



Diseño y desarrollo de un sistema hidro generador eléctrico de baja potencia por medio de una turbina Pelton.

Ávila Garzón Miguel Ángel
Gómez Cortés Hancel Raúl

Facultad de ingeniería mecánica, electrónica y biomédica
Universidad Antonio Nariño
Bogotá D.C
Año 2020

Diseño y desarrollo de un sistema hidro generador eléctrico de baja potencia por medio de una turbina Pelton.

Ávila Garzón Miguel Ángel
Gómez Cortés Hancel Raúl

Proyecto de grado para optar al título de
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Director: Carlos Arturo García Gómez
Co-Director: Hugo Alba Diaz

Línea de investigación
Máquinas hidráulicas y generación de energía eléctrica

Facultad de ingeniería mecánica, electrónica y biomédica
Universidad Antonio Nariño
Bogotá D.C
Año 2020

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma de jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C
Año 2020

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a DIOS quien es la fuente de inspiración y quien da la fuerza para superar toda prueba, a nuestros padres Nelcy Cortes y Raúl Gómez; Y Luz Marina Garzón quienes con su amor y disciplina formaron carácter en nosotros y siempre estuvieron brindándonos el apoyo y el aliento para culminar esta etapa de nuestras vidas.

AGRADECIMIENTOS

Los más grandes agradecimientos a nuestros amigos de clase en los cuales nos vimos apoyados, a la universidad por ser el centro en donde se vivió este proceso y en donde se vivieron experiencias gratificantes.

Ingeniero Carlos García y Hugo Alba los más sinceros agradecimientos por estar con nosotros en el desarrollo de este proyecto, por haber compartido sus conocimientos y guiarnos con paciencia, además de su gran apoyo y colaboración en todo momento.

Agradecemos a los ingenieros Henry Moreno, John Ríos, Juan Monroy, Álvaro Torres, Carlos Avendaño, Jorge Romero y Nicolás Giraldo. Por haber inspirado en nosotros el amor por esta profesión y por cada conocimiento que sembraron en nosotros para hacernos crecer como profesionales y personas.

Y por última medida al acueducto y a la comunidad de las veredas Vancouver la Rambla del municipio de San Antonio del Tequendama, quienes confiaron en nosotros para la realización de este proyecto.

ÍNDICE

<i>DEDICATORIA</i>	3
<i>AGRADECIMIENTOS</i>	3
<i>ÍNDICE</i>	4
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	6
<i>LISTA DE TABLAS</i>	7
<i>LISTA DE GRAFICAS</i>	7
<i>1 RESUMEN</i>	8
1.1 ABSTRACT.....	9
<i>2 SÍMBOLOS</i>	10
<i>3 INTRODUCCIÓN</i>	11
<i>4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</i>	12
<i>5 ALCANCE</i>	13
<i>6 JUSTIFICACIÓN</i>	14
<i>7 OBJETIVOS</i>	15
7.1 OBJETIVO GENERAL.....	15
7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<i>8 GLOSARIO DE TERMINOS</i>	16
<i>9 MARCO TEÓRICO</i>	18
9.1 Interpretación de la ecuación de Bernoulli	19
9.2 Clasificación de las hidroeléctricas.....	20
9.3 Turbinas para sistemas hidro generadores.....	21
9.4 Uso de una turbina de acción y una turbina de reacción	24
9.5 Tipos de turbinas.....	25
9.5.1 Turbina tipo Pelton.....	25
9.5.2 Turbina Turgo	26
9.5.3 Turbina Michell Banki	27
9.5.4 Turbina Francis	27
9.5.5 Turbina Kaplan	28
9.5.6 Criterios de selección de una turbina.....	28
9.5.7 Altura del salto.....	29
9.5.8 Horquilla de caudales a turbinar	29
9.5.9 Velocidad de rotación.....	30
9.5.10 Problemas de cavitación	30
9.5.11 Velocidad de embalamiento.....	30
9.5.12 Costo	30
9.5.13 Maquinas Eléctricas Rotativas	32

9.5.14	Generadores eléctricos.....	32
9.5.15	Velocidad de rotación de un generador síncrono	32
9.5.16	Potencia y par en los generadores eléctricos	33
9.5.17	Motor Eléctrico	34
9.5.18	Maquinas Eléctricas Estacionarias:.....	34
9.5.19	Transformadores	34
10	<i>DESARROLLO METODOLÓGICO</i>	35
10.1	Fase 1: Análisis del dimensionamiento y ubicación del sistema de generación de energía eléctrica.	35
10.1.1	Reunión con miembros de la Junta Directiva del acueducto veredal	35
10.1.2	Casa de máquinas	36
10.1.3	Toma de datos para el diseño del sistema Hidro-Generador.	37
10.2	Fase 2: Diseño del sistema hidro-generador eléctrico y control de potencia para garantizar 1.5 KW.....	41
10.2.1	Cálculos para el diseño y la implementación de la turbina Pelton	42
10.2.2	Diseño CAD de la rueda Pelton.	45
10.2.3	Tubería.....	46
10.2.4	Banco de montaje.....	48
10.2.5	Rueda Pelton.....	49
10.2.6	Álabe	49
10.2.7	Ensamblaje completo.....	50
10.2.8	Control.....	50
10.3	Fase 3: Implementación recomendada del sistema hidro generador en el acueducto Veredal Vancouver - La rambla.....	51
10.3.1	Elementos.....	52
10.3.2	Elementos en PVC.....	52
10.3.3	Elementos mecánicos.....	54
10.3.4	Elementos eléctricos.....	56
11	<i>COMPROBACION EXPERIMENTAL Y RESULTADOS</i>	61
11.1	La primera prueba.....	63
11.2	La segunda prueba	65
12	<i>CONCLUSIONES</i>	70
13	<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo en una tubería.....	18
Figura 2. Elementos de fluidos utilizados en la ecuación de Bernoulli.	19
Figura 3. Clasificación de las máquinas de fluidos.....	22
Figura 4. Clasificación de las turbinas.....	22
Figura 5. Turbina de acción.....	23
Figura 6. Turbina de reacción.....	23
Figura 7. Esquema de un inyector en una tobera, para una turbina Pelton.....	25
Figura 8. Partes de una turbina Pelton.....	25
Figura 9. Diagrama de la incidencia del chorro en los alabes de una turbina Turgo.....	26
Figura 10. Esquema general de una turbina Turgo.....	26
Figura 11. Esquema general del sistema de distribución de una turbina Michell Banki.....	27
Figura 12. Rodete y alabes de una turbina Michell Banki.....	27
Figura 13. Caracol de una turbina Francis y diagrama de las formas de apertura de los alabes.....	28
Figura 14. Diagrama de una turbina Kaplan.....	28
Figura 15. Rangos de altura respecto al tipo de turbina.....	29
Figura 16. Distinta referencia de las alturas respecto al tipo de turbina.....	29
Figura 17. Mosaico de las configuraciones para turbinar grandes volúmenes turbina Kaplan.....	30
Figura 18. Abaco de selección del tipo de turbina, en el eje (y) caudal y en el eje (x) altura.....	31
Figura 19. Relación entre los diferentes tipos de turbinas y el número específico de revoluciones.....	31
Figura 20. Relación entre distintos tipos de turbinas y el número específico de revoluciones.....	32
Figura 21. Esquema de conexión sin escobillas.....	32
Figura 22. Relación entre rpm con la frecuencia de la red nacional y la cantidad de polos.....	33
Figura 23. Diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono.....	34
Figura 24. Esquema básico de un transformador.....	34
Figura 25. Lugar de ubicación de la casa de máquinas.....	37
Figura 26. Visita al terreno de construcción del sistema hidro generador.....	37
Figura 27. Toma de medidas realizadas por GPS.....	38
Figura 28. Aproximación de la altimetría y ubicación de la tubería para la turbina Pelton.....	38
Figura 29. Plano de la casa de máquinas modelado por el software AutoCAD 2D.....	39
Figura 30. Placa de características del generador monofásico que se usó.....	41
Figura 31. Generador monofásico.....	41
Figura 32. Diferencia de altura entre la bocatoma y el lugar del sistema hidro generador.....	42
Figura 33. Velocidad del fluido.....	43
Figura 34. Molde del primer modelo de alabe.....	44
Figura 35. Alabes después del proceso de fundición.....	45
Figura 36. Alabes terminados, en comparación con los alabes del primer diseño.....	45
Figura 37. Diseño de la tubería que alimenta al sistema hidro generador.....	46
Figura 38. Se ilustra el flujo y la trayectoria de agua en la tubería próxima a la rueda Pelton.....	46
Figura 39. Simulación de fluidos, velocidad.....	47
Figura 40. Muestra la velocidad del fluido en la tubería de 1".....	47
Figura 41. Diseño del banco de la rueda Pelton.....	48
Figura 42. Comportamiento del fluido dentro del tanque que tiene el banco.....	48
Figura 43. Prototipo de la rueda Pelton con una polea en su eje.....	49
Figura 44. Diseño de un alabe o cangilón.....	49
Figura 45. Diseño planeado para el sistema hidro generador y sus respectivas partes.....	50
Figura 46. Control de electroválvula.....	50
Figura 47. Sistema de potencia de la electroválvula.....	51
Figura 48. Registro de agua de una pulgada (1").....	52
Figura 49. Collar 3:1.....	52
Figura 50. Terminal tipo macho.....	53
Figura 51. Montaje de la derivación a una pulgada (1").....	53
Figura 52. Desaireador.....	53
Figura 53. Unión rápida de tres pulgadas (3").....	54
Figura 54. Proceso de mecanizado y balanceo de la rueda que soportara el conjunto de alabes.....	54
Figura 55. Plato y alabes después del proceso de pulido.....	55

Figura 56. Plato mecanizado y perforado.	55
Figura 57. Armado de la rueda y de los alabes para dar forma a la estructura tipo Pelton.	55
Figura 58. Estructura finalizada de la rueda Pelton.	56
Figura 59. Rueda Pelton armada en su totalidad.	56
Figura 60. Rollo de cable n° 10AWG.	56
Figura 61. Protecciones termomagnéticas.	57
Figura 62. Tablero general de distribución.	57
Figura 63. Código de colores.	57
Figura 64. Elementos del tablero de pruebas.	58
Figura 65. Construcción del tablero de pruebas.	58
Figura 66. Tablero de pruebas.	58
Figura 67. Tablero de pruebas armado.	59
Figura 68. Servomotor que operara válvula de control para el bypass.	59
Figura 69. Unión por medio de poleas entre un motor eléctrico trifásico.	59
Figura 70. Conexión interna del motor eléctrico (Delta).	60
Figura 71. Ficha técnica de una licuadora, 120v, 400W, 60Hz.	61
Figura 72. Ficha técnica de un soplador de aire 110V, 350W.	61
Figura 73. Ficha técnica de una pistola de calor 120V, 750-1500W, 60 Hz.	61
Figura 74. Ficha técnica de una pulidora 127V, 2300W, 50-60Hz.	62
Figura 75. Ficha técnica 112-120V, 100W.	62
Figura 76. Acople entre el motor, el generador, la rueda Pelton.	62
Figura 77. La pinza voltiamperimétrica permite visualizar el voltaje obtenido a la salida del generador.	63
Figura 78. Corriente obtenida para la carga instalada de un bombillo.	63
Figura 79. Corriente obtenida para alimentar la carga de dos bombillos.	64
Figura 80. Corriente obtenida para alimentar la carga de tres bombillos.	64
Figura 81. Corriente obtenida para alimentar la carga de cuatro bombillos.	64
Figura 82. Corriente obtenida para alimentar la carga de cinco bombillos.	64
Figura 83. Corriente utilizada para poder soportar la carga.	65
Figura 84. Corriente requerida para soportar la potencia conectada al banco.	65
Figura 85. Pistola de calor a su máxima potencia con su medida en corriente.	66
Figura 86. Valores de corriente en función del uso de una pulidora industrial.	67
Figura 87. Condensador del generador 70 μ F, 340VA.	69
Figura 88. Momento exacto en donde se realiza la recarga del condensador.	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Símbolos y abreviaturas.	10
Tabla 2. Clasificación de las centrales hidroelectricas.	21
Tabla 3. Información eléctrica de cada elemento.	66
Tabla 4. Datos recolectados de la pulidora industrial.	68

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Relación entre la corriente y cada elemento instalado.	67
Grafica 2. Relacion de corriente de arranque, en vacio y a plena carga.	68

1 RESUMEN

Para la ejecución de este proyecto se realizaron varias visitas a terreno, en la primera se establece un acercamiento con los miembros de la junta directiva del acueducto veredal Vancouver la Rambla del municipio de San Antonio del Tequendama.

Este proyecto implica el diseño y desarrollo de una rueda Pelton con el fin de generar energía eléctrica, ya que en el sitio no se cuenta con un abastecimiento eléctrico continuo, su derivación no es viable porque no se cuenta con un punto de conexión y de medida legalizado por la empresa encargada del suministro de energía, de esta manera poder energizar diversos equipos de potabilización de agua que el acueducto tiene contemplados.

Se llevo a cabo una simulación en un banco de pruebas, se realizaron tomas de medidas a todo el conjunto de generación para determinar de esta manera si se estaba cumpliendo con los objetivos planteados y dar solución a la problemática presente en la región, la simulación ejecutada expone el funcionamiento óptimo del sistema de generación.

La finalidad de este proyecto es poder contribuir significativamente al bienestar de la comunidad del Acueducto Veredal Vancouver La Rambla, del municipio de San Antonio del Tequendama y sus 95 usuarios, los cuales se verán beneficiados al instalar el equipo hidro generador y este brindará la posibilidad de instalación de plantas de tratamiento.

Palabras clave: Rueda Pelton, generación eléctrica, electricidad, potencia eléctrica, potabilización de agua.

1.1 ABSTRACT

For the execution of this project, several field visits were made, in the first one a rapprochement was established with the members of the board of directors of the Vancouver la Rambla Veredal aqueduct of the municipality of San Antonio del Tequendama.

This project involves the design and development of a Pelton wheel in order to generate electricity since the site does not have a continuous electrical supply, its derivation is not viable because it does not have a connection point and measurement legalized by the company responsible for energy supply, thus being able to power various water purification equipment that the aqueduct has contemplated.

A simulation was carried out on a test bench, measurements were taken of the entire generation system to determine if it was meeting the objectives set out and to provide a solution to the problems present in the region. The simulation carried out shows the optimal functioning of the generation system.

The purpose of this project is to be able to contribute significantly to the well-being of the community of the Vancouver La Rambla Veredal Aqueduct, in the municipality of San Antonio del Tequendama, and its 95 users, who will benefit from the installation of the hydro-generating equipment, which will offer the possibility of installing treatment plants.

Keywords: Pelton wheel, electricity generation, power, water purification.

2 SÍMBOLOS

Término	Símbolo	Unidades SI
Área	A	m^2
Longitud	L	m
Diámetro	D	m
Altura	H	m
Corriente eléctrica	I	A
Voltaje	V	V
Potencia eléctrica	W	W
Revoluciones	N	-
Momento o par	M	$N * m$
Caudal	Q	m^3
Presión	P	kPa
Peso específico	γ	$\frac{N}{m^3}$
Viscosidad	μ	$Pa * s$
Velocidad angular	ω	$\frac{rad}{s}$
Masa	M	Kg

Tabla 1. Símbolos y abreviaturas.

3 INTRODUCCIÓN

En la actualidad se pueden evidenciar avances tecnológicos suficientes en función a la potabilización de aguas utilizando elementos que requieren un suministro de energía eléctrica continuo. Con la implementación de este proyecto se podrá garantizar un recurso eléctrico permanente el cual permita facilitar los procesos de potabilización con las nuevas tecnologías que emplean energía eléctrica.

A pesar de los diferentes métodos de potabilización de agua la OMS afirma que alrededor de 3, de cada 10 personas (2100 millones de personas) carecen de acceso a agua potable y disponible en el hogar. [29]

En algunas regiones del territorio colombiano específicamente en las periferias de grandes ciudades como Bogotá, algunas comunidades no cuentan con suministro de energía eléctrica y mucho menos con abastecimiento de agua potable, este es el caso de algunas veredas del municipio de San Antonio del Tequendama, que, a pesar de estar cerca de la capital colombiana y de tener acceso al recurso hídrico, no cuentan con un sistema de suministro de energía accesible para implementar equipos de potabilización de agua y mejorar la calidad de vida de los hogares que se encuentran interconectados a esta línea de abastecimiento de agua no potable.

Antes de la pandemia se consideró realizar la implementación de todo el sistema hidro generador, en donde se iba a implementar un control de caudal para el correcto funcionamiento de la turbina, y de esta manera evitar daños en los equipos o el generador por posibles sobrecargas, e inclusive se adelanto gran parte de las visitas al terreno, cálculos de diseño y adquisición de equipos para la construcción y puesta a punto de la carga requerida, sin embargo, dada la problemática social y a la limitación del tránsito de personas a nivel intermunicipal no se pudo mantener el contacto con el acueducto veredal y se decidió realizar cambio de objetivos para presentar un sistema que cumpliera con los requisitos mínimos necesarios y de esta manera analizar la viabilidad en la implementación del sistema.

Para el presente proyecto, se optó por el desarrollo de una rueda Pelton, ya que es la que más se adecua a las condiciones del terreno, económicamente viable, de fácil instalación y mantenimiento; que contempla además el cerramiento del sistema que brinde la seguridad a la maquinaria, animales y a las personas. Durante el proceso se realizaron visitas al terreno las cuales permitieron recolección de datos y la ubicación de la casa de máquinas, sin embargo, la implementación del sistema hidro generador en el acueducto veredal no se pudo realizar debido a la pandemia a nivel mundial que se está viviendo y en consideración se realizó un prototipo de generador que cumple con todos los parámetros y características propuestos.

4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el municipio de San Antonio del Tequendama, surge una necesidad social y ambiental, las personas que viven en este lugar, cuentan con un recurso hídrico generoso, sin embargo, es necesario optimizar las condiciones en las que este llega a sus hogares. Debido a que el recurso está disponible las veinticuatro (24) horas del día, es imprescindible la generación de energía eléctrica por medio de un hidro generador capaz de alimentar varios equipos de potabilización.

Uno de los acueductos que abastece a las veredas Vancouver la Rambla suministra el recurso hídrico a 95 usuarios, a pesar de ello, no es apto para el consumo humano y no se cuenta con energía eléctrica que permita la funcionalidad de sistemas potabilizadores de agua.

¿Es posible aprovechar el recurso hídrico del acueducto veredal para generar energía eléctrica a través de una rueda Pelton a 1.5kW y alimentar equipos de potabilización?

5 ALCANCE

El alcance del diseño y posterior desarrollo que tiene este proyecto contempla varios factores, el primero es la generación de energía eléctrica para iluminación y un circuito de fuerza en la casa de máquinas que planea usar el acueducto veredal Vancouver la Rambla

Para el presente proyecto se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Solamente se contemplará el diseño de la rueda Pelton, para esto, se tendrá en cuenta los parámetros obtenidos en el acueducto veredal los cuales son: promedio de altura de la bocatoma hasta la instalación del cuarto de máquinas y caudal estimado en el punto de implementación del sistema.
- Para la elaboración de planos del diseño de la rueda Pelton, se trabajará con el software SolidWorks 2019. No se realizará simulación de la rueda Pelton dado que se contempló la implementación y por medio de ello se realizará la comprobación de funcionamiento.
- Al momento de la implementación del sistema es importante considerar filtrar el material vegetal y animal dentro de las tuberías del suministro.
- Se simulará un control de posición por medio de un software, para un servomotor que permita regular el caudal y garantizar los rpm necesarios para la generación.

Para este proyecto se dejará una reserva de carga de un 86% adicional, aparte de lo contemplado al inicio del proyecto, para futuras ampliaciones e instalación de nuevos equipos. Cabe resaltar que antes de realizar la instalación de un nuevo equipo o elemento que requiera la alimentación eléctrica del generador, es necesario realizar un estudio de la carga, esto con el fin de no sobrepasar la capacidad máxima del generador que es de 2.8kW, la cual, puede incurrir en daños a los elementos que se encuentren conectados y daños al mismo generador.

6 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto es necesario porque lo necesita el acueducto veredal Vancouver la Rambla, aprovechando el recurso hídrico de la zona es posible instalar sistemas hidro generadores, generando una fuente de energía eléctrica donde no la hay, y así haciendo posible la instalación de equipos en lugares remotos.

Así con este sistema hidro generador, se podrá generar la energía suficiente para poder alimentar los sistemas potabilizadores que el acueducto desee acoplar.

En el mercado existen varios equipos de potabilización, haciendo una breve investigación de los equipos a conectar, se propone un consumo de 315W aproximadamente, con una ampliación de carga para instalaciones futuras, además de que sea capaz de energizar todo el sistema eléctrico para su propio funcionamiento.

7 OBJETIVOS

7.1 OBJETIVO GENERAL

- ❖ Realizar el diseño y desarrollo de un sistema hidro-generador eléctrico de baja potencia por medio de una turbina Pelton.

7.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las dimensiones del hidro-generador eléctrico, basados en la selección de la turbina y el generador eléctrico a utilizar para la carga requerida.
- Obtener los parámetros hidráulicos necesarios para establecer la viabilidad de la construcción del hidro-generador eléctrico de baja potencia.
- Realizar el diseño y simulación de la turbina Pelton por medio de SolidWorks.
- Realizar la simulación del sistema de control de potencia, con el fin de garantizar la máxima transferencia de potencia.
- Evaluar el comportamiento del sistema hidro-generador eléctrico por medio de cargas resistivas.

8 GLOSARIO DE TERMINOS

Agua para consumo humano: Es aquella que se utiliza en bebida directa y preparación de alimentos para consumo. [22]

Altura H: Esta variable corresponde a la energía contenida por kg de agua en la máquina.[2][3][4][5].

Autogeneración: Es aquella actividad que se realiza por un individuo particular o jurídico la cual produce energía eléctrica con el fin de atender su propia demanda y satisfacer su necesidad de energía eléctrica.[22]

CAD: Computer aided design, diseño asistido por computador.

Cadena Energética: Son todos aquellos procesos donde los recursos se destinan al aprovechamiento de la energía y posterior transmisión para su uso final.[22]

Caudal Q: Cantidad de agua que circula por unidad de tiempo, las unidades que se utilizan por lo general son: m³/s, l/s, gpm, ft³/min. [1][2][6].

Condensador: Dispositivo dieléctrico que absorbe y almacena momentáneamente energía eléctrica. [4]

Diseño: Traza o delineación de un edificio o de una figura, descripción o bosquejo verbal de algo. [31]

Eficiencia Energética: Se puede tomar como la relación de energía aprovechada vs energía total utilizada en el proceso.[22]

El Recurso Hidráulico: Cantidad de agua aprovechable.[23]

Embalamiento del generador: Es la velocidad que alcanza una turbina trabajando a plena potencia hidráulica y de repente desaparece la carga exterior. [4]

Golpe de ariete: Cambio brusco de régimen en una tubería forzada ocasionado por la apertura o cierre rápido de una válvula. [4]

Máquina eléctrica: Es un dispositivo que puede transformar la energía mecánica en eléctrica o energía eléctrica en mecánica.[21]

Mecánica de fluidos: Es el estudio de los fluidos que se encuentran estáticos o en movimiento (estática de fluidos o dinámica de fluidos).[1][6][23]

Potencia (N): Energía mecánica entregada o absorbida por unidad de tiempo en el eje de la máquina, energía mecánica que se entrega en el eje.[2][3][4][5][21].

Rodete: O simplemente rueda, está provista de álabes que facilitan la conversión de energía hidráulica en energía mecánica [4]

Sistema energético nacional: Es el conjunto de fuentes de energía eléctrica de diferentes orígenes, la cual posteriormente es transportada, distribuida, comercializada y finalmente suministrada a los usuarios para su uso final. [22]

SolidWorks: Es un software CAD, para modelado mecánico en 2D y 3D.

Tuberías: Estos tipos de tuberías tienen unas grandes ventajas con respecto a las metálicas, peso ligero, facilidad de instalación, resistencia a la corrosión y a productos químicos. [1][6]

Velocidad (n): Velocidad con la que gira el órgano de trabajo de la máquina. [1][2][6][9].

9 MARCO TEÓRICO

Para el análisis de este proyecto se deben tener varios conocimientos en máquinas eléctricas, máquinas hidráulicas y mecánica de fluidos.

La conservación de la energía - ecuación de Bernoulli, la energía no se crea ni se destruye, simplemente se transforma en otro tipo de energía, en los fluidos pasa exactamente igual. [1][2][3][4]

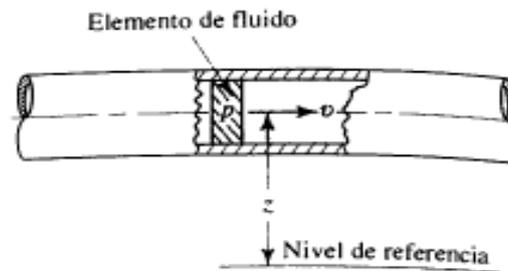


Figura 1. Flujo en una tubería [1]

En los problemas de flujo en tuberías siempre se van a tener tres formas de energía, estas son energía potencial, energía cinética y energía de flujo, se puede observar que el fluido tiene velocidad (v), presión (P) y (z) será la altura en que se encuentre la tubería.

La energía potencial depende de su diferencia de altura (z), tiene una relación con el nivel de referencia a estudiar y el peso del elemento (w). Diferencia de la altura y de la masa.

$$EP = wz \quad (1)$$

La energía cinética relaciona el peso del elemento (w), la velocidad del fluido (v) y la gravedad (g). [1][6]

$$EC = \frac{wv^2}{2g} \quad (2)$$

La energía de flujo se le conoce también como energía de trabajo de flujo, es la cantidad de trabajo que necesita el fluido en la tubería o sección en la cual se encuentre, para poder hacerle contra a la presión (P). (γ) es el peso específico del fluido. [1][6]

$$EF = \frac{wP}{\gamma} \quad (3)$$

9.1 Interpretación de la ecuación de Bernoulli

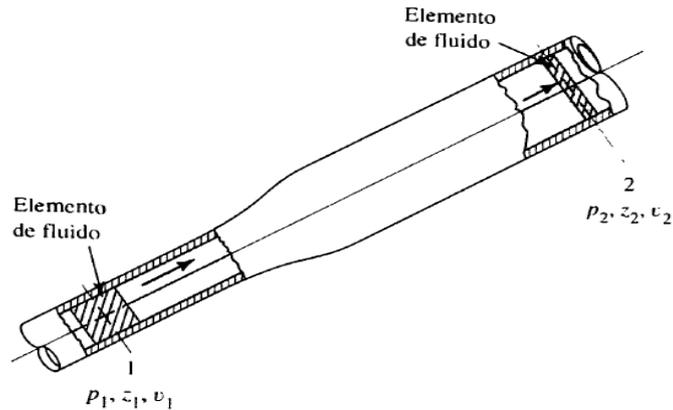


Figura 2. Elementos de fluidos utilizados en la ecuación de Bernoulli. [1]

Para poder determinar la energía del fluido, se realiza la suma de las tres formas anteriores de energía que se mencionaron, energía de fluido (EF), energía potencial (EP) y energía cinética (EC) [1]

$$E = EF + EP + EC \quad (4)$$

$$E = \frac{wP}{\gamma} + wZ + \frac{wv^2}{2g} \quad (5)$$

En la figura 2, se puede observar que el fluido va del punto uno (1) al punto dos (2), entonces en el punto uno (1) la energía total sería:

$$E_1 = \frac{wP_1}{\gamma} + wZ_1 + \frac{wv_1^2}{2g} \quad (6)$$

Y en el punto dos (2) quedaría:

$$E_2 = \frac{wP_2}{\gamma} + wZ_2 + \frac{wv_2^2}{2g} \quad (7)$$

Si la energía se mantiene entre los puntos uno (1) y dos (2), ósea que no se agregue o pierda energía, entonces el principio de la conservación de la energía se aplicaría y quedaría de la siguiente forma:

$$E_1 = E_2 \quad (8)$$

$$\frac{wP_1}{\gamma} + wZ_1 + \frac{wv_1^2}{2g} = \frac{wP_2}{\gamma} + wZ_2 + \frac{wv_2^2}{2g} \quad (9)$$

Como (w) es el peso del elemento y este es el mismo entre los puntos uno (1) y dos (2), se puede eliminar dividiendo por w , de esta manera la ecuación de Bernoulli queda [1]:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (10)$$

El número de Reynolds es un número es adimensional, y es el encargado de indicar si un flujo es laminar o es turbulento. La ecuación 11 depende de cuatro variables [1][2][3]:

$$R_e = \frac{vD\rho}{\eta} = \frac{vD}{\nu} \quad (11)$$

ρ = densidad del fluido.

D = diámetro.

η = viscosidad del fluido.

ν = velocidad del fluido.

Si el número de Reynolds es menor a 2000, esto indica que el flujo es laminar, si es mayor a 4000 se puede decir que es flujo turbulento, para los números de Reynolds que están entre estas dos magnitudes, es imposible determinar la característica de flujo del fluido, así que se denomina *zona crítica* [1][2][3].

Otro número que permite el correcto estudio de los fluidos es el que se deduce de la ecuación de Darcy, esta ecuación sirve para determinar las pérdidas por fricción tanto en los flujos laminares como los flujos turbulentos, además en secciones rectilíneas y largas en tuberías circulares, la medida en el sistema internacional es (m). [2][3][4], la siguiente ecuación representa las variables a tener en cuenta:

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

h_L = Pérdida de energía debido a la fricción

f = Factor de fricción

L = Longitud de la corriente del flujo

D = Diámetro

ν = Velocidad del flujo

9.2 Clasificación de las hidroeléctricas

No existe un criterio único de clasificación de las centrales hidroeléctricas, ya que los valores de clasificación pueden variar según el país.

En función de su capacidad, se pueden clasificar las hidroeléctricas en pico centrales, micro centrales, minicentrales, pequeñas centrales hidroeléctricas y centrales hidroeléctricas. [24]

La clasificación que se empleó en el atlas para la generación de los mapas fue la que adoptó la UPME del Ministerio de Minas y Energía sugerida por la Organización Latinoamericana de Energía (Olade) para las centrales hidroeléctricas que se describe a continuación: [24].

Centrales hidroeléctricas	Carga instalada	Lugares de aplicación
Pico centrales	0,5 y 5 kW	Se aplican a zonas que no se encuentran interconectadas con la red principal en su mayoría zonas rurales. [24]
Micro centrales	5 y 50 kW	Operación a filo de agua, se encuentran en zonas no conectadas al sistema nacional de distribución. [24]
Minicentrales	50 y 500 kW	Operación a filo de agua, al igual que las anteriores esta minicentral está ubicada en zonas aisladas de la red nacional. [24]
Hidroeléctricas pequeñas	500 y 20.000 kW	Operación a filo de agua, se encuentran en zonas no interconectadas y zonas interconectadas. [24]
Centrales hidroeléctricas	mayor de 20 MW	Aplicable a zonas interconectadas, de este tipo de centrales es de la cual se alimenta en su mayor parte la red nacional con tensiones entre 230Kw y 500kW. [24]

Tabla 2. Clasificación de las centrales hidroeléctricas.

9.3 Turbinas para sistemas hidro generadores

Las máquinas de fluidos son aquellas en las que, el fluido le proporciona la energía que obtiene a la máquina o en las que la máquina proporciona energía al fluido, como primer ejemplo las centrales hidroeléctricas reciben la energía del fluido aprovechando las condiciones del terreno y las bombas son las que suministran energía al fluido. [2][14][17]

Las máquinas de fluidos se clasifican en dos:

- Máquinas hidráulicas
- Máquinas térmicas

Las máquinas hidráulicas son aquellas en las cuales el fluido que pasa a través de ellas no varía su densidad, o si varía lo hace muy poco, por eso se puede asumir que ρ (densidad)=cte. [2][3][4][5] mientras que las **máquinas térmicas** son aquellas en las cuales el fluido que pasa a través de ellas varía su densidad o su volumen específico. [2][4][5]

Clasificación de las máquinas hidráulicas:

- Turbomáquinas
- Máquinas de desplazamiento positivo

Las máquinas de desplazamiento positivo o máquinas volumétricas son aquellas las cuales la pieza que está en contacto con el fluido le transmite la energía o viceversa, pueden moverse tanto con movimiento rotativo o con movimiento alternativo, y esta forma de energía se le denomina energía de presión por la variación de volumen.

Las turbomáquinas son aquellas en las cuales, la pieza que está en contacto con el fluido mantiene un movimiento rotativo. A este grupo de máquinas hidráulicas también se le pueden incluir las que intercambian energía en forma de energía potencial, tales como: tornillo de Arquímedes, ruedas hidráulicas, cangilones, etc. Pero no se hablará de estas en este documento. [2][3][4][5].

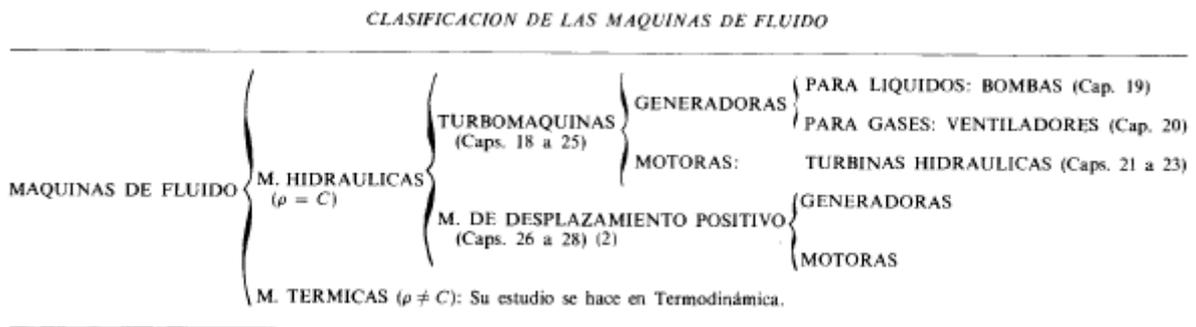


Figura 3. Clasificación de las máquinas de fluidos. [2]

Como muestra la figura 3, tanto las máquinas de desplazamiento positivo como las turbomáquinas, se dividen en máquinas motoras y máquinas generadoras.

Las máquinas motoras son aquellas que reciben la energía del fluido y la restituyen en energía mecánica, mientras que las generadoras absorben energía mecánica y restituye energía al fluido. [2].

Las turbinas se clasifican en dos, de acción y de reacción.

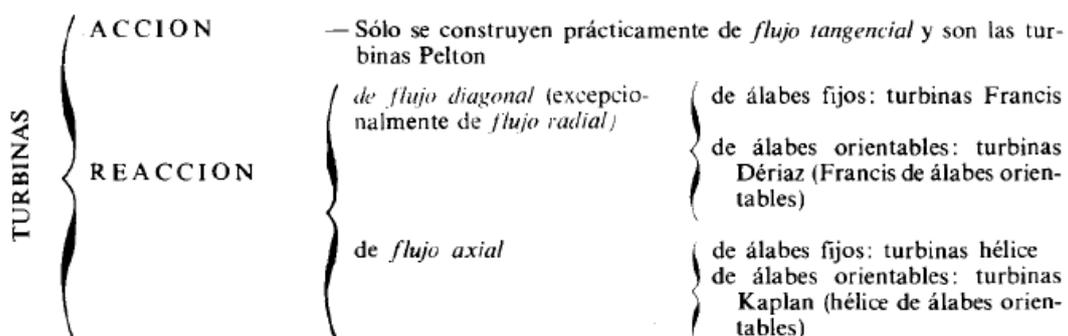


Figura 4. Clasificación de las turbinas. [2]

Las de acción son aquellas que al ingresar el fluido a la turbina y al salir de esta, tiene la misma presión de la atmósfera; en este tipo de turbinas se aprovecha la energía potencial del fluido que golpea directamente al rotor que se convierte en energía cinética, por ejemplo, las turbinas Pelton, las turbinas de flujo cruzado (Michel Banki) y Turgo, a estas se les denomina de admisión parcial (no están sumergidas), ya que el fluido llega por uno o varios puntos. [6][8]

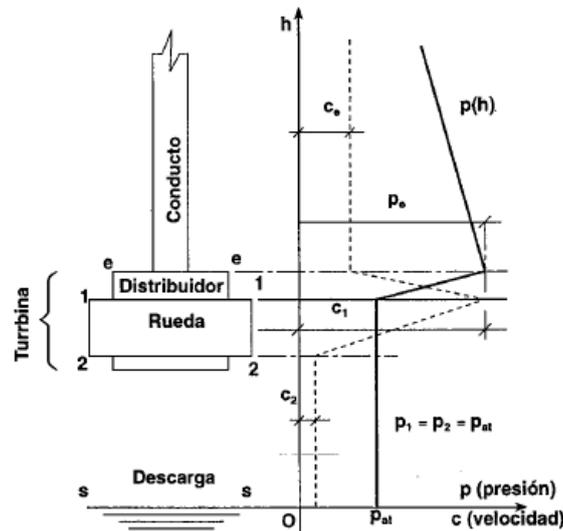


Figura 5. Turbina de acción. [4]

Como se puede observar en la figura 5, la presión dentro del sistema es igual a la presión de la atmósfera, por eso este tipo de turbinas se les llama de acción [4].

Las de reacción, por el contrario, son turbinas a las cuales cuando el fluido entra en la máquina va perdiendo presión, eso quiere decir que en el rodete se intercambia energía cinética y energía de presión, como por ejemplo la Francis, Kaplan, hélice, Deriaz y Straflo a diferencia de la de acción, a estas turbinas el fluido les llega por toda la periferia llamándose así de admisión total, [6][8]

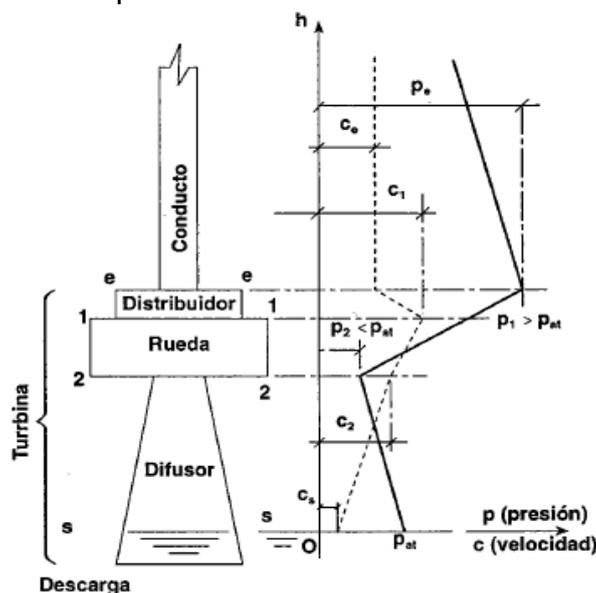


Figura 6. Turbina de reacción. [4]

La figura 6, muestra cómo hay una variación de presiones dentro del sistema, las presiones dentro del sistema son mayores a la presión de la atmósfera. [4].

9.4 Uso de una turbina de acción y una turbina de reacción

Las turbinas de acción se usan en grandes saltos y donde existe poco caudal, es decir velocidades específicas bajas, por eso es común verlas instaladas en las cabeceras de los cauces, cerca de los nacimientos de los ríos. [4][6][8]

Las turbinas de reacción se usan en un amplio rango de alturas con un caudal mucho mayor en comparación con las turbinas de acción, por lo general este tipo de turbinas se ubican en las zonas medias o finales de los cauces de los ríos. [4][6][8]

Para el diseño de una turbina se tienen en cuenta las ecuaciones (13) (14) (15), con estas se asegura una validez matemática al diseño, sin embargo, también se tienen en cuenta las recomendaciones de los fabricantes.

Los alabes, también llamados cangilones, son los encargados de recibir el chorro de agua, repartir la energía a través de la rueda y posteriormente al eje. [2][3][4].

La ecuación A. Ribaux muestra la relación del número de álabes que van en la rueda Pelton (ver ecuación 13). [4]:

$$z = 15 + \frac{D}{2d} \quad (13)$$

z =Número de álabes

D =Diámetro de la rueda pelton

d =Diámetro del chorro

El diámetro del rodete es la medida que tiene la rueda que soporta los álabes, esta depende de la altura del salto y las revoluciones.[2][3]

$$D = \frac{60 \cdot 0,456 \sqrt{2gH}}{\pi n} = 38,567 \frac{\sqrt{H}}{n} \quad (14)$$

El número específico de revoluciones (n_s) sirve para saber a cuantas revoluciones por minuto (rpm) girara una turbina imaginaria semejante a la que se desea plantear.[2][3][4]

$$n_s = \frac{n\sqrt{N}}{H_n^{1,25}} \quad (15)$$

n :rpm

H_n : Altura (m)

N : Potencia (W)

9.5 Tipos de turbinas

9.5.1 Turbina tipo Pelton

Son turbinas de acción en las que los conductos de agua llamados (toberas) conducen el agua hacia la rueda Pelton, transformando la energía de presión en energía cinética.

Una turbina Pelton puede tener entre una y seis toberas, y puede tener hasta dos rodetes, cada tobera cuenta con una válvula la cual regula el paso del fluido hacia la turbina como lo muestra la figura 7. Este tipo de turbina se utiliza en saltos de agua de entre 40 y 1200m de altura. [3]

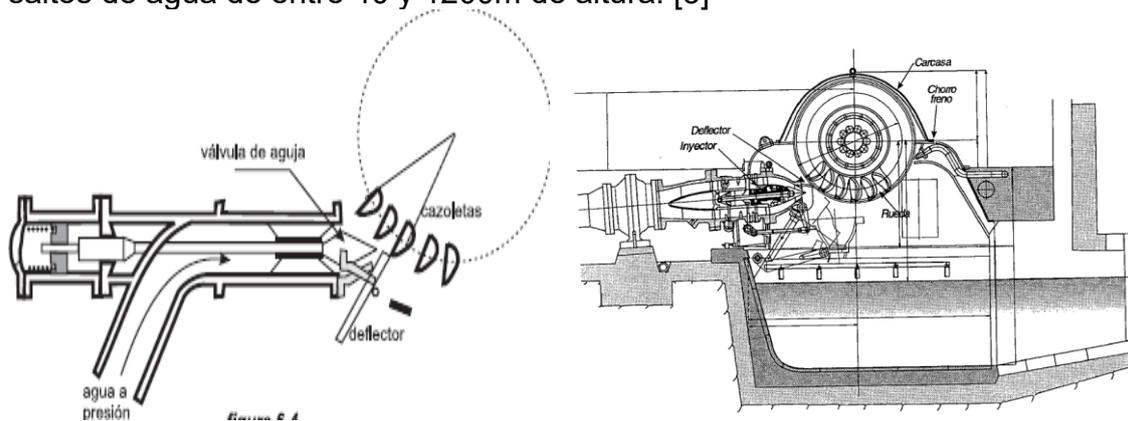


Figura 7. Esquema de un inyector en una tobera, para una turbina Pelton. [4].

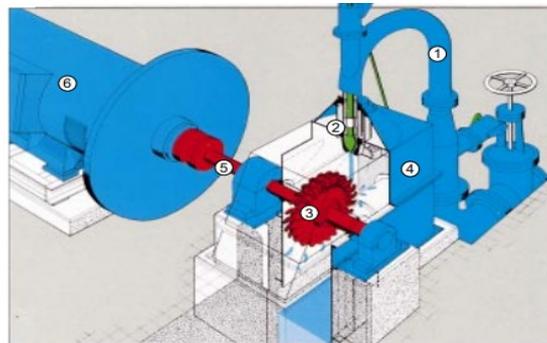


Figura 12. Turbina Pelton (cortesía de VOITH).

- | | |
|---------------------------|------------------|
| ① Tubería de distribución | ④ Carcasa |
| ② Inyector | ⑤ Eje de turbina |
| ③ Rodete | ⑥ Generador |

Figura 8. Partes de una turbina Pelton.

Como se puede ver en la figura 8, en este tipo de turbinas la admisión del agua se realiza a gran velocidad tangencialmente al rodete (3) a través de la tubería de distribución (1) y el inyector (2), que puede considerarse como el distribuidor de la turbina Pelton.

El inyector (2) está equipado de una válvula de aguja y un deflector o pantalla deflectora.

El deflector, por su parte, impide el golpe de ariete y el embalamiento de la turbina durante las fases de parada programada o de emergencia de la turbina.

El rodete (3) es una pieza maciza circular, fabricada generalmente en fundición de acero dotada en su periferia de un conjunto de cucharas con doble cuenco, denominadas álabes, sobre los que incide el chorro del agua. [25]

Este tipo de turbina son de acción, en las cuales la tobera transforma la energía de presión del agua en energía cinética, cabe aclarar que las toberas son los conductos por donde pasa el fluido, en el caso de las turbinas tipo Pelton, máximo puede tener seis y pueden tener uno o dos rodetes. [3].

Este tipo de turbina se utiliza en lugares donde se tiene una caída de agua grande y maneja pequeños caudales, la rueda contiene unos álabes (cucharas) los cuales dependen de los cálculos respectivos del sistema. [4].

9.5.2 Turbina Turgo

Este tipo de turbinas puede funcionar con saltos de agua de entre 15 y 300 m, es similar a la turbina Pelton, sin embargo, esta presenta en sus alabes una disposición distinta, el chorro de agua incide en ellos con un ángulo de 20° respecto al plano diametral de la rueda. a diferencia de la Pelton el chorro de agua influye sobre varios álabes, gracias a su menor diámetro, para su velocidad periférica, aumentara la velocidad angular, esto facilita el acoplamiento directo al generador, evitando el sobrecosto. [3]

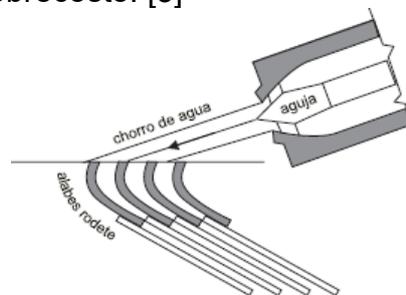


Figura 9. Diagrama de la incidencia del chorro en los alabes de una turbina Turgo. [3]

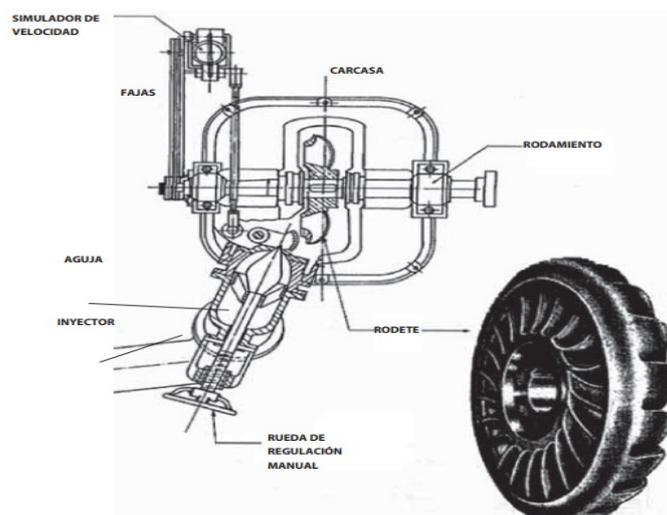


Figura 10. Esquema general de una turbina Turgo. [28]

9.5.3 Turbina Michell Banki

Conocidas también como turbinas de flujo cruzado, deben su nombre a sus inventores, se utiliza en una amplia gama de caudales entre $0.02\text{m}^3/\text{s}$ y $10\text{m}^3/\text{s}$ y un rango de alturas de entre 1 y 1000 m. tiene un rendimiento inferior al 87%, sin embargo, este rendimiento se mantiene casi constante cuando el caudal baja hasta el 16% nominal, esto se debe a su forma de recibir el flujo de agua y como lo expulsa.[3][28]

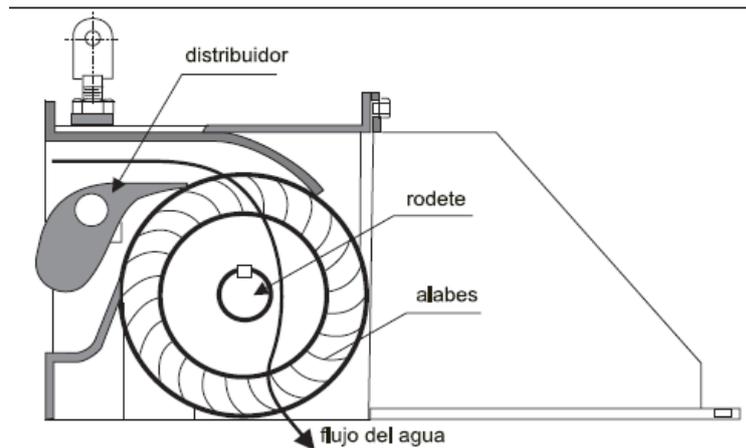


Figura 11. Esquema general del sistema de distribución de una turbina Michell Banki. [3]

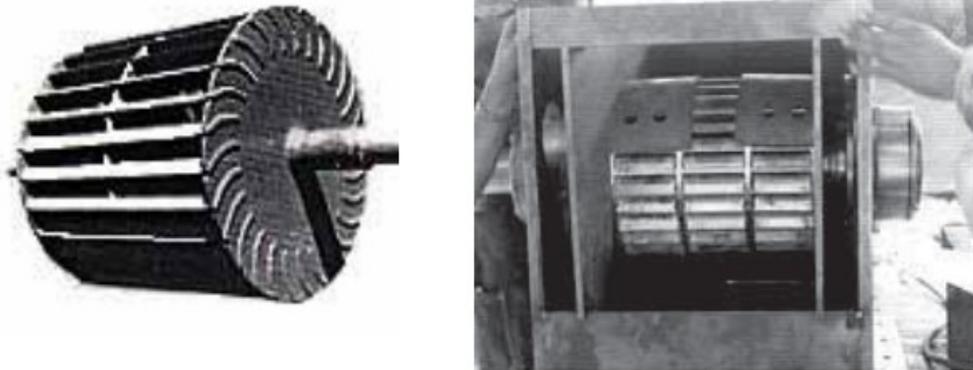


Figura 12. Rodete y alabes de una turbina Michell Banki. [28]

9.5.4 Turbina Francis

Este tipo de turbinas se utiliza para medianas y bajas alturas, son turbinas de reacción de flujo radial y de admisión total [28], equipada con un distribuidor de álabes regulables y un rodete de álabes fijos. Estos álabes regulables pueden modificar el caudal con el cual se alimenta la turbina desde lo mínimo hasta lo máximo, como muestra la figura 13. [3]



Figura 13. Caracol de una turbina Francis y diagrama de las formas de apertura de los alabes del rodete en una turbina Francis. [28]

9.5.5 Turbina Kaplan

Son turbinas de reacción de flujo axial, su principal aplicación es en bajas caídas y grandes caudales; los álabes que están dispuestos en el rodete siempre son regulables, mientras que los álabes del distribuidor pueden o no ser regulables, si ambos son regulables se denomina Kaplan verdadera si el caso es contrario se le denomina semi-Kaplan

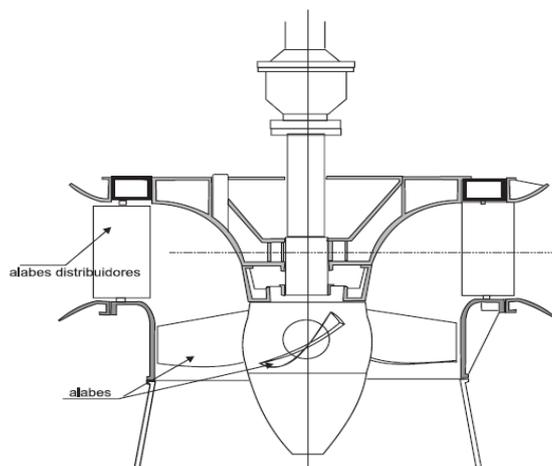


Figura 14. Diagrama de una turbina Kaplan. [3]

9.5.6 Criterios de selección de una turbina

El tipo, geometría y dimensiones de una turbina están determinadas, en su mayoría por los siguientes criterios [3]:

- Altura de salto neta
- Horquilla de caudales a turbinar
- Velocidad de rotación
- Problemas de cavitación

- Velocidad de embalamiento
- Costo

Para este proyecto el tema de costos se tendrá muy en cuenta y será fundamental a la hora de elegir el tipo de turbina a utilizar.

9.5.7 Altura del salto

Las siguientes figuras muestran la relación entre la altura del salto y el tipo de turbina. Como se puede observar en la figura 15, se especifica más a detalle el tipo de turbina en comparación con la figura 17 la cual es un poco más genérica en los tipos de turbinas.

Tipo de turbina	horquilla de salto en metros
Kaplan y hélice	$2 < H < 20$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1300$
Michell-Banki	$3 < H < 200$
Turgo	$50 < H < 250$

Figura 15. Rangos de altura respecto al tipo de turbina. [3]

Pequeños saltos:	$H_n < 60 \text{ m}$	\Rightarrow	Turbinas Kaplan
Medianos saltos	$H_n = 30 - 600 \text{ m}$	\Rightarrow	Turbinas Francis
Grandes saltos	$H_n = 100 - 2000 \text{ m}$	\Rightarrow	Turbinas Pelton

Figura 16. Distinta referencia de las alturas respecto al tipo de turbina. [4]

9.5.8 Horquilla de caudales a turbinar

Hay un problema crítico en los pequeños saltos, de entre 2 m a 5 m de altura, porque para que sea eficiente el sistema deben turbinar grandes volúmenes de agua de entre $10 \text{ m}^3/\text{s}$ y $100 \text{ m}^3/\text{s}$. [3]. Para lograr esto se han realizado diferentes configuraciones para la turbina Kaplan, que es la que más se adecua a este tipo de condiciones. La figura 17, ilustra los tipos de configuraciones.

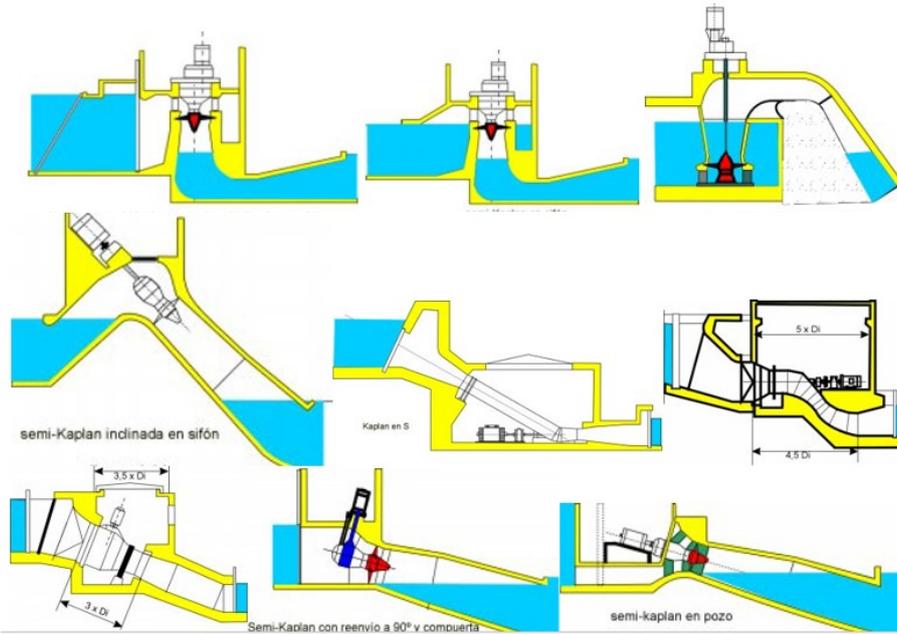


Figura 17. Mosaico de las configuraciones para turbinar grandes volúmenes con poca altura del salto, solo para la turbina Kaplan. [3]

9.5.9 Velocidad de rotación

La velocidad de rotación depende de la velocidad específica ya nombrada, la ecuación 16 representa esta velocidad, va directamente ligada a la velocidad síncrona del generador eléctrico [3][21]

9.5.10 Problemas de cavitación

Es un fenómeno el cual está presente cuando la presión en un líquido en movimiento, es menor a la de vaporización del mismo, el fluido genera pequeñas burbujas que son arrastradas a puntos de mayor presión y por consiguiente estallan. Este estallido genera ruido en la turbina y la acción repetitiva de estos estallidos generan una especie de corrosión difusa que se ven reflejadas en picaduras en el material de los álabes. [2][3][4]

9.5.11 Velocidad de embalamiento

Este término hace referencia a que, si la turbina llega a quedar sin carga exterior, por cualquier anomalía eléctrica, la turbina alcanzara una velocidad determinada velocidad de embalamiento. En las turbinas Kaplan esta velocidad de embalamiento puede llegar a 3,2 veces superior a la velocidad nominal y en las turbinas Francis, Pelton, Banki y Turgo esta velocidad puede variar entre 1.8 y 2 veces superior a la velocidad nominal.[3]

9.5.12 Costo

Contempla todo el presupuesto destinado a la implementación del sistema, la viabilidad y los costes de mantenimiento. (ver anexo 4)

Otra manera más sencilla de seleccionar el tipo de turbina es por medio de un ábaco como se evidencia en la figura 18:

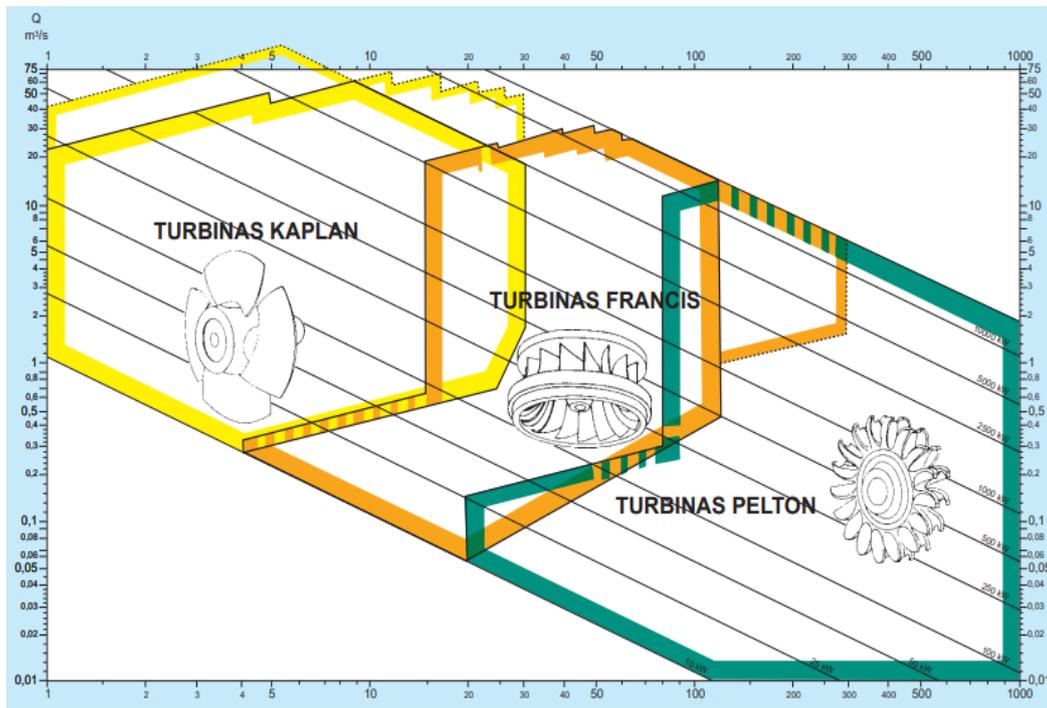


Figura 18. Abaco de selección del tipo de turbina, en el eje (y) caudal y en el eje (x) altura. [25]

Para preseleccionar el tipo de turbina a instalar en una minicentral, se utilizan unos ábacos que suelen facilitar los fabricantes de turbinas. Con ellos, se determina el tipo de turbina a partir de los parámetros de salto y caudal. [25]

Otra manera de determinar el tipo de turbina es en base al número específico de revoluciones como lo muestra la figura 19:

Pelton	$n_s < 40$
Francis	$60 < n_s < 400$
Kaplan (Hélice)	$300 < n_s < 1200$

Figura 19. Relacion entre los diferentes tipos de turbinas y el numero especifico de revoluciones. [4]

Se han llevado a cabo varios estudios de manera estadística, en las cuales De Siervo y Lugaresi, Lugaresi y Massa, Schweiger y Gregory, Gordon, Lindstrom, Kpordze entro otros, pudieron hacer una correlación entre la altura del salto de agua (H) y la velocidad específica (n_s). [3]

Pelton (1 chorro)	$n_s = 85,49 / H^{0,243}$
Francis	$n_s = 3763 / H^{0,654}$
Kaplan	$n_s = 2283 / H^{0,486}$
Flujo cruzado	$n_s = 513,25 / H^{0,505}$
Hélice	$n_s = 2702 / H^{0,5}$
Bulbo	$n_s = 1520,26 / H^{0,2837}$

Figura 20. Relación entre distintos tipos de turbinas y el número específico de revoluciones. [3]

Máquinas eléctricas

Las máquinas eléctricas son un transformador de energía, esta obtiene energía de una clase y la convierte en otra, como ejemplo un motor eléctrico, convierte la energía eléctrica en energía mecánica. [2] Se dividen en máquinas eléctricas rotativas y maquinas eléctricas estacionarias.

9.5.13 Maquinas Eléctricas Rotativas

9.5.14 Generadores eléctricos

Este tipo de máquinas son las responsables de convertir la energía mecánica en energía eléctrica [21], estas son las que se encuentran en las plantas generadoras de todos los tipos, térmicas, hidráulicas, nucleares, renovables entre otras. Los generadores síncronos se utilizan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica y de esta manera generar corriente alterna [21]

9.5.15 Velocidad de rotación de un generador síncrono

La frecuencia eléctrica se sincroniza con la rotación mecánica del generador (figura 21).

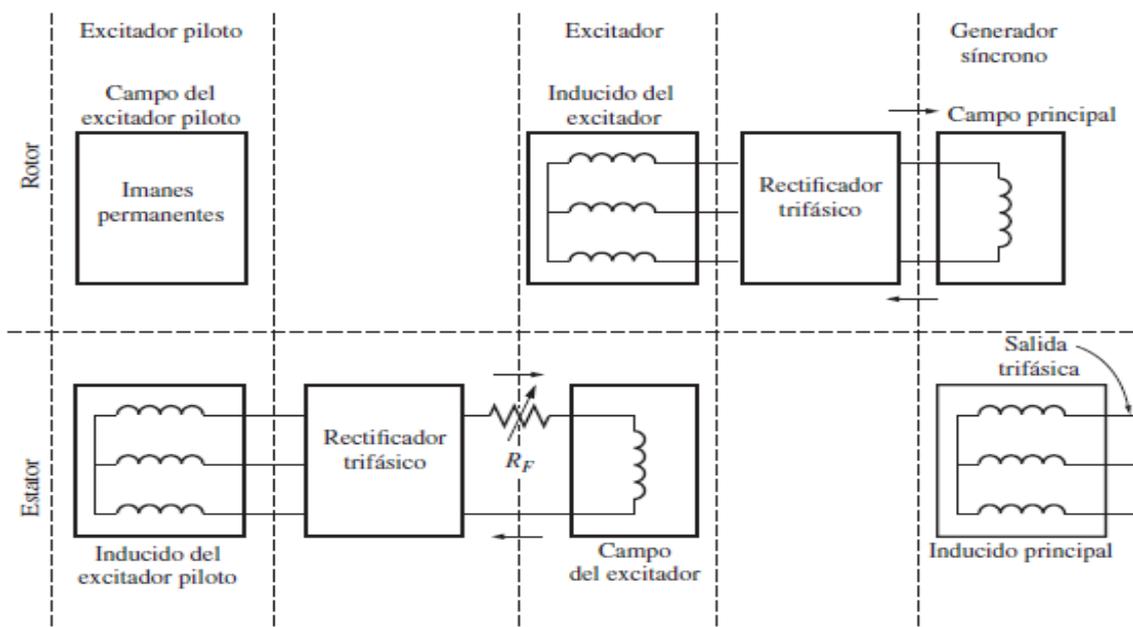


Figura 21. Esquema de conexión sin escobillas. [21]

La velocidad del rotor de un generador depende de la rotación de los campos magnéticos, estos están relacionados directamente con la frecuencia eléctrica (50Hz o 60Hz), esta relación está determinada por la ecuación 16. [21].

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (16)$$

f_e = Frecuencia eléctrica en Hz

n_m = Velocidad mecánica de campo magnético en rpm

P = Número de polos

Despejando la ecuación 16 se obtiene:

$$n_m = \frac{120 * f_e}{P} \quad (17)$$

Al aplicar la ecuación 17 se puede determinar fácilmente los rpm de los generadores síncronos a 50Hz y 60Hz, en el caso de la frecuencia de la red colombiana es de 60Hz [21]. Para ilustrar mejor este factor, se presenta en la figura 22.

FRECUENCIA DE RED ELECTRICA	
# DE POLOS	60Hz
2	3600 rpm
4	1800 rpm
6	1200 rpm
8	900 rpm
10	750 rpm
12	600 rpm

Figura 22. Relación entre rpm con la frecuencia de la red nacional y la cantidad de polos. [Fuente propia]

9.5.16 Potencia y par en los generadores eléctricos

No importa qué tipo de fuente se utilice para generar la potencia mecánica siempre y cuando esta mantenga su velocidad constante sin importar la demanda de potencia que se esté requiriendo en el momento si esto no es así se pueden presentar fallas en la frecuencia y posibles afectaciones a los elementos que estén conectados al generador o que dependan de este. [21]

Como en cualquier máquina no ideal la potencia mecánica que entra no es igual a la potencia eléctrica de salida esto debido a pérdidas en las piezas de la máquina. [21]

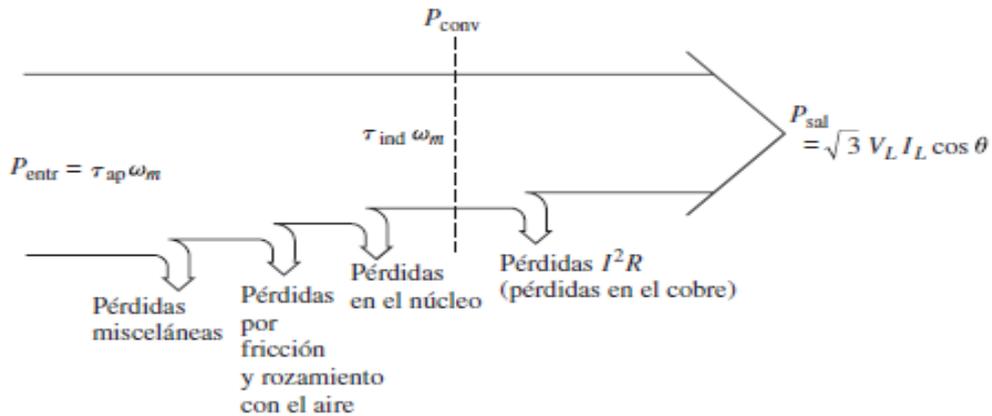


Figura 23. Diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono. [21]

9.5.17 Motor Eléctrico

Estos elementos son lo contrario a los generadores eléctricos, estos convierten la energía eléctrica en mecánica, [21], son utilizados en todo tipo de industrias. Facilitando muchas de las tareas que antes de hacían manualmente o por medio de animales, cabe resaltar que hay motores que trabajan con corriente alterna (A.C) y corriente directa (D.C).

9.5.18 Maquinas Eléctricas Estacionarias:

9.5.19 Transformadores

Son dispositivos que cambian la potencia eléctrica de un valor a otro valor por medio de un campo magnético. Constan de dos o más bobinas y ninguna de estas está conectada, su única conexión es por medio del campo magnético formado.[21]

Uno de los devanados va conectado a una fuente de energía, a este se le llama devanado primario, el segundo va conectado a la carga, se le llama devanado secundario, incluso puede existir un tercer devanado llamado, devanado terciario. [21]

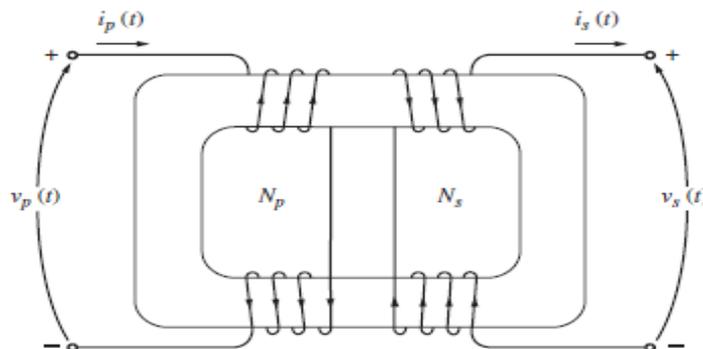


Figura 24. Esquema básico de un transformador. [21]

10 DESARROLLO METODOLÓGICO

Para dar cumplimiento a los objetivos y a la realización del presente proyecto, se decidió dividirlo en tres fases:

- Fase 1: Análisis del dimensionamiento y ubicación del sistema de generación de energía eléctrica.
- Fase 2: Diseño de la rueda Pelton por medio de SolidWorks para la elaboración del sistema hidro generador.
- Fase 3: Implementación recomendada del sistema hidro generador en el acueducto veredal Vancouver - La rambla.
- Fase 4: Evaluación del funcionamiento del sistema hidro-generador a 1.5 kW.

10.1 Fase 1: Análisis del dimensionamiento y ubicación del sistema de generación de energía eléctrica.

10.1.1 Reunión con miembros de la Junta Directiva del acueducto veredal

Para el desarrollo de este proyecto se realizaron cuatro visitas, en la primera de ellas se habló con los miembros del consejo del acueducto veredal Vancouver - la Rambla en el municipio de San Antonio del Tequendama (Cundinamarca), en este primer acercamiento se les expuso la problemática que ellos presentan al no contar con agua potable y la solución para mejorar el suministro de la misma, la cual consiste en intervenir un tramo de la línea de suministro de agua no potable y de esta manera instalar el sistema hidro-generador, el cual ayudará a suministrar energía eléctrica a los diferentes sistemas de potabilización de agua (Ionizador, lámparas UV, ozonificador, etc.).

Al dejar la propuesta en la mesa, el consejo del acueducto veredal toma la determinación de avalar el proyecto y así mismo colaborar para que se lleve con éxito, ya que este permite la instalación de un hidro generador el cual brindara energía eléctrica a los sistemas de potabilización que requiera el acueducto.

En estas reuniones la comunidad y los representantes de la misma se mostraron interesados y prestos a colaborar, con recurso humano para la adecuación del terreno y construcción de la casa de máquinas.

En las visitas de campo se evidenció la disposición de la comunidad y sus diversas dudas las cuales fueron solucionadas para una mayor comprensión, aceptación y no menos importante se llegó al acuerdo de una asignación de predios para la construcción de la casa de máquinas, lo cual fue un recurso muy importante, debido a que de esta manera se eligió la mejor ubicación para el sistema hidro generador, esto trae consigo un impacto social alto. Finalmente se cuenta con una carta de aval del acueducto veredal Vancouver la Rambla, donde

se permite la instalación del equipo en el sistema de suministro de agua (ver Anexo 1).

Por lo tanto, se llegaron a los siguientes acuerdos con el consejo de administración del acueducto en la realización del proyecto:

1. Aval en la realización del proyecto.
2. El acueducto veredal dispondrá los recursos para la construcción de la casa de máquinas y el encerramiento de la misma para su protección.
3. El sistema de hidro generación alimentará una carga de no más de 1.5kW, cabe resaltar que este sistema cuenta con una reserva de carga para una futura ampliación.
4. La realización de este proyecto no conlleva ningún costo adicional en la factura del servicio del suministro de agua para los beneficiarios del acueducto veredal, y solo se contempla a futuro una tarifa adicional por parte de la administración del acueducto, para fines de mantenimientos preventivos y correctivos del sistema.

10.1.2 Casa de máquinas

En la primera visita se siguió el recorrido que tiene la línea que suministra el agua parcialmente a la comunidad, pero sólo hasta cierto punto, ya que, para poder llegar a la bocatoma, no se contaba con el tiempo y con las personas que guiaran a ese lugar ya que se debe seguir un sendero complicado. (aproximadamente 800 metros por sendero agreste).

En la segunda visita, se inicia nuevamente el recorrido, partiendo desde el punto de finalización de la primera visita, esto con el fin de completar el recorrido hasta la bocatoma, en el camino de vuelta de la bocatoma se evidencia el lugar más óptimo por su topología, como se puede ver en la figura 25, ya que este cuenta con una pared en piedra y un semi techo que ayudará a realizar una casa de máquinas favorable para el acueducto veredal y que la inversión económica en la realización, no fuese elevada, el lugar donde se quería montar el equipo pertenece a la hacienda Chicamocha, de propiedad privada y se requería de un permiso especial para el montaje del proyecto, sin embargo después de un acercamiento por parte de la comunidad y del consejo de administración del acueducto, este permiso fue concedido, el dueño del predio donó ese espacio para poder realizar el montaje de todo el sistema.



Figura 25. Lugar de ubicación de la casa de máquinas, cuenta con una pared en piedra y un semi techo, así ayudando a su protección contra el clima y central los animales, además de que ocupa un mínimo espacio en el área privada. [Fuente propia]



Figura 26. Visita al terreno de construcción del sistema hidro generador, seguimiento de tubería y toma de datos hidráulicos. [Fuente propia]

10.1.3 Toma de datos para el diseño del sistema Hidro-Generador.

Una vez elegido el terreno y evidenciando que la topología es la más apta, con una ubicación segura sin afectar en gran proporción el terreno destinado al cultivo de pasto de corte para ganado lechero, posteriormente se tomaron las medidas de geolocalización por medio de un GPS (figura 28), esto con el fin de determinar la altura promedio de la línea de alimentación de distribución de agua hasta donde se realizó el corte de la tubería para la instalación de la turbina

hidro-generadora. Los datos se recopilaron en una tabla, como muestra la figura 27:

ID	unidades UTM		ALTURA (m)		longitud	latitud
	X	Y				
1	570648.26	504782.57	2147	BocaToma	-74.36313176	4.566496421
2	570602.17	504869.48	2146	mang_3_inc	-74.36354653	4.567282984
3	570563.08	504952.41	2141	mang_3_inc	-74.36389824	4.568033488
4	570544.05	504980.37	2138	mang_3_inc	-74.36406956	4.568286569
5	570494.97	505057.28	2130	mang_3_inc	-74.36451137	4.568982695
6	570449.89	505129.2	2126	mang_3_inc	-74.36491716	4.569633649
7	570421.78	505224.13	2118	mang_3_inc	-74.36516979	4.570492617
8	570462.73	505248.17	2104	mang_3_inc	-74.36480047	4.570709758
9	570520.66	505286.23	2093	mang_3_inc	-74.36427796	4.571053588
10	570412.79	505215.12	2114	mang_3_inc	-74.36525091	4.570411184
11	570611.49	505398.31	2093	salida del bosque	-74.3634583	4.572066745
12	570695.35	505482.39	2081	descuelgue haciend	-74.36270169	4.572826667
13	571793.92	505946.97	1855	Clara Pineros	Usuario mas alto	
14	571828.67	507261.22	1726	AlfonsoRam	Usuario mas bajo	

Figura 27. Toma de medidas realizadas por GPS de la ubicación de la tubería y la altura, medidas en UTM Y en coordenadas geográficas. [Fuente propia]

Para dar una mayor idea de lo planteado anteriormente se utilizó el programa Google Earth, se hizo una simulación del recorrido aproximado de la tubería como se muestra a continuación:

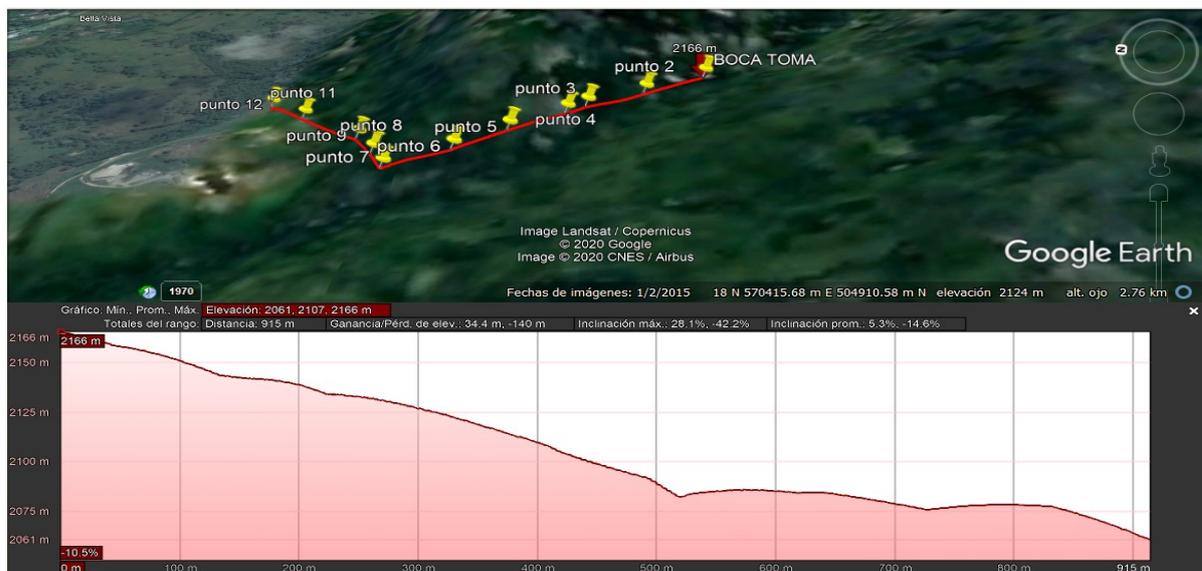


Figura 28. Aproximación de la altimetría y ubicación de la tubería para la turbina Pelton. [Fuente propia]

Debido a la irregularidad del terreno, a las condiciones de instalación de toda la línea de suministro principal del acueducto y a que los datos del recorrido que sigue la tubería fueron tomados con un GPS (Garmin GPSmap 76CSx) se determina una aproximación de la altura promedio desde la bocatoma, hasta la casa de máquinas.

El área escogida para la construcción de la casa de máquinas, se determinó a partir del estudio del terreno y su encerramiento permite mantener la seguridad del sistema hidro-generador por las siguientes razones:

1. Menor deterioro de los componentes del sistema hidro-generador, ya que las condiciones climáticas del sector tienen un papel importante en la corrosión de los elementos.
2. Restricción de acceso a personal no autorizado, debido a que con el encerramiento se evita que personas ajenas al proyecto o incluso animales causen daño a los componentes, se causen daño a sí mismos y/o a la instalación.
3. Protección del medio ambiente: Los planos del cuarto de máquinas se diseñaron en pro de la menor afectación a la fauna y flora presentes en el lugar, también se diseñaron aprovechando las condiciones del lugar para con esto intervenir lo menor posible el terreno.
4. Protección de los cultivos existentes: Uno de los puntos más importantes en la selección del lugar de la casa de máquinas era causar el menor daño posible al cultivo allí presente, ya que este es muy valioso para la actividad económica de la hacienda Chicamocho.

Los diseños correspondientes al cuarto o casa de máquinas se realizaron utilizando el software AutoCAD (figura 29); el cuarto de máquinas contará con iluminación artificial la cual será suministrada por el sistema hidro-generador, cuenta con un tanque hermético de dimensiones (1,00 m x 1,40 m) donde se recoge el agua que pasa por la turbina la cual es conducida a los equipos que se consideren para la potabilización el agua.

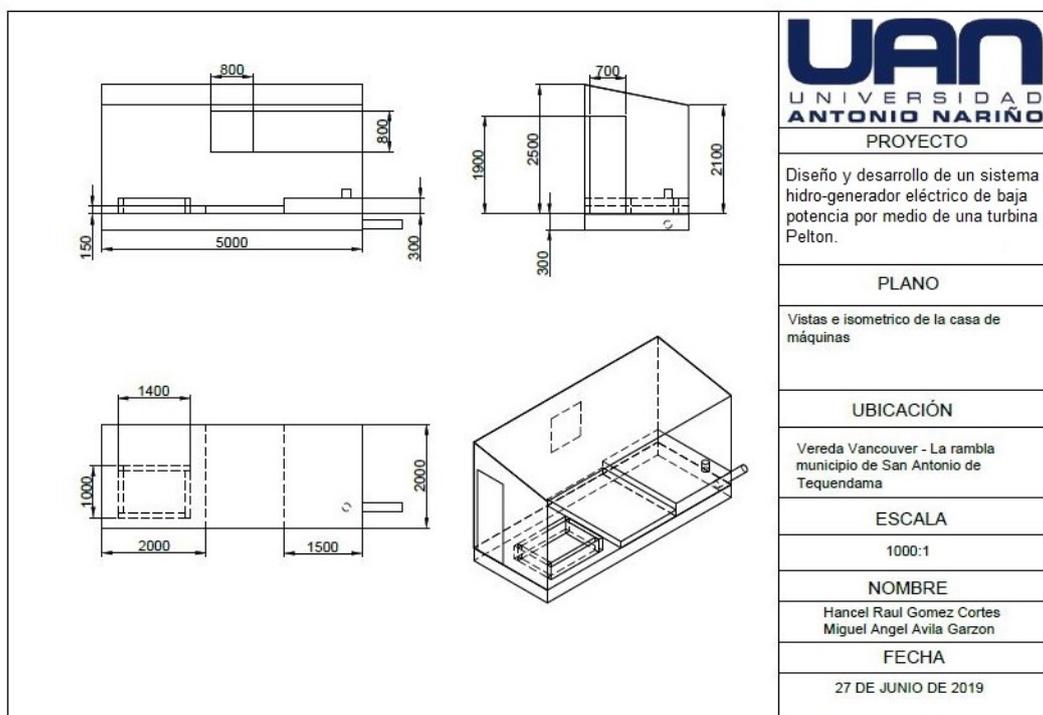


Figura 29. Plano de la casa de máquinas modelado por el software AutoCAD 2D. [Fuente propia]

Gracias a las visitas realizadas al terreno, y al análisis de la toma de datos, se pudieron obtener los parámetros principales para el diseño del sistema Hidro generador, los cuales se mencionan a continuación:

- **Caudal:** 220 l/m = 0.0036 m³/s
- **Altura:** 67 m
- **Diámetro de la tubería principal:** 3in
- **Diámetro de la tubería de inyección:** 1in
- **Carga instalada:** 1500W mínimo

En base a lo anterior, y al análisis de diseño basado en la teoría consultada, se determinó que la turbina tipo Pelton prestaba un mejor desempeño por las siguientes razones:

- Se aprovecha las propiedades del terreno, ya que se cuenta con un salto de agua considerable y un bajo caudal.
- Se aprovecha también la tubería que ya está instalada en el sector, así acelerando el proceso de instalación sin realizar una afectación muy invasiva.
- El mantenimiento de la turbina Pelton resulta ser sencillo por su forma constructiva en comparación con una Turgo o una Michel Banki.
- Los costos son un factor principal, ya que es sencillo conseguir las piezas para un ensamble de turbina Pelton en comparación con otro tipo de turbina.
- En la búsqueda de empresas que se encargaran de la fabricación de turbinas, solo se encontraron tres y todas, realizaban la construcción de solo turbinas Pelton.

Por inspección al terreno y características del sistema de distribución del acueducto veredal, se deben tener en cuenta las siguientes observaciones:

- Se debe garantizar la constancia del flujo de agua, que la tubería no tenga aire; no obstante, el sistema tendrá una protección en caso que, por condiciones de sequía, poco caudal y/o presión, se apague el sistema hidro generador por seguridad.
- La zona de la casa de máquinas debe estar totalmente plana y debe estar aislada de animales, plantas o personal ajeno al acueducto.
- Se realizarán los planos pertinentes, en función de conocer el sistema, se debe garantizar la seguridad de las personas y elementos que faciliten el correcto funcionamiento de los quipos.

10.2 Fase 2: Diseño de la rueda Pelton por medio de SolidWorks para la elaboración del sistema hidro generador.

Se realizaron 7 cotizaciones (ver anexo 6) para la adquisición del generador eléctrico, y en ellas el precio fluctuó entre \$870.000 y \$1.300.000, estos precios elevados afectan la viabilidad del proyecto, esto conlleva la búsqueda de un generador eléctrico de segunda mano en buen estado, que cumpliera con las características planteadas para el proyecto, en primera medida se ideó una potencia de 1.5kW, sin embargo no se pudo obtener un generador de esta potencia ya que en las cotizaciones realizadas solo se ofertaban generadores entre 3 kW y 5 kW, bastantes grandes y costosos, así que se optó por uno de 2.8kW que proporcionaba una relación costo-beneficio favorable, las características de este generador son:

- 3600 rpm
- Monofásico (120V)
- 2.8kW
- 60Hz
- IP 20
- Salida DC a 12V
- Condensador de arranque de 70 μ F (Microfaradios)



Figura 30. Placa de características del generador monofásico que se usó. [Fuente propia]

En la figura 30 se puede observar la placa de características de generador monofásico con condensador de arranque que se utilizó para la generación de energía eléctrica.



Figura 31. Generador monofásico. [Fuente propia]

En la figura 31 se puede evidenciar el generador monofásico de 2.8kW, al generador adquirido se le realizaron pruebas con carga y sin carga para validar su correcto funcionamiento, adicional este presenta una salida a 12 Vcc con la cual se energiza la parte de control encargada de la electroválvula.

10.2.1 Cálculos para el diseño y la implementación de la turbina Pelton

Siguiendo el paso a paso de la implementación de una turbina tipo Pelton, se procedió con el número específico de revoluciones, como lo muestra la ecuación 15 del marco teórico:

$$n_s = \frac{3600rpm\sqrt{(1500W)}}{67^{1.25}} = 727.37 \text{ rpm}$$

El número obtenido indica un aproximado de cuantas revoluciones debe girar la rueda Pelton con los parámetros dados por el terreno y el generador.

La relación recomendada por el fabricante de poleas es:

$$rpm = \frac{N * Dcd}{Dct} = \frac{3600 \text{ rpm} * 3''}{18''} = 600 \text{ rpm}$$

N = Revoluciones del generador

Dcd = Diámetro de la polea conducida

Dct = Diámetro de la polea conductora

Para lograr la velocidad deseada en el generador se necesita implementar un sistema de poleas, primero se instaló una polea de 18 pulgadas en el eje de la rueda Pelton y una de 3 pulgadas en el eje del generador con lo que se obtiene una velocidad promedio en el generador de 3465 rpm lo cual no constituye un problema al momento de generar la energía eléctrica y al exigirle al generador su carga máxima, la relación que se tiene entre la polea de la rueda Pelton y la polea del generador es de 6:1.

Para realizar el cálculo de la presión a la salida del inyector se emplea la ecuación de Bernoulli.

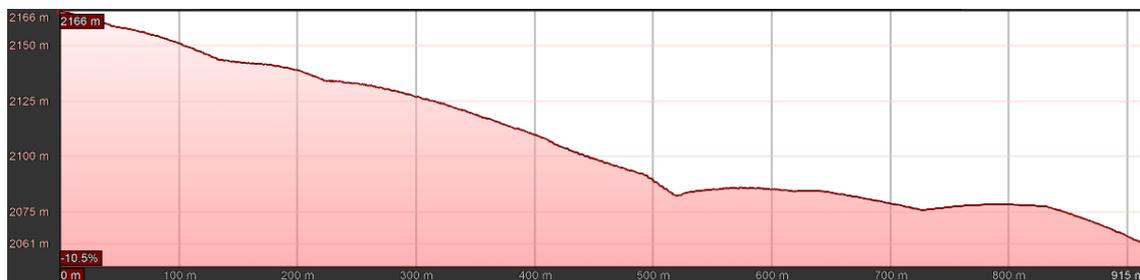


Figura 32. Diferencia de altura entre la bocatoma y el lugar del sistema hidro generador. [Fuente propia]

La ecuación de Bernoulli, representada por la ecuación 10, ayudará a resolver ciertos parámetros que se desconocían y que facilitarían el estudio del sistema.

$$\frac{P_1}{\delta} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\delta} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2$$

Los datos obtenidos fueron:

$$P_1=0 \qquad P_2=? \qquad Z_1=67 \text{ m} \qquad \delta = 9800 \frac{N}{m^3}$$

$$V_1=0 \qquad V_2=? \qquad Z_2=0$$

Para determinar la velocidad en el punto dos (V_2), las variables utilizadas fueron el caudal y el área transversal de la tubería.

Reemplazando los valores se tiene:

$$V_2 = \frac{0.0036 \frac{m^3}{s}}{506 \times 10^{-6} m^2} = V_2 = 7.11 \frac{m}{s}$$

Esta es la velocidad aproximada del fluido que se obtuvo a la salida de la tubería en el punto de construcción de la casa de máquinas, que se midió en campo como lo muestra la figura 33.



Figura 33. Determinación de la distancia alcanzada y velocidad recorrida del fluido. [Fuente propia]

Despejando la ecuación 10 y reemplazando en ella las variables se obtiene:

$$Z_1 = \frac{P_2}{\delta} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$P_2 = 631355.2 \text{ Pa} = 91.57 \text{ psi} = 6.23 \text{ atm}$$

La presión obtenida indica que en la tubería que llega al punto de la casa de máquinas, va a ser aproximadamente 8 veces la presión inicial, la cual

corresponde a 0.77atm (bocatoma), lo que indica que el sistema hidráulico puede generar una presión considerable que favorece el desarrollo del sistema hidro generador.

Para la determinación del diámetro del rodete se usó la ecuación 14, dando como resultado:

$$D = 38.567 \frac{\sqrt{67m}}{1200 \text{ rpm}} = 0.26m$$

Este diámetro resulta apropiado para un generador que funcione a 1200 rpm, como lo muestra la ecuación 14; sin embargo, al no encontrar un generador eléctrico con estas revoluciones, se hicieron ciertas modificaciones en rpm con el diámetro dado, las cuales se muestran en la siguiente ecuación:

$$D = 38.567 \frac{\sqrt{67m}}{3600 \text{ rpm}} = 0.08769m$$

Realizando el cálculo el cual se encuentra en la ecuación 14 para el diámetro del rodete de la rueda Pelton, se obtiene un plato de 8 centímetros de diámetro aproximadamente.

Por recomendación del fabricante seleccionado quien brindó asesoría, se eligió un diámetro de 0.25 m, con el fin de obtener la potencia deseada.

Para determinar la cantidad de álabes que lleva la rueda Pelton, se tiene en cuenta el diámetro del rodete como se muestra en el punto anterior, para este cálculo se usó la ecuación 13:

$$z = 15 + \frac{9.84252''}{2(1)''} = 19.9213 \approx 20 \text{ alabes}$$

Como se puede ver, la cantidad de álabes obtenida en la fórmula es de 20 aproximadamente, sin embargo se instalaron 16, por recomendación del fabricante, él recomienda siempre un número par, esto con el fin de mantener un equilibrio mecánico y que la rueda quede centrada, así mismo se prefieren los 16 alabes por el tamaño y la forma en la cual se mandaron a construir esto se puede evidenciar en las figuras 34 y 35 (alabes comunes en el mercado) comparada con la figura 36 (alabes diseñados para este proyecto).



Figura 34. Molde del primer modelo de alabe. [Fuente propia]

En la figura 34 se puede observar el molde de la cuchara, sin embargo, se decidió otro diseño el cual consta de dos apoyos al rodete, para sujeción mecánica y con un mejor acabado.



Figura 35. Alabes después del proceso de fundición. [Fuente propia]

La figura 35 ilustra el prototipo de cuchara inicial después del proceso de fundición, se tiene un acabado rustico y cuenta con un solo punto de fijación a la base.



Figura 36. Alabes terminados, en comparación con los alabes del primer diseño, estos cuentan con un mejor acabado y un punto de fijación adicional. [Fuente propia]

En la figura 36 se observan las cucharas que fueron implementadas después de su proceso de fundición, se eligió este diseño por presentar un mejor acabado y por tener una base doble de anclaje al rodete.

10.2.2 Diseño CAD de la rueda Pelton.

La fase de diseño inicia con la línea de transmisión del trayecto del agua hacia la fase de generación eléctrica, la cual comenzó con el diseño de la tubería, esta cuenta con tres diámetros distintos, de 3", de 2" y de 1", como la figura 37 muestra, se observa un acople a 90 grados que ilustra el bypass del sistema, esto con el fin de mantener un caudal constante en el inyector, se ilustran varias simulaciones de fluidos (ver figuras 37, 38, 39 y 42) en donde se evidencia la velocidad y la presión del fluido en la tubería, el diseño de la rueda Pelton y todo el montaje del sistema hidro generador. El sistema hidro generador cuenta con un bypass electromecánico (electroválvula) el cual es controlado, esto se hizo con el fin de garantizar el caudal adecuado en el inyector y de esta manera obtener la potencia máxima.

10.2.3 Tubería.

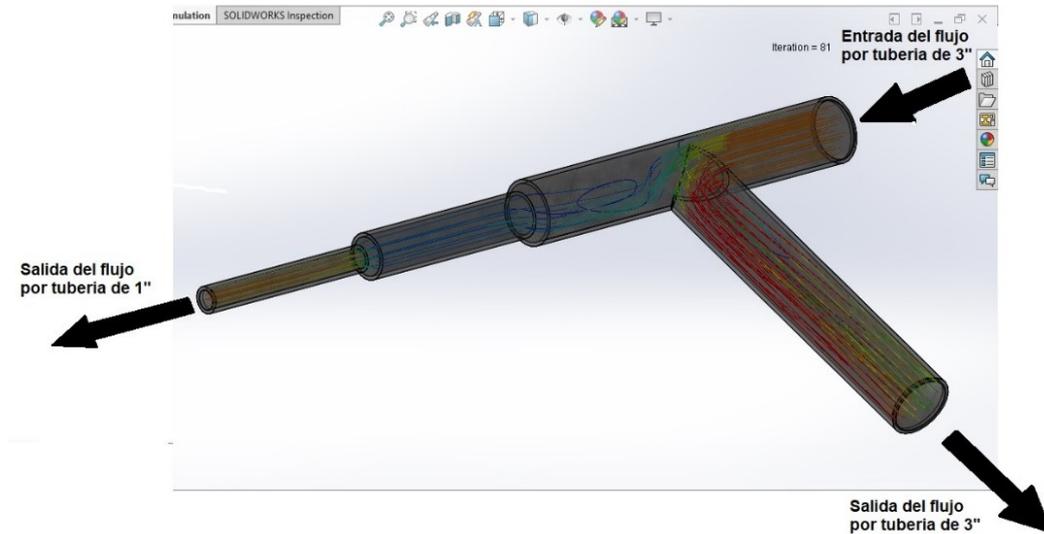


Figura 37. Diseño de la tubería que alimenta al sistema hidro generador, con una división denominada bypass. [Fuente propia]

Como se puede observar en la figura 37, se realiza una serie de reducciones en la tubería, esto con el fin de aumentar la velocidad a la salida de la misma de presión que posteriormente impactará en las cucharas de la rueda Pelton, también se puede observar un bypass del mismo diámetro de la tubería principal el cual tiene como función controlar el caudal de agua que pasará a través de la tubería de presión y de esta forma controlar el giro de la rueda.

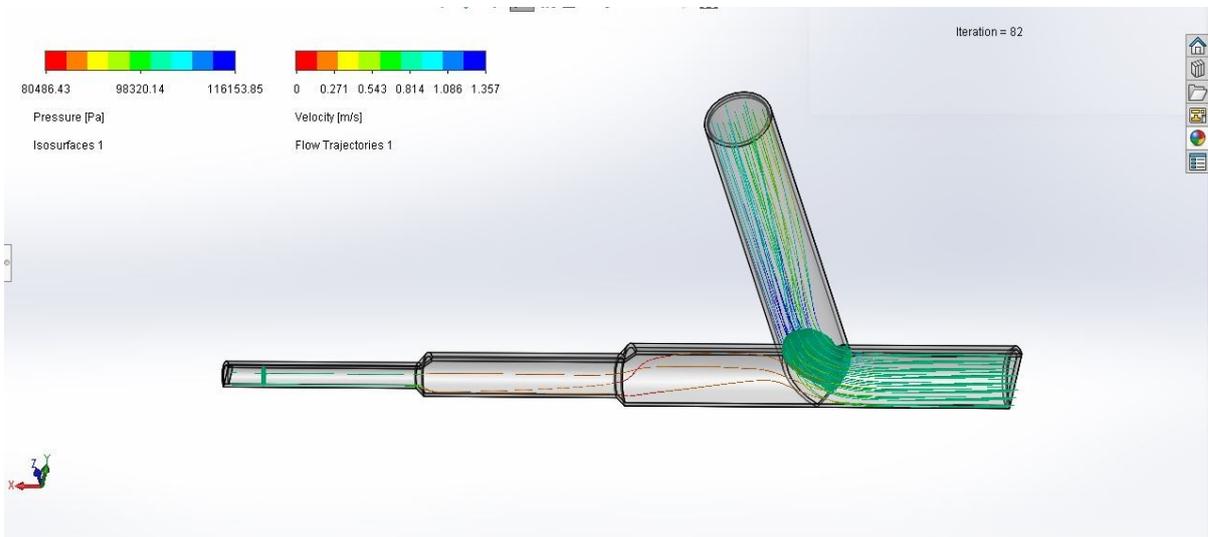


Figura 38. Se ilustra el flujo y la trayectoria de agua en la tubería próxima a la rueda Pelton, velocidad en (m/s) y presión en (Pa). [Fuente propia]

La figura 38 hace una relación entre la velocidad y la presión dentro de la tubería, cabe recordar que son inversamente proporcionales, esto quiere decir que, si la velocidad aumenta disminuye la presión o viceversa.

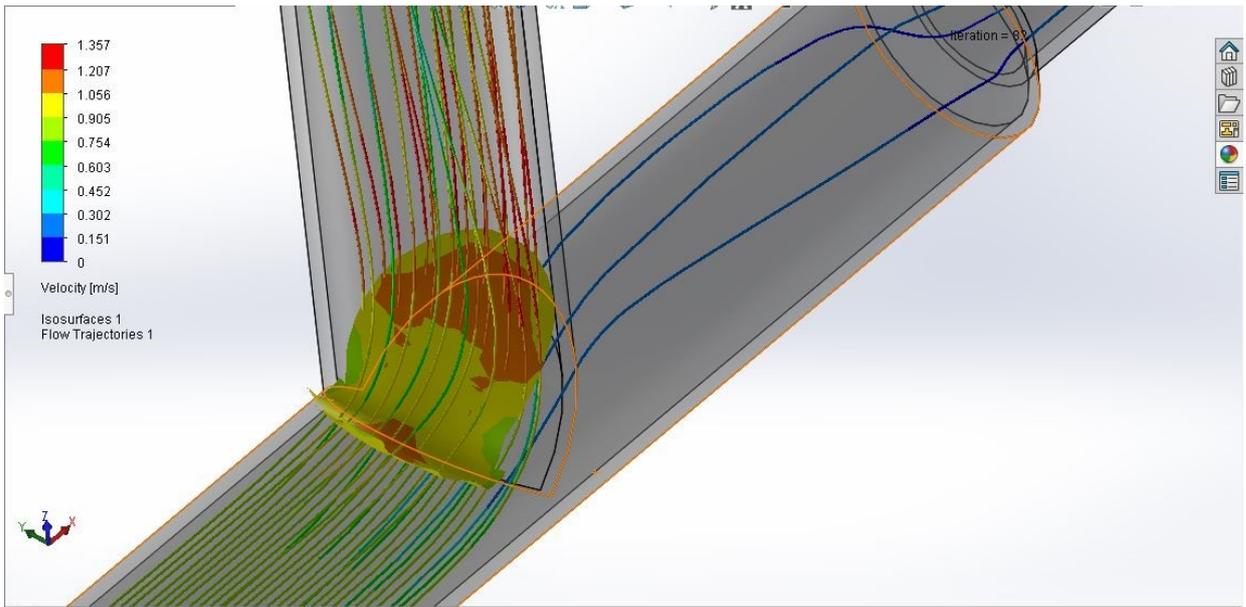


Figura 39. Simulación de fluidos, velocidad. [Fuente propia]

La figura 39 muestra el análisis de velocidad, como se puede ver, hay una mayor velocidad justo en el momento en que el fluido va por el bypass la cual está representada por el color verde, ámbar y roja, el color azul representa una mayor velocidad y poca presión.

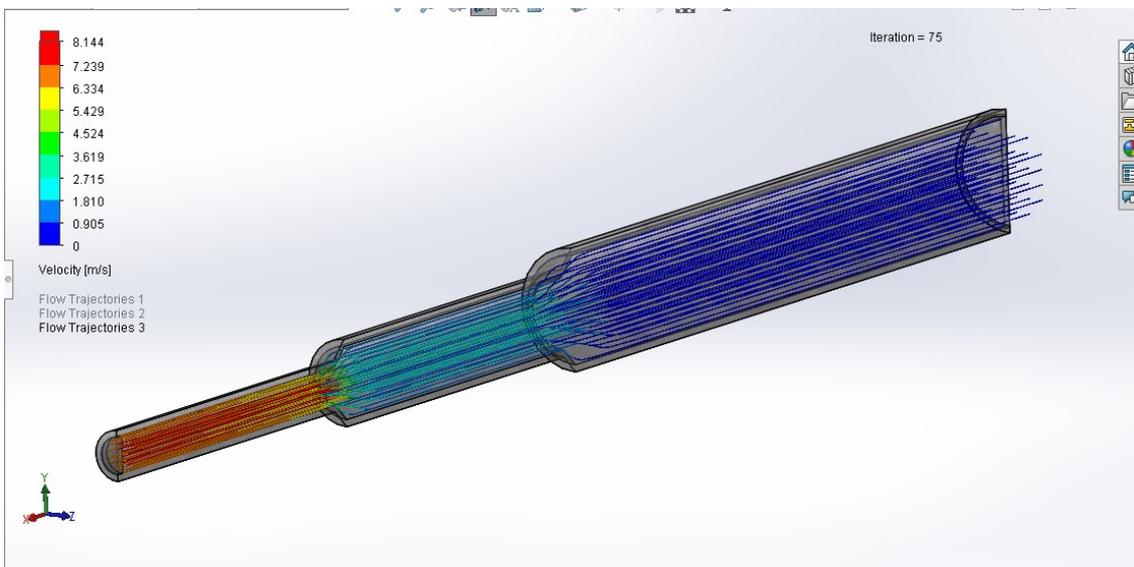


Figura 40. Muestra la velocidad del fluido en la tubería que 1", esta se encargara de llevar el fluido a una mayor velocidad para poder mover la rueda Pelton. [Fuente propia]

Sin embargo, el punto de mayor interés para el proyecto es a la salida que va de la tubería hacia la turbina Pelton (figura 40), que tiene un diámetro de 1", la simulación muestra una velocidad de entre 7.239 m/s hasta 8.144 m/s, este rango de velocidades están representadas por los colores ámbar y rojo.

10.2.4 Banco de montaje

Este tiene como función albergar la rueda Pelton y los demás componentes del hidro generador, además de captar el agua que pasa por la rueda Pelton y devolverla a la tubería.

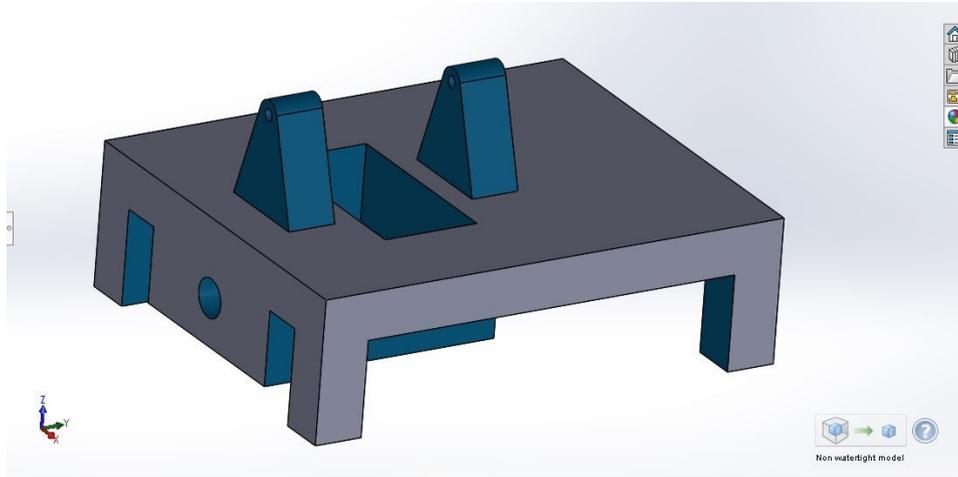


Figura 41. Diseño del banco de la rueda Pelton. [Fuente propia]

La figura 41 muestra la idea general del banco en donde se ve incorporado un tanque de recolección de agua, dos parales que permiten la sujeción mecánica de las chumaceras donde descansará el eje de la rueda Pelton y un espacio libre para el anclaje del generador eléctrico, sin embargo, se aclara que este diseño está sujeto a cambios, por las posibles correcciones en la casa de máquinas. Ver anexo 2.

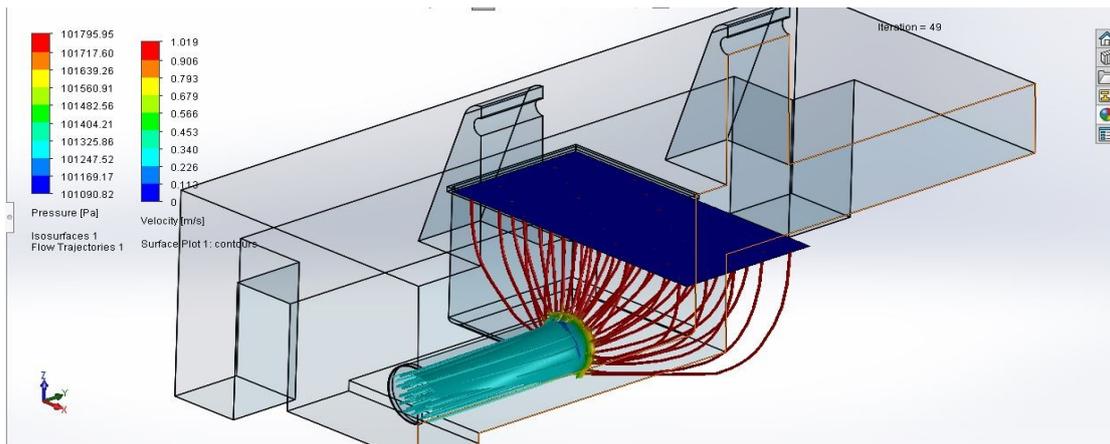


Figura 42. Comportamiento del fluido dentro del tanque que tiene el banco. [Fuente propia]

El análisis de flujo del tanque recolector de agua está representado por la figura 42, se puede observar de color azul oscuro la entrada de agua (se asume todo el caudal del proyecto, el cual es de 0.0036 m³/s, no hay pérdidas) y de color azul cian la salida del tanque.

Las líneas hacen referencia a la presión y la lámina en el tubo representa la velocidad, esto indica que el fluido al caer tiene presión, pero al momento de empezar a pasar a través del tubo de salida pierde esta presión, pero empieza a aumentar la velocidad.

10.2.5 Rueda Pelton

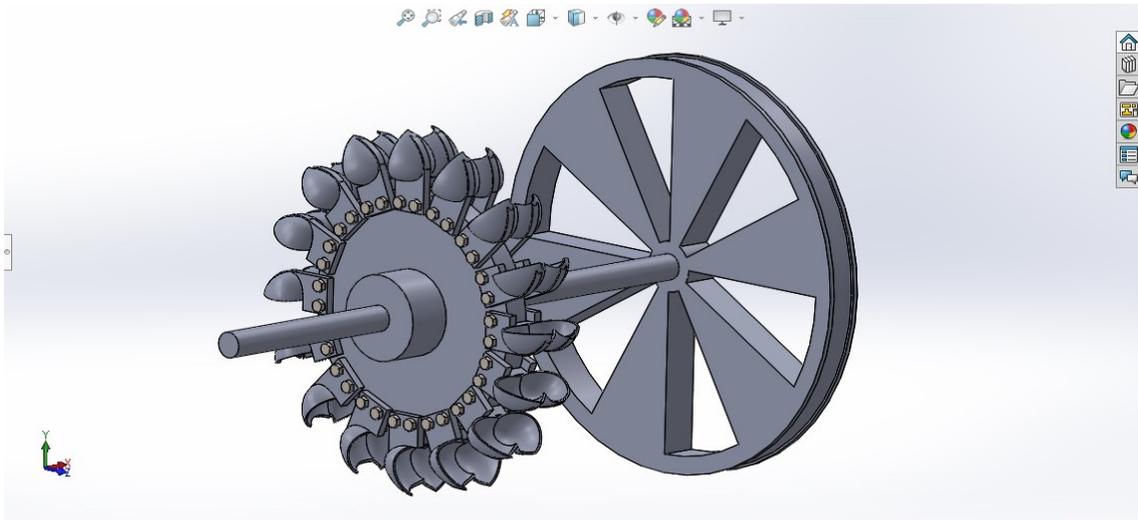


Figura 43. Prototipo de la rueda Pelton con una polea en su eje. [Fuente propia]

La figura 43 muestra el diseño de la rueda Pelton, con una polea acoplada a su eje, cuenta con 16 álabes. Ver anexo 3.

10.2.6 Álabe

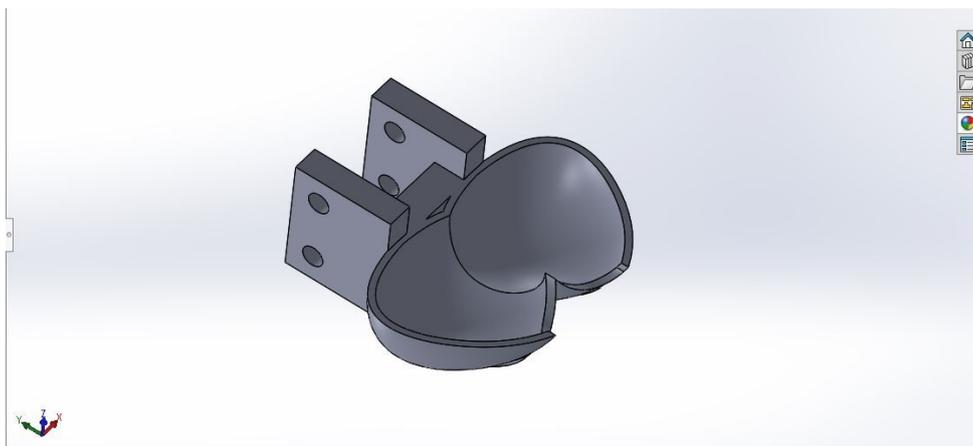


Figura 44. Diseño de un alabe o cangilón. [Fuente propia]

La figura 44 muestra un diseño de un álabe o cangilón, estos se diseñan contemplando ciertos beneficios, la principal función de este diseño es poder repartir por la mitad el chorro de agua que choca con este, hacer la mayor presión posible y que sea más eficaz el sistema.

10.2.7 Ensamblaje completo

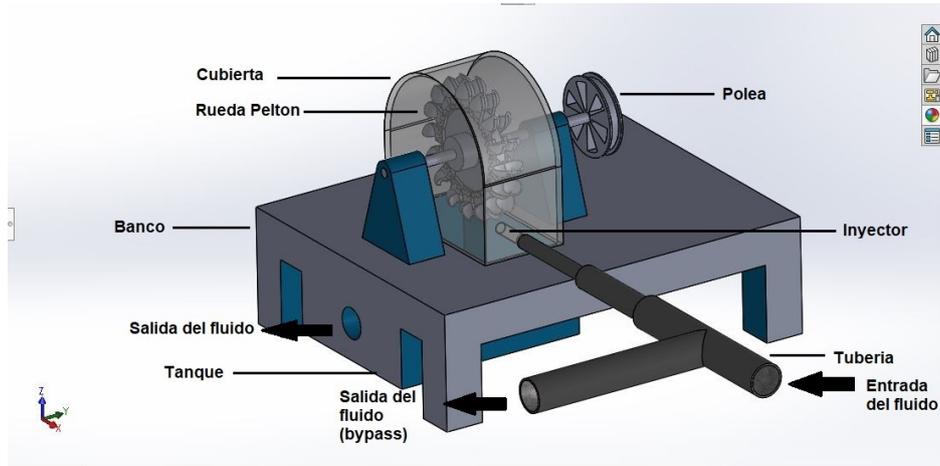


Figura 45. Diseño planeado para el sistema hidro generador y sus respectivas partes. [Fuente propia]

La idea general del montaje del sistema hidro generador se muestra en la figura 45, como se observa la rueda Pelton estará cubierta por un protector que impedirá que objetos extraños interfieran con el libre giro de la rueda, que se dañen y que el fluido se desperdicie; contará con una polea la cual ayudará a la rueda Pelton a que gire a las revoluciones suficientes para que el generador funcione a su régimen óptimo de giro, la tubería que se ve puede variar de posición, depende de la ubicación en la casa de máquinas.

10.2.8 Control

Para la modelación del control que gobierna a la electroválvula se usó el software de computador Proteus, este programa permite realizar simulaciones de componentes electrónicos y diagramas eléctricos, facilitando el análisis del sistema y obteniendo los valores que se requieren conocer, con esto se puede anticipar posibles fallos que se lleguen a presentar.

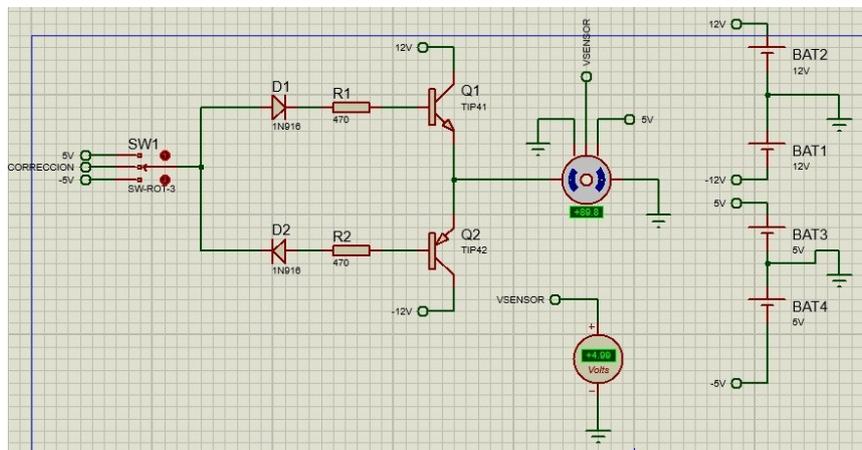


Figura 46. Control de electroválvula. [Fuente propia]

La figura 46 muestra la parte de control de la electroválvula cuya finalidad es permitir el flujo parcial del caudal por medio del inyector y de esta manera regular el voltaje de salida del generador para evitar sobre tensiones o tensiones de salida muy bajas, o cambios en la frecuencia de generación lo cual puede dañar los equipos que se encuentren recibiendo suministro de energía.

En la parte de control se pueden ver los diodos rectificadores cuya función es impedir una polaridad incorrecta y evitar dañar los transistores TIP41 Y TIP42.

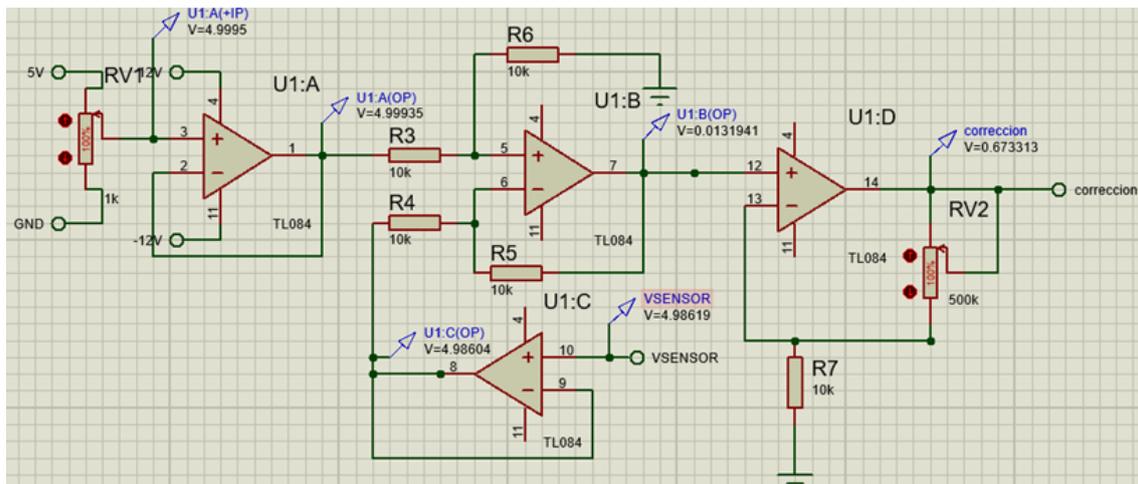


Figura 47. Sistema de potencia de la electroválvula. [Fuente propia]

La figura 47 muestra el circuito de potencia para el control de la electroválvula, este se encargará de convertir una señal de voltaje D.C en una posición en grados del servomotor.

10.3 Fase 3: Implementación recomendada del sistema hidro generador en el acueducto Veredal Vancouver - La rambla.

Para el cumplimiento de esta etapa, se solicitará al acueducto las condiciones mínimas en la construcción del cuarto, como son: nivelado de la zona de trabajo para garantizar el buen posicionamiento de los equipos, cerramiento para proteger el generador y los sistemas de purificación de la intemperie.

A pesar de contar con la mayoría de los materiales y elementos para realizar la instalación del sistema hidro generador para el acueducto veredal, esta no se pudo llevar a cabo, debido a las condiciones de salud que se están viviendo a nivel nacional, se tenía la esperanza de que el gobierno nacional y municipal permitiera el desplazamiento entre municipios, pero esto no fue posible, además la comunidad y los miembros del consejo del acueducto veredal Vancouver la Rambla del municipio de San Antonio del Tequendama tomaron la decisión de no permitir el ingreso de personas de otro lugar geográfico.

Se propuso a la junta directiva del acueducto realizar las visitas a terreno cumpliendo con los protocolos de bioseguridad, pero la respuesta fue negativa por parte de la junta directiva del acueducto.

Por esta razón se toma la decisión de cambiar la forma de presentación de este proyecto y se inclina al diseño y desarrollo del sistema hidro generador, para poder realizar las pruebas y toma de lecturas se realizó un banco de pruebas, de esta manera se pudo determinar el correcto funcionamiento del generador y de la rueda Pelton; sin embargo, esto repercutió en un aumento de costos ya que se debieron adquirir elementos que no se habían contemplado desde un principio.

10.3.1 Elementos

A continuación, se mostrarán los materiales utilizados para la realización del proyecto:

10.3.2 Elementos en PVC.



Figura 48. Registro de agua de una pulgada (1"). [Fuente propia]

Como lo muestra la figura 48, la válvula de bola tiene como función impedir el paso del fluido desde la manguera de carga hasta el punto de salida que va a la turbina, este elemento permite realizar la parada de funcionamiento de la turbina ya sea por mantenimiento o por alguna irregularidad.

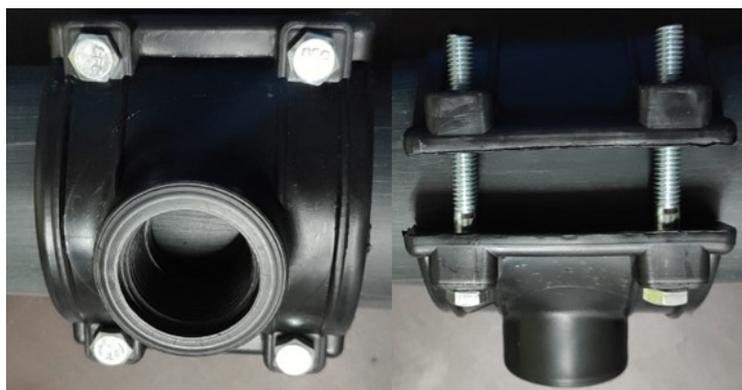


Figura 49. Collar 3:1. [Fuente propia]

Collar 3 a 1 (figura 49), tiene como función realizar una derivación del fluido sin necesidad de tener que realizar un corte transversal a la manguera.



Figura 50. Terminal tipo macho. [Fuente propia]

La figura 50 permite observar un terminal tipo macho de 1", este accesorio hará el papel de inyector del sistema hidro generador, así se garantiza que el diámetro del chorro sea de 1".



Figura 51. Montaje de la derivación a una pulgada (1"). [Fuente propia]

La figura 51 muestra el montaje de la derivación de tres pulgadas a una pulgada la cual tiene como función aumentar la velocidad del fluido que finalmente resultará en el inyector de la turbina.



Figura 52. Desaireador. [Fuente propia]

La figura 52 evidencia este elemento que se utiliza para retirar el aire que pueda contener la manguera desde la bocatoma hasta el punto de la turbina esto con el fin de reducir pérdidas que se puedan generar por el aire en la línea de distribución de agua.

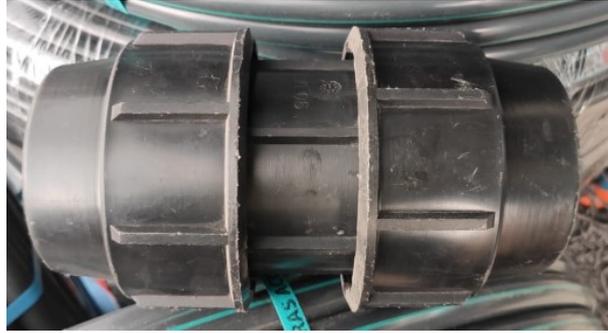


Figura 53. Unión rápida de tres pulgadas (3"). [Fuente propia]

En caso de ser necesario realizar un corte transversal en la manguera se utiliza una unión rápida figura 53, para unir nuevamente la manguera y que el flujo de agua siga su cauce sin causar ningún inconveniente.

Este tipo de unión se utiliza por su calidad y su sencillez para instalarla ya que no se necesita de herramientas complejas ni alto conocimiento en el área de la hidráulica.

10.3.3 Elementos mecánicos



Figura 54. Proceso de mecanizado y balanceo de la rueda que soportara el conjunto de alabes para la rueda Pelton. [Fuente propia]

En la figura 54 se puede observar el mecanizado y rectificación del plato donde se ensamblarán las cucharas.



Figura 55. Plato y alabes después del proceso de pulido. [Fuente propia]

En la figura 55 se observa el plato y las cucharas después del proceso de pulido.



Figura 56. Plato mecanizado y perforado. [Fuente propia]

Para realizar la correcta división en la trayectoria circular del plato se utiliza el cabezal universal divisor el cual es un elemento de la fresadora cuya finalidad es lograr una perfecta separación en los puntos de sujeción mecánica de las cucharas tal como se muestra en la figura 56.



Figura 57. Armado de la rueda y de los alabes para dar forma a la estructura tipo Pelton. [Fuente propia]

Una vez realizadas las perforaciones en el plato se procede a perforar la base de las cucharas y realizar en montaje al plato estas son fijadas (figura 57).



Figura 58. Estructura finalizada de la rueda Pelton. [Fuente propia]

En la figura 58 se puede observar el montaje de la rueda Pelton terminada, incluyendo el eje de esta. Como se observa las cucharas se encuentran unidas al plato por medio de una fijación mecánica.

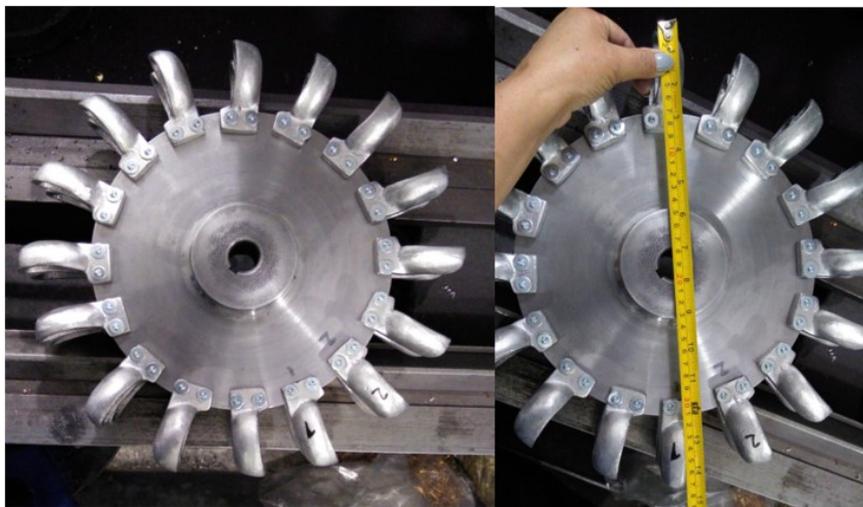


Figura 59. Rueda Pelton armada en su totalidad. [Fuente propia]

El plato tiene un diámetro de 25cm y cada cuchara tiene 6.25cm de longitud, en su totalidad esta rueda tiene un diámetro de 37.5cm, el diámetro del eje es de 2.54cm. (figura 59).

10.3.4 Elementos eléctricos



Figura 60. Rollo de cable n° 10AWG. [Fuente propia]

Para el cableado de los circuitos del tablero de pruebas se utiliza Cable de cobre N°10 AWG THHN marca procables (figura 60).



Figura 61. Protecciones termomagnéticas. [Fuente propia]

Protecciones termomagnéticas del banco de pruebas, como se observa en la figura 61, se tienen 2 protecciones termomagnéticas enchufables una de 20A para el circuito de iluminación y una de 40A para el circuito de fuerza adicional se puede observar la protección principal del tablero general de distribución.



Figura 62. Tablero general de distribución. [Fuente propia]

En la figura 62 se puede observar el tablero general de distribución con sus respectivos barrajes de fase, neutro y tierra, es un tablero para 4 circuitos.



Figura 63. Código de colores. [Fuente propia]

Se identifican y marcaron los conductores con el fin de evitar daños o malas conexiones tal como lo exige el RETIE (tabla 6.5 Código de colores para conductores c.a.), al realizar la respectiva identificación se simplifica la distribución de los circuitos e identificación de los mismos. [26] [27]



Figura 64. Elementos del tablero de pruebas. [Fuente propia]

En la figura 64 se pueden observar algunos de los elementos con que se construyó el tablero de pruebas los cuales cuentan con certificación RETIE.

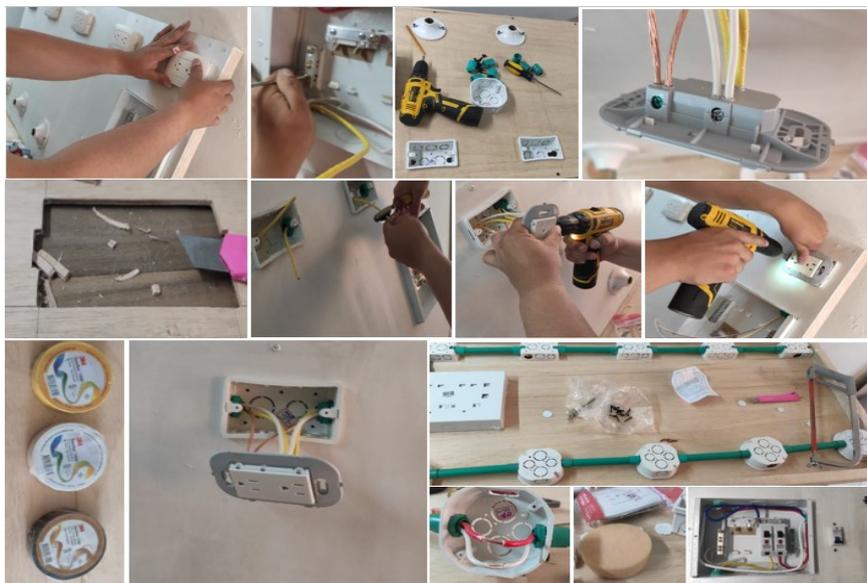


Figura 65. Construcción del tablero de pruebas. [Fuente propia]

En la figura 65 se evidencia el proceso de construcción del tablero de pruebas y algunas de las herramientas que se utilizaron para esta construcción.



Figura 66. Tablero de pruebas. [Fuente propia]

En la figura 66 se puede observar el tablero de pruebas en su fase de terminación.



Figura 67. Tablero de pruebas armado. [Fuente propia]

En la figura 67 se puede observar el tablero de pruebas terminado, el cual fue construido con el fin de realizar las pruebas con cargas diversas y de esta manera observar el comportamiento del generador, antes de proceder a energizarlo se realiza verificación de las conexiones y pruebas de continuidad con el fin de evitar daños en el tablero y un posible accidente a quien realice la manipulación



Figura 68. Servomotor que operara válvula de control para el bypass. [Fuente propia]

Este Servomotor (figura 68), gobierna la válvula la cual se encarga de regular la velocidad de giro de la rueda Pelton.



Figura 69. Unión por medio de poleas entre un motor eléctrico trifásico, lado izquierdo y un generador monofásico, lado derecho. [Fuente propia]

El motor y el generador se encuentran acoplados por medio de un juego de poleas 1:1, ya que el motor simulara el chorro del agua que impactara con la rueda Pelton.

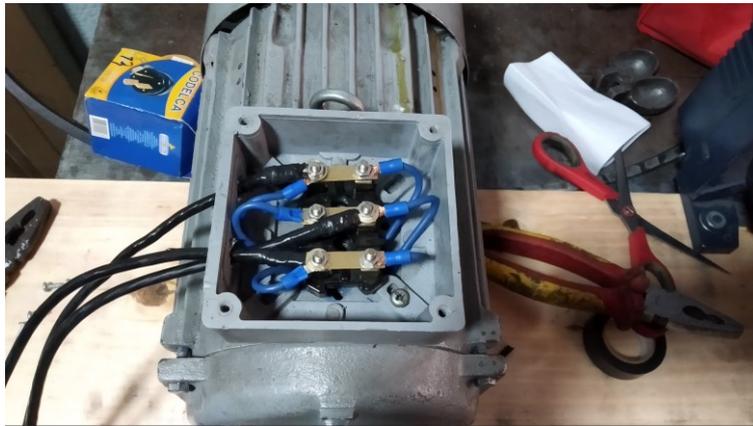


Figura 70. Conexión interna del motor eléctrico (Delta). [Fuente propia]

Como la figura 70 muestra, el motor eléctrico trae una conexión en Delta, este tipo de conexión hace que el motor comience su operación a sus máximas revoluciones, pero brindando un menor torque.

11 COMPROBACION EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Al momento de poner en marcha el sistema hidro generador como lo muestra la figura 76, se puede observar el mecanismo de transmisión de potencia entre sus elementos como lo son el motor, el generador, polea y la rueda Pelton.

Los elementos que se utilizaron para las respectivas pruebas de carga fueron una licuadora, un soplador de aire, una pistola de calor, una pulidora y bombillos, esto con el fin de poder obtener la mayor potencia suministrada del generador eléctrico con el fin de que en terreno no se presenten fallos por aumento de carga, las figuras 71, 72, 73, 74 y 75, muestran la ficha técnica de cada elemento



Figura 71. Ficha técnica de una licuadora, 120v, 400W, 60Hz. [Fuente propia]



Figura 72. Ficha técnica de un soplador de aire 110V, 350W. [Fuente propia]



Figura 73. Ficha técnica de una pistola de calor 120V, 750-1500W, 60 Hz. [Fuente propia]



Figura 74. Ficha técnica de una pulidora 127V, 2300W, 50-60Hz. [Fuente propia]



Figura 75. Ficha técnica 112-120V, 100W. [Fuente propia]



Figura 76. Acople entre el motor, el generador, la rueda Pelton. [Fuente propia]

Como la figura 76 muestra la configuración de simulación para la turbina Pelton, el motor eléctrico cumple con simular el flujo de agua impactando a la rueda Pelton, el generador eléctrico es el encargado de generar energía eléctrica para

satisfacer las cargas que se van a acoplar la rueda Pelton y la polea están sujetas al mismo eje, con una relación de 6:1.



Figura 77. La pinza voltiamperimétrica permite visualizar el voltaje que se obtiene a la salida del generador (126V). [Fuente propia]

El instrumento que se usó para la toma de valores de corriente y voltaje, fue una pinza voltiamperimétrica de la marca UNI-T modelo UT-200B.

Estas medidas que se observan en la figura 77, se tomaron a la salida del generador, así confirmando que se tiene una diferencia de potencial que permitirá el funcionamiento del banco de pruebas.

Todo el sistema será alimentado con 126V A.C a 60Hz, el banco de pruebas cuenta con una protección de 50A la cual gobierna el tablero de circuitos, la instalación del banco de pruebas consta de dos circuitos, uno de ellos gobierna la parte de iluminación con una protección de 20A y el segundo circuito gobierna la parte de potencia (tomacorrientes) con una protección de 40A.

11.1 La primera prueba

consistió solamente en puntos de iluminación, cinco bombillos, cada uno de 100W a 120V, adjunto se evidencia la corriente que pasa a través del conductor con la carga instalada.



Figura 78. Corriente obtenida para la carga instalada de un bombillo. [Fuente propia]

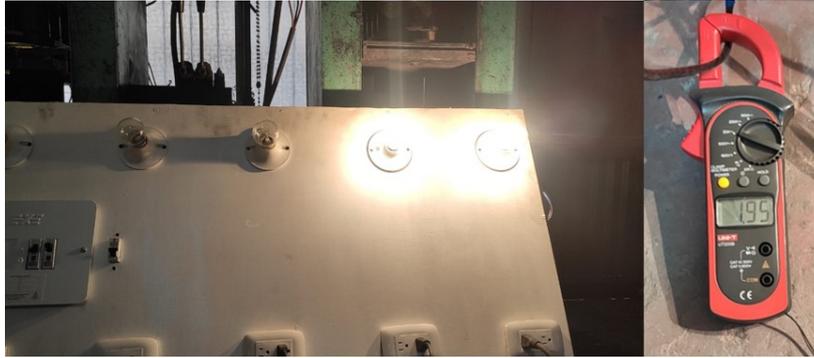


Figura 79. Corriente obtenida para alimentar la carga de dos bombillos. [Fuente propia]



Figura 80. Corriente obtenida para alimentar la carga de tres bombillos. [Fuente propia]



Figura 81. Corriente obtenida para alimentar la carga de cuatro bombillos. [Fuente propia]



Figura 82. Corriente obtenida para alimentar la carga de cinco bombillos. [Fuente propia]

11.2 La segunda prueba

Consistió en la conexión de equipos de mayor potencia, en este caso se usaron dos motores monofásicos y una resistencia eléctrica. Las figuras 83, 84, 85 muestran la corriente consumida, cabe aclarar que los puntos de iluminación permanecieron encendidos porque se buscó la máxima carga.



Figura 83. Corriente utilizada para poder soportar la carga. [Fuente propia]

Como se puede ver los cinco puntos de iluminación están en funcionamiento y una licuadora a su máxima velocidad así garantizando la mayor potencia de funcionamiento, también se observa la corriente que pasa por el conductor para poder satisfacer la demanda de potencia



Figura 84. Corriente requerida para soportar la potencia conectada al banco. [Fuente propia]

En este caso, los cinco puntos de iluminación están en funcionamiento, una licuadora a su máxima velocidad y un soplador de aire, ambos a la máxima

velocidad que pueden dar, así garantizando la mayor potencia de funcionamiento, también se observa la corriente que pasa por el conductor para poder satisfacer la demanda de potencia

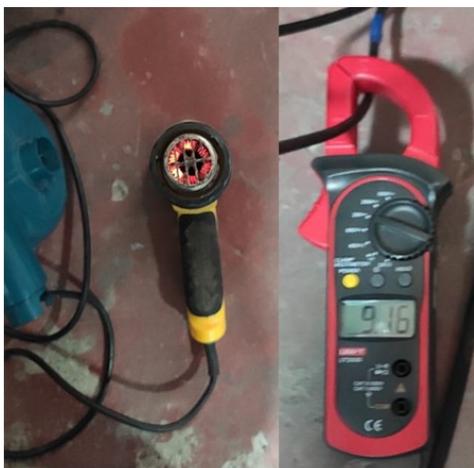


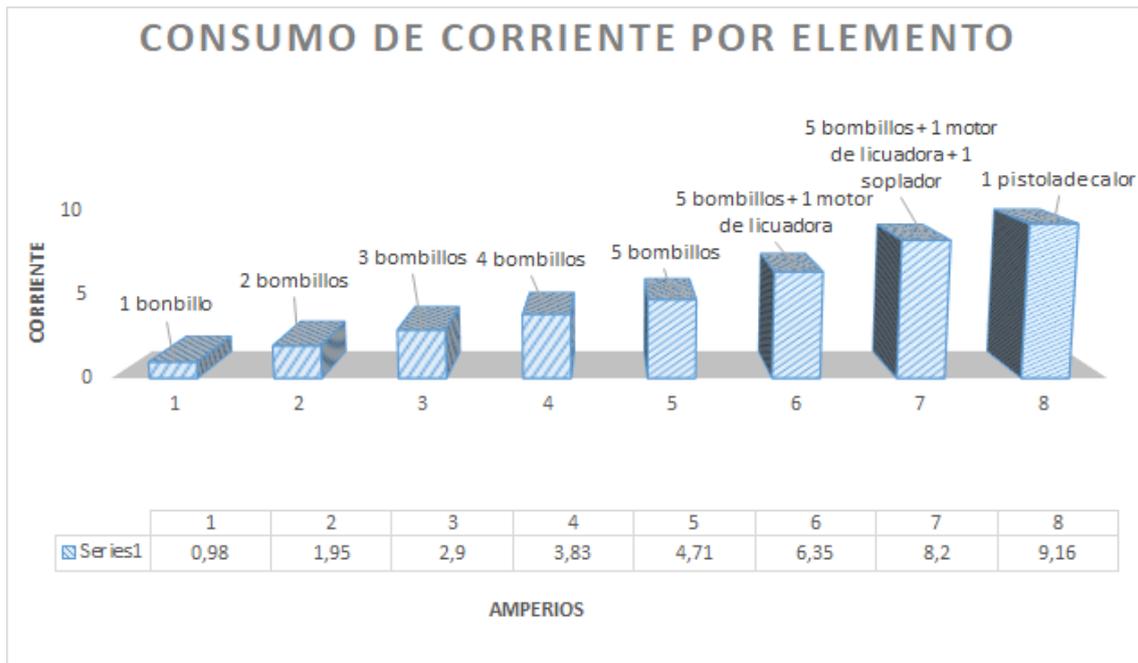
Figura 85. Pistola de calor a su máxima potencia con su medida en corriente. [Fuente propia]

La pistola de calor que se observa en la figura 85 tiene como potencia máxima 1500w, justo la carga que se estima requieren los equipos de potabilización por tal motivo esta prueba se realizó únicamente con este elemento con esto se obtiene la corriente experimentalmente el dato de la corriente que se consume y de esta manera se tiene una mayor certeza de lo que se encontrara en terreno, con esta prueba se valida que el generador está al 50% de su capacidad y de su carga máxima.

Recolección de datos

Elemento	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W) del fabricante	Potencia (W) Real
1 bombillo	126	0.98	100	123.48
2 bombillos	126	1.95	200	245.7
3 bombillos	126	2.9	300	365.4
4 bombillos	126	3.83	400	482.58
5 bombillos	126	4.71	500	593.46
5 bombillos + 1 motor de licuadora	126	6.35	500 + 400 = 900	800.1
5 bombillos + 1 motor de licuadora + 1 soplador	126	8.2	500 + 400 + 350 = 1250	1033.2
1 pistola de calor	126	9.16	1500	1154.16

Tabla 3. Información eléctrica de cada elemento. [Fuente propia]



Gráfica 1. Relación entre la corriente y cada elemento instalado. [Fuente propia]

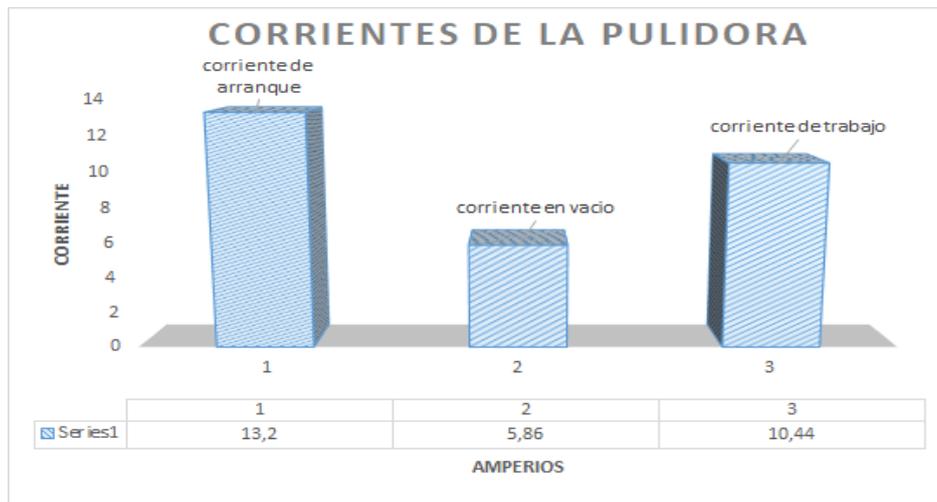


Figura 86. Valores de corriente en función del uso de una pulidora industrial. [Fuente propia]

La figura 86 muestra un fenómeno eléctrico en todas las máquinas que funcionan con motores, el primer valor que se ve de 13.20A corresponde a la corriente pico o corriente de arranque que la máquina exige para poder comenzar su funcionamiento, el segundo valor correspondiente a 5.86A es la corriente que la máquina demanda en vacío esto quiere decir que la pulidora se encuentra girando a su velocidad nominal y no se presenta ninguna resistencia u oposición a su giro y el tercer valor que es de 10.44A corresponde a la corriente de trabajo, como la pulidora debe mantener su velocidad nominal de giro es necesario un aumento en la corriente para poder mantener esta velocidad bajo un régimen de trabajo el cual ocasiona resistencia a su giro.

Elemento	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W) del fabricante	Potencia (W) Real
Pulidora (arranque)	126	13.2	2300	1663.2
Pulidora (en vacío)	126	5.86	2300	738.36
pulidora (con carga)	126	10.44	2300	1315.44

Tabla 4. Datos recolectados de la pulidora industrial. [Fuente propia]



Gráfica 2. Relación de corriente de arranque, en vacío y a plena carga. [Fuente propia]

Otro inconveniente que surgió en la realización de las pruebas fue que en el momento de exigirle al generador eléctrico y sobrepasar su potencia máxima, dejaba de generar energía eléctrica y solo giraba, esto se realizó con el fin de determinar qué ocurriría si efectivamente se sobrepasa la capacidad del generador para dar respuesta oportuna en dado caso y de esta manera brindar una solución.

Esto sucede porque el generador monofásico que se utilizó para la implementación de todo el sistema hidro generador, cuenta con un condensador de arranque (ver figura 87), el cual se descarga cuando ocurre la descompensación por la exigencia de carga para la cual él no está diseñado, se puede tomar como una protección que tiene el generador para evitar un daño en sus bobinados.

Cuando ocurre esto el condensador de arranque se descarga por completo por tanto el generador puede continuar girando sin presentar frenado pero no se tiene una tensión de salida (0V), este problema se puede solucionar excitando el condensador con una corriente alterna monofásica, pero se debe tener mucho cuidado ya que solo se debe dar un pequeño toque en sus terminales y esto cargará nuevamente el condensador para el funcionamiento normal del generador, cabe resaltar que esto se debe realizar mientras en generador se

encuentra girando a velocidad nominal, en ese momento se presenta un pequeño arco eléctrico en el condensador (ver figura 80) y un sonido diferente en el generador.



Figura 87. Condensador del generador 70µF, 340VA. [Fuente propia]

En la figura 87 se puede evidenciar el condensador de arranque del generador monofásico, este tiene como función generar energía reactiva para lograr la excitación de las bobinas del estator, esta función es vital para la generación de energía ya que, sin el condensador, no se excita de manera adecuada el campo magnético del estator, y a pesar de que el generador gire a su velocidad nominal, no se tendrá una salida de voltaje ni de corriente. Cabe resaltar que la frecuencia no depende de la excitación que genera el condensador sino de su velocidad nominal del generador y del número de polos que este tenga el mismo, la tensión y la corriente de salida dependen de la excitación magnética del estator.



Figura 88. Momento exacto en donde se realiza la recarga del condensador mediante una corriente alterna externa. [Fuente propia]

El hidro generador se ideó para poder energizar los equipos de potabilización de agua que la administración del acueducto contempla, se les hizo mención de que se aseguraba una potencia eficaz de 1.5kW para todo el sistema. Sin embargo, se obtuvo un generador eléctrico de mayor capacidad (2.8 kW) con este cambio queda potencia suficiente para conectar otros elementos que el acueducto veredal considere pertinente.

12 CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño e implementación del sistema hidro generador, sin embargo, este no se pudo implementar en la vereda debido a la situación de confinamiento. Los resultados obtenidos, tanto en la instalación del sistema como en la toma de datos de las pruebas realizadas, cumplieron con lo establecido de obtener una carga neta de 1.5 KW, la suma de las potencias de los elementos conectados al circuito eléctrico del generador sobrepasan este valor, incluso se llegó al máximo del generador con la conexión de una pulidora de 2.3KW y cinco bombillos de 100W, la carga total del sistema fue de 2.8KW, lo máximo que proporciona el generador eléctrico, así se puede garantizar el funcionamiento y correcta aplicación del sistema hidro generador en el terreno para el acueducto veredal.
- Basado en el estudio de las turbinas que se muestran en el marco teórico y de acuerdo con los parámetros obtenidos en campo, se determinó que la mejor turbina es la Pelton, esto debido principalmente al caudal que suministra el acueducto y al precio de elaboración, aunque también se analizaron otros factores. La carga suministrada al inicio del proyecto era de 1.5 kW, sin embargo, se pudo adquirir un generador con mejores características de carga (2.8 kW) con lo cual se dispondrá de un sistema con mayor capacidad para conectar más elementos.
- Gracias a la gestión y colaboración del acueducto veredal en las visitas realizadas a campo, se obtuvieron los parámetros hidráulicos como altura del salto de agua y el caudal necesario para la selección del sistema hidro generador.
- Debido a inconvenientes causados por la pandemia, no se pudo implementar el sistema hidro generador en el acueducto veredal, por lo tanto, se decide construir un tablero de pruebas, demostrando el funcionamiento del generador con una carga superior a la estimada.
- Para el desarrollo del sistema, únicamente se contempló el diseño de la rueda Pelton, para esto, nos basamos en las características del terreno y al recurso hídrico. Los cálculos de las dimensiones se pueden comprobar en el desarrollo metodológico, y la totalidad de los planos realizados con el software "SolidWorks 2019" se pueden verificar en los documentos anexos. Ver anexo 8.
- Vale la pena destacar que, pese a que no se pudo simular el funcionamiento del sistema, dado el poco tiempo y las limitaciones sociales en las que nos encontramos, se decidió incluir dentro del trabajo una pequeña simulación con el software "SolidWorks Flow Simulation", el cual ilustró la velocidad y el recorrido del fluido dentro de la tubería, de esta manera se verificó la veracidad del dato de la velocidad obtenida en terreno.

- Por principios físicos, al exigirle una carga al generador se presenta un frenado eléctrico que conlleva a una disminución de las revoluciones de la turbina, se decide entonces diseñar un sistema de control de caudal para mantener el régimen nominal de giro del hidro generador, para esto, se simuló a través del software Proteus un control proporcional, basado en la apertura y cierre de una electroválvula que conecta con el bypass del sistema, y que a su vez, controlará el caudal de la salida de agua en el inyector, obteniendo de esta forma la máxima transferencia de potencia según sea requerida.
- Por solicitud del acueducto veredal, dado que una simulación no aporta el mismo interés al momento de invertir en la construcción del sistema, y así mismo, debido a la pandemia y al impedimento de visitar nuevamente las instalaciones donde se iba a realizar el proyecto, se optó por desarrollar un banco de pruebas piloto en nuestra residencia, para verificar la transferencia de energía en función de la carga requerida.
- Se realizaron diferentes pruebas al sistema hidro generador variando la carga con el fin de obtener la capacidad máxima que soporta el sistema evidenciando el óptimo funcionamiento del mismo. Ver anexo 9.
- Se comprobó que el generador presenta una protección de sobrecarga del circuito, por medio del condensador de arranque, el cual se descarga al momento de exigirle mayor potencia de la nominal, de esta manera se brinda un soporte adicional de protección para el acueducto, más seguro y evitando daños en los elementos y en el generador.

13 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mott Robert. (2006). Mecánica de fluidos. México DF, México: Pearson.
- [2] Mataix y Plana, Claudio. (1986). Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Madrid, España: Ediciones del castillo s.a.
- [3] Penche, Celso. (1998). Manual de pequeña hidráulica. Bruselas, Bélgica: dg xvii.
- [4] Jara Wilfredo. (1998). Máquinas hidráulicas. Rimac, Perú: W&H EDITORES.
- [5] Parra, B. Z., & Robles, A. V. (n.d.). Máquinas Hidráulicas Teoría y Problemas.
- [6] Domingo, A. M. (2012). Apuntes de mecánica de fluidos. Apuntes de Mecánica de Fluidos, 99.
- [7] Navarro Salas, R. (2017). Máquinas eléctricas y sistemas de potencia
- [8] Manuel Polo Encinas-Turbomáquinas Hidraulicas.pdf. (n.d.).
- [9] Viejo Zubicaray, M. (2005). Bombas: teoría, diseño y aplicaciones. Limusa.
- [10] Ariel, M. (2014). Turbinas Pelton. Engenharia, 4.
- [11] Alarcón. J & S. J. (2008). Ensayo Y Estudio De Una Turbina Pelton, 19–161.
- [12] Egusquiza, J., & Sánchez, Ju. (2009). Diseño Un Banco De Pruebas Para Turbinas Michel Banki Para El Laboratorio De Energía De La Pontificia Universidad Católica Del Perú, 1, 179. Retrieved from
- [13] Agudelo, S., Chica, ^ Edwin, Obando, F., Sierra, N., Velásquez, L., & Enríquez, W. (2013.) INGENIERÍA MECÁNICA Design, simulation, construction and characterization of a 5kW hydraulic Pelton turbine, 15(1), 183–193.
- [14] Rica, U. D. C., & Ingeniería, F. D. E. (2017). Defensa TFG: Diseño y especificación de una pico turbina hidroeléctrica tipo Pelton, para potencias de hasta 1000 watts. Retrieved from <http://www.eim.ucr.ac.cr/?q=node/197>
- [15] Tenorio Z, N. G. (2005). Diseño e Implementación de un Prototipo de una Pico central Hidráulica para uso Rural. Escuela Politécnica Del Ejército Sede Latacunga, 1–168.
- [16] León Ribero, J. H., & Riveros Santos, V. A. (2008). Diseño, Construcción, Montaje Y Operación De Una Turbina Pelton Para Generar Electricidad, 1–143.
- [17] Ferrada Sepúlveda, L. A. (2012). Diseño de Rodete de Turbina Hidráulica tipo Pelton para Micro generación.

[18] Gonzales, J. (2008). Aspectos Específicos De Los Aprovechamientos Mini hidroeléctricos. Aplicaciones En Canarias, 1–37.

[19] Vessaz, C., Andolfatto, L., Avellan, F., & Tournier, C. (2017). Toward design optimization of a Pelton turbine runner. Structural and Multidisciplinary Optimization, 55(1), 37–51.

[20] Bustamante Cabrera, E. J., & Arias Reyes, C. P. (2008). Diseño y construcción de una turbina Pelton para generación eléctrica, capacidad 2kW., 1–137.

[21] Chapman Stephen, (2012). Máquinas eléctricas. México D.F, México: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

[22] UPME (08/03/2017)
<https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Lists/Glosario/AllItems.aspx>

[23] Zamora Parra Blas & Viedma Robles Antonio. (2016). Máquinas Hidráulicas. Cartagena, Colombia: Ediciones UPCT.

[24] Ingfocol Ltda. (7 de octubre de 2015) Primer Atlas hidro energético revela gran potencial en Colombia <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>

[25] Ingeniería, Estudios y Proyectos NIP, S.A (noviembre 1995) MINIHIDRÁULICA EN EL PAÍS VASCO
<https://www.eve.eus/CMSPages/GetFile.aspx?guid=237caabd-fce4-4cbf-ba58-67b124c63bfb>

[26] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 2050 (1998-11-25) ICONTEC
<https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/ntc%2020500.pdf>

[27] ANEXO GENERAL REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE) (30/08/2013) ministerio de minas y energía
<https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/1179442/Anexo+General+del+RETIE+vigente+actualizado+a+2015-1.pdf/57874c58-e61e-4104-8b8c-b64dbabedb13>

[28] Briceño, E., Escobar, R., & Saúl, R. (2008). Manual de capacitación en operación y mantenimiento de pequeñas centrales hidráulicas. www.solucionespracticas.org.pe

[29] Organización Mundial de la Salud (julio de 2017)
https://www.who.int/water_sanitation_health/es/

[30] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (Objetivos del Desarrollo sostenible, Objetivo 6 Agua Limpia y Saneamiento.)
<https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html>

[31] Real academia de la lengua española. (2019)
<https://dle.rae.es/dise%C3%B1o>