferentes escenarios, se planteó un caso de estudio para solventar problemáticas de tipo social y ambiental (Beneficios), que puede conseguir la actual investigación y esta explicado más detalladamente en el capítulo 10.

11.2 PRESUPUESTOS

Los presupuestos mencionados en el presente capítulo, van enfocados a cada uno de los elementos que van a ser adquiridos, si la planta “pluvio-electrica” se ejecutara y ensamblara para cumplir con su función establecida.

11.2.1 Presupuesto fijo. Son los que se deben implementar al momento del ensamblaje de la planta, tales como: Costos de la turbina, costos del generador y batería, costos del tanque, costos del control del tanque, costos de tubería y costos por mano de obra.

Tabla 26. Presupuesto de la tubería a presión.

NOMBRE	UNID.	CAN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Tubería PVC D=2 1/2'	m	20	\$ 4,000	\$ 80,000
Codos PVC D=2 1/2'	#	6	\$ 2,000	\$ 12,000
Válvula de Compuerta PVC D=2 1/2'	#	1	\$ 35,000	\$ 35,000
Válvula de Bola PVC D=2 1/2'	#	2	\$ 10,000	\$ 20,000
Unión PVC D=2 1/2'	#	1	\$ 5,000	\$ 5,000
Soldadura para PVC	#	3	\$ 5,200	\$ 15,600
Teflón	#	3	\$ 1,300	\$ 3,900
Tubo T PVC D= 2 1/2'	#	3	\$ 2,000	\$ 6,000
Amarradera Metálica	Paqx10	1	\$ 30,000	\$ 30,000
Tornillería General	Paqx6	10	\$ 5,000	\$ 50,000
Transporte al lugar	#	1	\$ 15,000	\$ 15,000
Elementos para instalación	#	1	\$ 80,000	\$ 80,000
TOTAL				\$ 352,500

Tabla 27. Presupuesto del tanque y su control.

NOMBRE	UNID.	CAN.	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Reja de filtro	#	1	\$ 50,000	\$ 50,000
Tanque de recolección	#	1	\$ 1,500,000	\$ 1,500,000
Sistema de control	#	1	\$ 200,000	\$ 200,000
Elementos para instalación	#	1	\$ 100,000	\$ 100,000
Transporte	#	1	\$ 20,000	\$ 20,000
Amarraderas	paqx10	15	\$ 30,000	\$ 450,000
TOTAL				\$ 2,320,000

Tabla 28. Presupuesto de la Turbina.

NOMBRE	UNID.	CAN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Turbina Michell-Banki (Laminas)	#	1	\$ 500,000	\$ 500,000
Acople	#	1	\$ 45,000	\$ 45,000
Rodamientos SKF d=1/2'	#	2	\$ 6,000	\$ 12,000
Chumacera d=1/2'	#	2	\$ 18,000	\$ 36,000
Soporte Turbina-Generador	#	1	\$ 40,000	\$ 40,000
Eje Acero 1045 Mecanizado	#	1	\$ 80,000	\$ 80,000
Carcaza de Protección	#	1	\$ 50,000	\$ 50,000
Elementos para instalación	#	1	\$ 50,000	\$ 50,000
Transporte al lugar	#	1	\$ 15,000	\$ 15,000
TOTAL				\$ 828,000

Tabla 29. Presupuesto del generador y el almacenamiento energético.

NOMBRE	UNID	CAN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Generador de Imanes Permanentes	#	1	\$ 400,000	\$ 400,000
Batería de 12 V	#	1	\$ 200,000	\$ 200,000
Cables de Conexión	m	10	\$ 2,000	\$ 20,000
Transporte al lugar	#	1	\$ 15,000	\$ 15,000
Elementos para instalación	#	1	\$ 50,000	\$ 50,000
TOTAL				\$ 685,000

Tabla 30. Presupuesto de la mano de obra.

TAREA	PROFESION	CAN	# DIA	VALOR DIA	VALOR TOTAL
Instalación de la tubería a presión	Obrero	2	2	\$ 30,000	\$ 120,000
Instalación del equipo Turbina-Generador	Obrero	1	1	\$ 30,000	\$ 30,000
	Técnico	1	1	\$ 40,000	\$ 40,000
Instalación eléctrica de la batería	Técnico	1	2	\$ 40,000	\$ 80,000
Instalación del tanque superior	Técnico	1	5	\$ 30,000	\$ 150,000
TOTAL					\$ 420,000

Tabla 31. Presupuesto de equipos adicionales (Uso del agua pos-generación).

NOMBRE	UNI.	CAN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Purificador, Transporte e instalación	#	1	\$ 9,000,000	\$ 9,000,000
TOTAL				\$ 9,000,000

Tabla 32. Resumen del Presupuesto FIJO.

NOMBRE	PRESUPUESTO TOTAL
Tubería a Presión	\$ 352,500
Tanque y su control	\$ 2,320,000
Turbina	\$ 828,000
Generador y Almacenamiento	\$ 685,000
Mano de obra	\$ 420,000
TOTAL	\$ 4,605,500
Equipos Adicionales (Purificador)	\$ 9,000,000
TOTAL	\$ 13,605,500

11.2.2 Presupuesto de mantenimiento. Son los costos que van surgiendo en periodo reglamentarios una vez se haya ejecutado el proyecto, con el fin de mantener y preservar el sistema “pluvio-eléctrico”.

Tabla 33. Presupuesto del mantenimiento/año.

NOMBRE	COSTO TOTAL
Personal Técnico	\$ 80,000
Lubricación	\$ 20,000
Utensilios de aseo	\$ 20,000
Repuestos	\$ 80,000
TOTAL	\$ 200,000

11.3 DETERMINACIÓN DEL COSTO ENERGÉTICO

Como se mencionó en capítulos anteriores, la turbina diseñada del tipo Michell-Banki que permite la generación de energía para la planta “pluvio-eléctrica”, trabajará en promedio 2 horas al día y conseguirá una potencia de 1 KW, la energía total obtenida es de $720 \frac{Kwh}{año} \cdot E_{AÑO} = 1 [KW] * 2 [h] * 30 [dias] * 12 [meses] = 720 \frac{Kwh}{año}$

Para calcular el costo anual, es importante resaltar que el sistema se implementara en un coliseo, lo que representa que es una zona no residencial, por consiguiente según la EMPRESA DE ENERGIA DEL PACIFICO S.A E.S.P el valor de la energía para estos casos es de 471 \$/kwh³⁴.

$$C_{AÑO} = 720 \frac{Kwh}{año} * 471 \frac{\$}{Kwh} = 340.000 \frac{\$}{año}$$

Además, si se desea purificar el agua como anteriormente se ha dicho mediante la utilización de un equipo especializado en el sistema, el costo por año que este reemplazaría sería obtenido de la siguiente forma, contemplando que la tasa del agua para el estrato donde se encuentra el coliseo es de 234 \$/m³³⁵.

³⁴ Empresa de Energía Del pacifico (EPSA), “Información sobre tarifas”, Valle del Cauca, Enero 16 del 2017.

³⁵ Redacción EL TIEMPO, “Así son las tarifas de agua para este año”, [en línea]. [01 de Julio 2018]. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-381470>.

$$C_{\text{añoH}_2\text{O}} = 72 \text{ m}^3 * 30 \text{ días} * 12 \text{ meses} * 234 \frac{\$}{\text{m}^3} = 6065280 \frac{\$}{\text{año}}$$

11.4 DEPRECIACIÓN DE LA PLANTA³⁶

La depreciación es la pérdida del valor que sufren los activos fijos, generando que exista una vida útil para los bienes adquiridos. Para el presente proyecto se utilizó el método de depreciación de la línea recta, el cual consiste en la suposición de que la depreciación anual del activo fijo es constante cada año desde el momento que es adquirido el bien e instalado.

Según la experiencia, las nano y picocentrales eléctricas tienen aproximadamente una vida útil entre los 20 a 50 años³⁷, cuando son construidas de manera óptimo, con los mejores materiales y a un ambiente adecuado. Para el presente proyecto se estipulará un valor de 20 años, por los materiales y el ambiente en el que se estipula que va a trabajar.

El valor final, residual o de desecho que sería para el año 20 de la planta pluvio-eléctrica, está dado por la ecuación 151.

$$V_D = Inversion * 0.3 \quad (152)$$

Con este valor se conseguiría el valor de la depreciación anual del proyecto con la ecuación 152.

$$Depreciacion = \frac{Inversion - V_D}{V_{UTIL}} \quad (153)$$

Los resultados para los dos tipos de casos planteados en el presente trabajo, están estipulados en la tabla 33.

³⁶ Universidad América Latina, “Unidad 16: Depreciación”, [en línea]. [03 de Julio de 2018]. Disponible en: http://ual.dyndns.org/Biblioteca/Matematicas_Financieras/Pdf/Unidad_16.pdf

³⁷ MIRANDA FRIAS, Julio Cesar; VILLEGAS CONTRERAS, Ezequiel. “Diseño y construcción de una picocentral hidroeléctrica de 5 KW para la finca mirasol en la vereda sacramento, corregimiento de fundación Magdalena”. Bucaramanga: UIS, 2013.

Tabla 34. Valor Residual y depreciación anual para 20 años.

CASO	VALOR INVERSION	VALOR RESIDUAL	DEPRESIACION ANUAL
Solo generación eléctrica	\$ 4,605,500	\$ 1,381,650	\$ 161,193
Generación + Purificación del agua	\$ 13,605,500	\$ 4,081,650	\$ 476,193

11.5 RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN

Es importante para los inversionistas o propietarios de un proyecto, saber cuál es el número de años para la recuperación de la inversión adquirida desde la instalación de la planta, para dicho proceso se utiliza la formula estipulada en la ecuación 153. Este modelo también es conocido como payback.

$$Perido\ Retorno = \frac{Inversion}{C_{AÑO} - C_{MAN}} \quad (154)$$

Tabla 35. Periodo de retorno de los casos de estudio.

CASO	INVERSION	$C_{AÑO}$	C_{MANT}	PERIODO DE RETORNO (Años)
Solo generación eléctrica	4605500	340000	200000	32.9
Generación + Purificación del agua	13605500	6405280	400000	2.3

Realizando la correspondiente operación para el caso en que solo se obtuviera la energía eléctrica daría un periodo de retorno de 33 años. Incluyendo el sistema de purificación seria de 2 años y 4 meses.

11.6 VALOR PRESENTE NETO (VPN)³⁸

Uno de los criterios decisorios estipulados en la evaluación económica de proyectos es el VPN, el cual puede evaluar y determinar la cantidad exacta de dinero que se tiene en el año 0, esto enfocado a un análisis económico que genera que todos los ingresos y egresos durante la vida útil del proyecto sean desplazados al presente. Es uno de los criterios decisorios más utilizados en el momento y se representa en la ecuación 154.

$$VPN = VPI - VPE$$

$$VPN = \sum_{i=1}^{n=i} \frac{I_i}{(1+i)^n} - \sum_{i=1}^{n=i} \frac{E_i}{(1+i)^n} + \frac{V_D}{(1+i)^{20}} - I_{inicial}$$

$$VPN = \sum_{i=1}^{n=i} \frac{I_i - E_i}{(1+i)^n} + \frac{V_D}{(1+i)^{20}} - I_{inicial} \quad (155)$$

VPI = Valor Presente Ingresos.

VPE = Valor Presente Egresos.

I_i = Ingresos en el año i .

E_i = Egresos en el año i .

i =Tasa anual de descuento, este es un valor estipulado como si el dinero se ingresara en un CDT, dicho porcentaje esta dado en Colombia para Coopcentral en un valor de 4.10%³⁹ para un plazo mayor de 360 días.

A continuación, se menciona en la tabla 36 y 37 el valor presente de ingresos y egresos; concluyendo, si da un valor positivo, indica que es viable económicamente y si da negativo no es viable.

³⁸ VARELA VILLEGAS, Rodrigo, "Evaluación Económica de Proyectos de Inversión Séptima Edición", Bogotá, McGraw-Hill, 2010.

³⁹ RANKIA, "Mejores CDT para 2018: 360 días", [en línea]. [5 Julio 2018]. Disponible en: <https://www.rankia.co/blog/mejores-cdts/1866633-mejores-cdt-para-2018>

Tabla 36. VPN del caso de solo generación eléctrica.

				4605500
1	340000	326609.03	200000	192122.959
2	340000	313745.466	200000	184556.156
3	340000	301388.536	200000	177287.374
4	340000	289518.286	200000	170304.874
5	340000	278115.549	200000	163597.381
6	340000	267161.91	200000	157154.065
7	340000	256639.683	200000	150964.52
8	340000	246531.876	200000	145018.751
9	340000	236822.167	200000	139307.157
10	340000	227494.877	200000	133820.516
11	340000	218534.945	200000	128549.967
12	340000	209927.901	200000	123487
13	340000	201659.847	200000	118623.439
14	340000	193717.432	200000	113951.431
15	340000	186087.831	200000	109463.43
16	340000	178758.724	200000	105152.19
17	340000	171718.274	200000	101010.75
18	340000	164955.115	200000	97032.4204
19	340000	158458.323	200000	93210.7784
20	340000	770779.715	200000	89539.6527
	VPI	5198625.49	VPE	7299654.81
		VPN	-2101029.33	

Tabla 37. VPN del caso de generación y purificación del agua-lluvia.

				13605500
1	6405280	6153006.72	400000	384245.917
2	6405280	5910669.28	400000	369112.313
3	6405280	5677876.35	400000	354574.748
4	6405280	5454252.02	400000	340609.748
5	6405280	5239435.18	400000	327194.763
6	6405280	5033078.94	400000	314308.13
7	6405280	4834850.09	400000	301929.039
8	6405280	4644428.52	400000	290037.501
9	6405280	4461506.74	400000	278614.315
10	6405280	4285789.38	400000	267641.032

11	6405280	4116992.68	400000	257099.935
12	6405280	3954844.07	400000	246974.001
13	6405280	3799081.72	400000	237246.879
14	6405280	3649454.1	400000	227902.862
15	6405280	3505719.6	400000	218926.86
16	6405280	3367646.11	400000	210304.381
17	6405280	3235010.67	400000	202021.499
18	6405280	3107599.11	400000	194064.841
19	6405280	2985205.67	400000	186421.557
20	6405280	4694980.35	400000	179079.305
	VPI	88111427.3	VPE	18993809.6
		VPN	69117617.7	

11.7 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)⁴⁰

Es el rendimiento sobre la parte del capital invertido que no ha sido amortizada al inicio de cada periodo, la TIR es la tasa que genera que el VPN de una inversión sea igual a 0. Es uno de los criterios decisorios más utilizados junto a los valores netos, vale aclarar que el resultado de este término debe ser comprobado con un valor neto para confirmar la viabilidad del proyecto. Está estipulada como se muestra en la ecuación 155.

$$VPN = VPI - VPE = 0$$

$$0 = (A_I - A_E) \left(\frac{(1 + TIR)^{20} - 1}{(1 + TIR)^{20} * TIR} \right) + \frac{V_D}{(1 + TIR)^{20}} - I_{inicial} \quad (156)$$

Tabla 38. Tasa interna de retorno de los casos estudiados.

CASO	ANUALIDAD INGRESO (A_I)	ANUALIDAD EGRESO (A_E)	VALOR RESIDUAL (V_D)	INVERSION	TIR (%)
Solo generación eléctrica	340000	200000	1381650	4605500	-0.70%
Generación + Purificación del agua	6405280	400000	4081650	13605500	44.12%

⁴⁰ Enciclopedia Financiera, "Tasa Interna de Retorno (TIR)", [en línea]. [5 Julio 2018]. Disponible en: <https://www.encyclopediainanciera.com/finanzas-corporativas/tasa-interna-de-retorno.htm>

Estos resultados se comparan con la tasa mínima requerida (TMRR) de 5%, concluyendo que el primer caso no es viable ($TIR < TMRR$) y el segundo efectivamente es viable económicamente ($TIR > TMRR$).

11.8 RELACIÓN BENEFICIO-COSTO DEL PROYECTO

Relación que contempla el grado de viabilidad económica que puede llegar a tener un proyecto, está suscrita en relacionar los ingresos y egresos presentes netos con el objetivo de identificar los beneficios que se tiene por cada unidad del dinero invertido en el desarrollo del sistema, dicho indicador esta estandarizado de la siguiente manera:

Tabla 39. Indicadores de la Relación de los VPN.

>1	Egresos menores a ingresos, proyecto viable económicamente.
=1	Egresos iguales a ingresos, proyecto indiferente.
<1	Ingresos menores a egresos, proyecto inviable económicamente.

Tabla 40. Relación de los VPN.

CASO	VPN INGRESOS	VPN EGRESOS	B/C
Solo generación eléctrica	5198625.49	7299654.81	0.712174154
Generación + Purificación del agua	88111427.3	18993809.6	4.638954962

12. CONCLUSIONES

- El sistema “pluvio-eléctrico” explicado en el presente libro, se enfatiza en la obtención de energía eléctrica a base de agua-lluvia adaptable para la región del chocó biogeográfico colombiano, aplicado al coliseo el cristal de la ciudad de buenaventura, dimensionado para operar bajo una pluviosidad de 6200 mm y proporcionar una potencia cercana a 1 KW. La planta consta de:
 - ❖ Una turbina tipo Michell-Banki que opera bajo un caudal aproximado de 10 LPS y una cabeza de 15 metros, la cual se seleccionó para cumplir los parámetros hidráulicos, empleando la carta de selección de turbinas y la investigación “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”. Se realizó el diseño de la turbina por medio de la metodología que se planteaba en dicha tesis investigativa.
 - ❖ Un sistema de recolección y almacenamiento de agua-lluvia con una capacidad de 10 m³, cuya geometría peculiar fue resultado de la gran carga que llegaría a generar en la estructura un tanque comercial, por lo cual fue necesario distribuir dicho peso, de manera análoga a un sistema de canaletas, logrando así integrar el sistema de recolección y almacenamiento de agua-lluvia en una sola estructura, evitando afectar de manera visual la estética del coliseo. Cuya descarga es controlada mediante un sistema de control tipo ON/OFF.
 - ❖ Un sistema de generación, compuesto por un generador de imanes permanentes PMG112, cuya selección se derivó de las limitaciones en la operación del sistema, destacando el poco tiempo de trabajo, siendo solventado gracias al poco tiempo de sincronización y aplicabilidad a sistemas de potencia variable, de este tipo de generadores.

- ❖ Un sistema de almacenamiento de energía que consta de una batería de 12V y 300Ah, o una de 24V y 150 Ah; el planteamiento inicial fue descartado por su significativo tiempo de carga para un periodo de descarga relativamente corto, por lo cual se replantearon los parámetros de manera más acorde a las características del sistema.
- Con el fin de determinar la viabilidad económica, el trabajo de investigación enfocado en la generación de energía eléctrica a base del agua-lluvia fue sometido a un análisis financiero con indicadores tales como: Valor presente neto (VPN) de - 2'101.029 COP, la recuperación de la inversión o payback de 32,9 años; y tasa interna de retorno (TIR) de -0.70%, parámetros que necesitaban identificar los ingresos y egresos del proyecto, resultando negativos, revelando así la inviabilidad desde el punto de vista económico; No obstante, se optó por analizar otra alternativa que brindase una mejora en los indicadores y así su viabilidad, siendo este un enfoque mixto entre la generación y purificación del agua-lluvia para el uso doméstico, planteando un sistema "autosostenible"; con resultados alentadores: un VPN de 69'117.617, una TIR de 44,12% y un Payback de 2,3 Años.
- Gracias a un adecuado diseño sincronizado con los procesos de manufactura se logró construir un modelo a escala 1 a 1 de la turbina. El modelo funcional construido logró mostrar el comportamiento de una turbina Michell-Banki, al trabajar con un caudal de 1,85 LPS en total apertura de válvula logró un giro de 240 RPM y con apertura al 50% logró un caudal de 0,95 LPS, girando a 120 RPM, demostrando la correcta manufactura y diseño del sistema.
- Para permitir una conservación adecuada del sistema, se desarrolló un manual de mantenimiento que brinda al usuario una guía que detalla los componentes del sistema, la instalación, operación y mantenimiento con el fin de tener una operación correcta que reduzca el riesgo de fallas.

13. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones tienen la finalidad de complementar distintos aspectos del proyecto entre los cuales se destacan la viabilidad económica, aspectos técnicos y posibles aplicaciones de este sistema, además de buscar que este proyecto sea un precedente que sienta las bases para desarrollo de investigaciones sobre la temática “pluvio-eléctrica” en el país.

Se sugiere enfocar las investigaciones en una forma de reducir o eliminar el tanque en el techo de la edificación, ya que este presenta una carga estructural importante que no todas las edificaciones pueden soportar, además de ser este el elemento más costoso de la construcción; en el proyecto esta carga fue relativamente pequeña y aceptable debido al gran perímetro de la estructura que permitía distribuir mejor el volumen de agua, además de las características estructurales del recinto, el cual estaba diseñado para una gran carga al ser un coliseo.

A partir del punto anterior se infiere la necesidad de un tipo de turbina capaz de solventar el problema del almacenamiento, una de las posibilidades es un modelo de turbina que aproveche del flujo del agua durante la lluvia; en el actual proyecto se buscó cambiar la energía de cabeza de altura por velocidad en la salida del inyector, mientras que en el futuro modelo se usaría directamente la energía cinética en la tubería, eliminando la necesidad de un tanque superior, limitándolo solo a una simple canaleta de recolección, además de reducir la altura de las edificaciones en las que se pudiese implementar.

Se debe ahondar más a fondo en la disposición final del agua recolectada, puesto como se mostró en el proyecto, esta permite sustentar fácilmente las necesidades de una familia. Estas recomendaciones buscan permitir la implementación de este tipo de sistemas en viviendas familiares.

BIBLIOGRAFÍA

- AL AMIN, Rashed; TALUKDER, Samioul Hasan. Introducing Pico Hydro From Daily Used Water And Rain Water. Mymensingh, Bangladesh. Int. Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol 4, issue 1 (Version 2), 2014. Pp. 382-385.
- ALFARO, Omar, Centrales hidroeléctricas de pequeña escala, la experiencia de la fundación solar en Guatemala, ciudad de Guatemala, Enero del 2013.
- ALIBABA, “Luz UV esterilizadores”, [en línea]. [26 Junio 2018]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/rain-water-disinfection-system-automatic-cleaning-ultraviolet-uv-water-purifier-685377735.html?spm=a2700.8698675.29.2.7330460aoQ20EY&s=p>
- ANG, Charis, et.al. Rainfall energy harvester disguised as a pipe insert (REGN) [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://quillasophink.com/oeuvre/regn/>.
- BEDOYA, Fernando. Obras Civiles, [en línea]. [25 Febrero 2018]. Disponible en: http://fernando-teg-obrasciviles.blogspot.com/p/acueductos_24.html.
- CRANE, “Apéndice A: Propiedades físicas de algunos fluidos y características del flujo en Válvulas, accesorios y tuberías”, en “Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías”, McGraw-Hill, 2012, pág. A-41-49.
- CALA RUGELES, Diego Armando. Diseño de un Prototipo de red de recolección y almacenamiento de agua lluvia para una escuela rural en el municipio de Barichara como alternativa de solución a la escasez de agua. Bucaramanga: UIS, 2011.
- EPM, “Uso inteligente de la energía eléctrica- Banco de recomendaciones”, [en línea]. [20 Junio 2018]. Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/2/documentos/banco_de_recomendaciones_uso_inteligente_energia_electricamarzo_27.pdf.

- FENG, Fang, et.al. ENSC 440 Project Proposal for a Rain and Solar Power Generator. Burnaby: Simon Fraser University, 2012.
- FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. Turbinas Hidráulicas [en línea]. [20 Octubre 2017]. Disponible en: <http://es.pfernandezdiez.es/>.
- FMF - Foro de Mineralogía Formativa [Foro abierto]. CARRILLO, Arturo de la Torre, 2009. [20 de Octubre del 2017]. Disponible en: <http://www.foro-minerales.com/forum/viewtopic.php?p=25581#25581>.
- GOMEZ BLANCO, Juan Antonio; INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Análisis de las precipitaciones horarias en Colombia. Bogotá D.C.: IDEAM, 2010.
- GOOGLE LLS; Mapa del coliseo del Pueblo Tumaco, [en línea]. [21 Noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Coliseo+Del+Pueblo/@1.8073303,-78.764204,307m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x8e2d0211ed996755:0x9c47386917ebe473!8m2!3d1.8073351!4d-78.7638466>.
- GOOGLE LLS; Mapa del coliseo el Cristal Buenaventura, [en línea]. [21 Noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/place/Coliseo+El+Cristal/@3.8805433,-77.0172705,1136m/data=!3m2!1e3!4b1!4m5!3m4!1s0x8e3724ac11f6dedd:0x8dad11f6795f92e6!8m2!3d3.8805433!4d-77.0150818>.
- GOOGLE LLS; Vista de carretera del coliseo el Cristal Buenaventura, [en línea]. [21 Noviembre 2017]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/@3.8800219,-77.015068,3a,30.4y,343.23h,117.3t/data=!3m6!1e1!3m4!1sZ924oSopvtigTkgUbmY5gg!2e0!7i13312!8i6656>
- GUALDRON BECERRA, Nelsy. Captación de agua lluvia como alternativa comunitaria ante la escasez y la contaminación para el consumo humano y actividades agropecuarias en las veredas el saludo y la aguada del municipio de Lebrija Santander, Colombia. Manizales: Universidad de Manizales, 2014.

- HERNANDEZ, Carlos, et.al. Apuntes para un Manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas-turbinas Michell Banki, OLADE (Organización Latinoamericana de Energía), 1988.
- HIGINIO RUBIO, Alonso. “Diseño Mecánico”, [en línea]. [20 Junio 2018]. Disponible en:http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/disenio-mecanico-1/material_clase/ocw_correas2.
- INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS, “Guía de diseño de pequeñas centrales hidroeléctricas”, Santafé de Bogotá, 1997.
- INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AMBIENTAL DEL PACÍFICO (IIAP), Instituto de investigaciones Ambiental del pacífico (IIAP), [en línea]. [3, Septiembre 2017]. Disponible en: <https://www.emaze.com/@AQOCRORI>.
- INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE), “Manuales de Energías Renovables- Minicentrales Hidroeléctricas”, Madrid, España, Octubre de 2006.
- KURK, Theodor. “Operación y mantenimiento de turbinas”, [en línea]. [22 Junio 2018]. Disponible en: http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/turbinas_o_y_m/turbinas_o_y_m.htm.
- LERZUNDY SALAMANCA, Tomas. GARCÍA GARCÍA, José Saul, “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1983.
- MAPFRE, “Depósitos y tanques: Tipos, mantenimiento y causas de rotura o deterior”, [en línea]. [15 Febrero 2018]. Disponible en: https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/i18n/catalogo_imagenes/imagen_id.cmd?idImagen=1030494.
- MERCADO LIBRE, “37mm 12v 60 Rpm Eléctrico Mini Caja Motorreductor Dc Motor”, [en línea]. [27 Julio 2018]. Disponible en:

https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-476261291-37mm-12v-60-rpm-electrico-mini-caja-motorreductor-dc-motor-_JM.

- MERCADO LIBRE, “3000w 12v/24v Dc A 110v/220v Ac Inversor De Potencia Solar L”, [en línea]. [27 Junio 2018]. Disponible en:
https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-482640916-3000w-12v24v-dc-a-110v220v-ac-inversor-de-potencia-solar-l-_JM
- MIRANDA FRIAS, Julio Cesar; VILLEGAS CONTRERAS, Ezequiel. Diseño y construcción de una picocentral hidroeléctrica de 5 KW para la finca mirasol en la vereda sacramento, corregimiento de fundación Magdalena. Bucaramanga: UIS, 2013.
- MUHAMAD AL HAFIZI Bin Amran, Electrical generation using savonius-darrieus turbine for rain water harvesting (RWH) system. Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia, 2015. 86p.
- NORZANAH, Rosmin, et.al. Experimental study for the single-stage and double-stage, two-bladed Savonius micro-sized turbine for rain water harvesting (RWH) system. Johor Bahru: ELSEVIER, 2015, 274-281p.
- RELIABLE, RESILIENT, AND SUSTAINABLE WATER AND RAINWATER HARVESTING OPPORTUNITIES AND CHALLENGES. (1 y 2: 10 y 12, octubre, 2017: Bucaramanga, Colombia). Memorias. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2017.
- S. Pradeepkumar, et.al. Generation of Electrical Energy Using Hybrid Energy of PV Solar Cell, Wind Turbine, Rain Water and Perpetual Motion, Thermal Engineering UCE. Tiruchirapalli: Imperial Journal of Interdisciplinary Research , 2016, 10p.
- SAVANNAH COLLEGE OF ART AND DESIGN, Rainfall energy harvester disguised as a pipe insert(REGN), [en línea]. [15 Febrero 2018]. Disponible en: <http://quillasophink.com/oeuvre/regn/>.
- SECRETARIA DE ENERGÍA, Energías Renovables 2008-Pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, Argentina, 2008.

- SELVAKUMAR, Pranesh. Harvesting energy from rainfall. Coimbatore: Sri shakthi institute of engineering and technology,2016.
- SPIRAX SARCO. Filtros con bridas. 2001.
- SHALEEN, Martin; ABHAY, Kumar Sharma. Analysis on Rainwater Harvesting and its Utilization for Pico Hydro Power Generation. India: International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 3 Issue, 2014.6p.