

Implementación de una picocentral hidroeléctrica en la estación piscícola “La Cascada” ubicada en el municipio de Mutiscua-Norte de Santander

Autores

**JOEL ALEJANDRO TORRES LIZCANO
EDWIN JULIÁN HERNÁNDEZ LEÓN**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, 1 de diciembre de 2022

Implementación de una picocentral hidroeléctrica en la estación piscícola “La Cascada” ubicada en el municipio de Mutiscua-Norte de Santander

**JOEL ALEJANDRO TORRES LIZCANO
EDWIN JULIÁN HERNÁNDEZ LEÓN**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Director: Nury Audrey Nieto Garzón
Ingeniero Mecánico, PhD.
nury.nietogar@unipamplona.edu.co

Codirector: Jorge Antonio Velasco Parra
Ingeniero Mecánico
Antonio.velasco@unipamplona.edu.co

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, 1 de diciembre de 2022

Dedicatoria

Esta dedicado primeramente a Dios y a todas las personas que hicieron parte de este proceso, a mis padres por su apoyo incondicional por cada regaño que a su vez era una voz de aliento para seguir, a mis hermanos que siempre estuvieron ahí, apoyándome, por último, me dedico este trabajo a mí porque nunca desistí y seguí con paso firme buscando alcanzar la meta definida y por siempre superar cada obstáculo que se me presentó.

A Dios por darme la vida y las fuerzas por seguir adelante. A mi madre por esos consejos y ayudas en la universidad. A mi tía Blanca y tío Gabriel por ser mi soporte para poder culminar mis estudios universitarios. A mis abuelos, abuelas, tíos, tías, primos y primas que son las personas que me dan el amor de familia con su ayuda incondicional. A mis amigos, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas para lograr que este sueño sea una realidad. Y a todas las personas que han aportado ese grano de arena para ser la persona que soy, por último, a mi nono y padre que siempre estuvieron para darme ese apoyo y amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradecemos a Dios por habernos permitido culminar este proyecto, a nuestra directora Nury Audrey Nieto G y a nuestro codirector Jorge Antonio Velasco P por sus recomendaciones y ayudas para que este proyecto llegase a estas instancias al señor Eduar Parada y su esposa Sol Alexandra Lizcano por brindarnos la confianza y ayuda para implementar la picocentral en su estación piscícola, a Cesar Iván Torres por apoyarnos y colaborarnos en todo lo que hacía referencia a búsqueda y transporte desde la ciudad de Bucaramanga de lo que necesitábamos para el proyecto, al señor Tyrone Cáceres por permitirnos la entrada y uso de todo su taller a libre disposición y a cada uno de los empleados de la estación piscícola quienes de una u otra manera nos colaboraron en lo que se requerían, a la universidad de Pamplona por formarnos como personas líderes capaces de realizar cualquier trabajo de investigación. Por ultimo y no menos importante a cada una de nuestras familias que siempre han sido el motor para no desistir y seguir adelante durante toda la carrera.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	18
1.1 Planteamiento del problema	18
1.2 Justificación	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Antecedentes internacionales	21
2.2 Antecedentes nacionales	21
2.3 Antecedentes regionales	22
3. BASES TEÓRICAS	24
3.1 Generación hidroeléctrica	24
3.1.1 Tipos de centrales hidroeléctricas	24
3.1.2 Clasificación de las centrales según la potencia de generación	26
3.1.3 Componentes de una central hidroeléctrica de agua fluyente	27
3.2 Turbinas hidráulicas.....	29
3.2.1 Clasificación de las turbinas	29
3.2.1.1 Turbinas de acción o impulso	29
3.2.1.2 Turbinas de reacción	31
3.2.2 Parámetros característicos de las turbinas	32
3.2.2.1 Caudal	33
3.2.2.2 Velocidad específica.....	35
3.2.2.3 Potencia hidráulica útil	36
3.2.2.4 Cabeza neta	36
3.2.2.5 Eficiencia de la turbina.....	39
3.2.2.6 Potencia eléctrica generada.....	40
3.2.3 Selección de una turbina hidráulica.....	41
4. METODOLOGÍA	42
4.1 Caracterización inicial	42
4.1.1 Descripción de la estación piscícola	42
4.1.2 Potencial hidráulico	43

4.1.3	Demanda eléctrica	51
4.2	Selección de la turbina.....	54
4.2.1	Disposición.....	54
4.2.2	Mercado	54
4.3	Selección del generador	56
4.4	Montaje del sistema.....	57
4.4.1	Montaje de la tubería.....	57
4.4.2	Montaje de la turbina.....	58
4.4.2.1	Base soporte de la turbina	58
4.4.2.2	Acople de la turbina a la tubería	59
4.4.2.3	Manómetro de control	60
4.4.3	Montaje del generador	61
4.4.3.1	Construcción de la base	61
4.4.3.2	Relación de velocidad.....	62
4.4.4	Montaje del sistema de control.....	64
4.4.5	Montaje de la red eléctrica	65
4.4.6	Plano de la picocentral	66
4.5	Operación de la picocentral	66
4.6	Análisis económica y ambiental	68
5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	70
5.1	Turbina Michell-Banki implementada	70
5.2	Curva de Potencia	71
5.3	Potencia eléctrica generada	72
5.4	Tiempo de recuperación (Payback)	72
5.5	Reducción de gases de efecto invernadero (GEI).....	73
6.	CONCLUSIONES	74
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	75
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
9.	APÉNDICES	79
Apéndice 1.	Código EES.	79
Apéndice 2.	Plano de la picocentral.....	81
Apéndice 3.	Plan de mantenimiento preventivo de la picocentral.	82
Apéndice 4.	Tabla de proveedores	83

10. ANEXOS.....	84
Anexo 1. Cotización Colturbinas.....	84
Anexo 2. Curvas de eficiencias de las turbinas hidráulicas.....	87
Anexo 3. Especificaciones de la correa	88
Anexo 4. Especificaciones del generador ST-3	89

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas según la OLADE.....	26
Tabla 2. Coeficientes de Manning.	33
Tabla 3. Radio hidráulico y perímetro mojado de algunos canales.	34
Tabla 4. Rugosidades para tuberías comerciales nuevas.....	39
Tabla 5. Datos del canal e información de interés.....	45
Tabla 6. Datos de interés tubería del punto 2.....	47
Tabla 7. Datos de la tubería del montaje nuevo.....	49
Tabla 8: Demanda y consumo eléctrico máximo de la estación piscícola.....	53
Tabla 9. Cotización de transferencias automáticas.	64
Tabla 10. Costos de la implementación de la picocentral.	68
Tabla 11. Información de la turbina.	70
Tabla 12. Datos de caudal, potencia y tensión respecto a la abertura de la turbina.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Central de agua fluyente.	25
Figura 2. Central de embalse.	25
Figura 3. Central de bombeo.	26
Figura 4. Toma de agua de una central fluyente.	27
Figura 5. Conductos de ingreso.	27
Figura 6. Sala de máquinas hidroeléctrica.	28
Figura 7. Turbina hidráulica.	28
Figura 8. Generador trifásico.	29
Figura 9. Turbina Pelton.	30
Figura 10. Turbina Michel-Banki.	31
Figura 11. Turbina Francis.	32
Figura 12. Turbina Kaplan.	32
Figura 13. Abaco de selección de turbinas.	41
Figura 14. a. Canal abierto estación piscícola "La Cascada". b. Sección transversal del canal.	44
Figura 15. Tubería de ingreso.	47
Figura 16. Montaje nuevo.	49
Figura 17. Medición del caudal mediante el llenado de un recipiente.	50
Figura 18. Diferencia de alturas entre el embalse y la turbina.	51
Figura 19. Perfil medio de la demanda eléctrica de un día de demanda baja.	52
Figura 20. Perfil medio de la demanda eléctrica de un día de demanda alta.	52
Figura 21. Demanda eléctrica a las 12:00 pm de todos los días de una semana. .	53
Figura 22. Espacio disponible para el montaje de la turbina.	54
Figura 23 a. Turbina Banki Colturbinas S.A. b. Despiece turbina Banki.	56
Figura 24.. Generador ST3 series de 3 kW.	57
Figura 25 a. Montaje de tubería b. Rejilla de retención de suciedades.	58
Figura 26. a. Diseño de la base b. Fabricación de la base c. Montaje de la base d. Montaje de la turbina.	59
Figura 27. a. Diseño del acople b. Montaje del acople.	60
Figura 28 Manómetro análogo instalado antes de la entrada de la turbina.	61
Figura 29. a. Corte del riel. b. Acondicionamiento de la base del generador c. Placa fundida, base del generador d. Generador montado.	62
Figura 30. Medición de rpm con luz estroboscópica.	63
Figura 31. a. Poleas de transmisión de potencia b. Montaje de las poleas en los ejes.	64
Figura 32. Montaje del sistema de control.	65
Figura 33. Montaje de la red del generador a la transferencia.	66
Figura 34 Montaje picocentral hidroeléctrica "La Cascada".	67
Figura 35. (a) Curva de potencia respecto al caudal. (b) Curva de tensión respecto al caudal.	71

RESUMEN EXTENDIDO

Implementación de una picocentral hidroeléctrica en las instalaciones de la estación piscícola “La Cascada” ubicada en el municipio de Mutiscua-Norte de Santander.

Torres Lizcano Joel Alejandro¹, Hernández León Edwin Julián²

^{a,b}*Pamplona University, Km 1 Via B/manga, Pamplona, Colombia*

Resumen

En este proyecto se implementó una picocentral hidroeléctrica en las instalaciones de la estación piscícola “La Cascada” ubicada en el municipio de Mutiscua-Norte de Santander con el fin de satisfacer la demanda eléctrica requerida. Para esto, se realizaron los cálculos del caudal y la caída neta de la fuente hídrica para determinar la potencia hidráulica que se podría llegar a utilizar. Posteriormente, se realizó una búsqueda exhaustiva de una turbina tipo Michell-Banki con un generador síncrono para poder generar una parte de la energía para la estación. Con esta implementación se solucionó el 80 % de la demanda de energía de la estación piscícola y se está contribuyendo una reducción de 0,8319 tCO₂eq/año al no utilizar la energía generada de manera convencional.

Palabras clave: Picocentral hidroeléctrica; Generación de energía; Turbina Michell-Banki; Energía hidroeléctrica.

Abstract

In this project, a hydropower station was implemented in the facilities of the fish farm "La Cascada" located in the city of Mutiscua-Norte de Santander, in order to satisfy the required electricity demand. Calculations of volumetric flow and head net of the water source were made to determine the hydraulic power that could be used. Subsequently, an exhaustive search was carried out for an adequate Michell-Banki type turbine and its synchronous generator to generate a part of the power for the station. This project supplies 80 % of the energy demand of the fish station and a reduction of 0,8319 tCO₂eq/año is being contributed by not using the energy generated conventionally.

Keywords: Hydroelectric picocentral; Energy generation; Michell-Banki turbine; Hydropower.

1. Introducción

La energía es considerada un medio fundamental para el avance de la sociedad. Las zonas no interconectadas de Colombia carecen de energía eléctrica, lo que limita la competitividad en el mercado y el desarrollo de la región. Debido a esto, varias empresas de estas zonas buscan alternativas viables para obtener energía propia, reduciendo costos energéticos, evitando pérdidas y minimizando impactos ambientales. Además, la electrificación es prácticamente improbable en las zonas no interconectadas debido al alto costo de las líneas de transmisión que representan más del 75 % del costo de la electrificación [1].

Por lo anterior, la implementación de alternativas para generación de energía limpia, es una necesidad de las regiones no interconectadas. Por ejemplo, Tilahun et al. (2021) diseñaron una turbina para producir una potencia de 32 kW, dispuesta en zonas rurales de Etiopía, para esto los autores realizaron un listado y selección de materiales adecuados para la fabricación de dicha turbina y así, llegar a satisfacer la demanda eléctrica de 300 hogares con un consumo medio de 100 W [2]. Monroy et al. (2011) describieron un proyecto de investigación para la implementación de una picocentral hidroeléctrica en zonas no interconectadas de Colombia, para ello los autores realizaron un análisis del recurso disponible y así mismo, plantearon una metodología del impacto

ambiental que una obra de estas genera [3]. Niño (2018) presenta una solución energética en la cual expone la implementación de una turbina Pelton aprovechando las pequeñas fuentes de agua para solucionar la demanda eléctrica de las viviendas cercanas a dicha fuente [4]. La generación de energía distribuida es una alternativa para satisfacer la demanda energética de las regiones no interconectadas, por tal razón, en zonas alejadas de la red de distribución se están implementando proyectos de generación aislada de energía eléctrica [5].

Este proyecto propuso una solución para la demanda de energía eléctrica de la piscícola “La Cascada” ubicada en Mutiscua-Norte de Santander, Colombia. Para tal fin, se realizó una caracterización de la demanda de la estación y un estudio del caudal disponible en la piscícola. Después de los estudios realizados, se buscó una solución viable para la problemática energética de la estación piscícola, implementando una picocentral dentro de la estación. El proyecto produce energía eléctrica necesaria en la estación para la mayoría de sus labores cotidianas, reduce los costos facturados por el servicio de energía eléctrica y contribuye con la reducción de gases de efecto invernadero al no consumir energía generada a partir de fuentes convencionales. Este proyecto sirve de incentivo para la implementación de proyectos similares en otras estaciones piscícolas de la región, así como punto de partida para apoyar otros sistemas de generación basados en energías renovables.

2. Metodología

Se realizó el montaje de una picocentral hidroeléctrica en las instalaciones de la estación piscícola “La Cascada” con el fin de satisfacer su demanda eléctrica, para llevar a cabo dicho montaje se realizaron una serie de investigaciones y pasos descritos a continuación.

2.1. Caracterización inicial.

Iniciando con una caracterización en la cual se midió el caudal mediante el llenado de un recipiente de 200 L y la cabeza neta disponible en la estación piscícola como se aprecia en la Fig.1(a). Con esta investigación se determinó cuánta energía se podía llegar a producir. De igual manera se midió con ayuda de una pinza voltiamperimétrica, la demanda de energía eléctrica de dicha estación (ver Fig.1(b)).



(a)



(b)

Fig. 1. (a) medición del caudal; (b) medición de la potencia

2.2. Selección de la turbina y el generador.

Después de tener los resultados de la caracterización se analizó la disposición y el mercado nacional de turbinas que cumplieran con los requerimientos anteriores. De igual manera se realizó la selección de un generador que cumpliera con los requerimientos mínimos para suplir la demanda eléctrica de la estación. La turbina y el generador seleccionado se aprecian en la Fig. 2.



(a)



(b)

Fig. 2. (a) turbina tipo Michell-Banki; (b) generador síncrono de 3 kW

2.3. Montaje del sistema

Se realizó el montaje del sistema, el cual consistió inicialmente en la adecuación de la tubería que iba a suministrar el flujo de agua a la turbina. Para ello se llevó a cabo el montaje de una serie de tubos en paralelo de PVC de 4" de diámetro, conectados a dos tanques de carga. Los tubos fueron adecuados con un filtro para que el flujo de agua que transcurre dentro de ellos no llevase suciedades, las cuales podían obstruir la turbina. El filtro se muestra en la Fig. 3(a). Se hizo el montaje de la turbina de tal forma que el agua se descargue y siga su flujo natural dentro de la estación piscícola, para la cual se debió diseñar y fabricar una base fija en dicho lugar (ver Fig. 3(b)). De igual manera se diseñó y construyó un acople para la conexión de la tubería a la turbina, evitando pérdidas de presión y fugas de agua en la misma (fig. 3(c)). Finalmente, se colocó un manómetro análogo para la revisión de la presión al ingreso de la turbina como lo muestra la Fig. 3(d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. (a) Filtro de suciedades; (b) base fija de la turbina; (c) acople turbina-tubería; (d) manómetro de control.

2.4. Montaje del generador y el sistema de control.

Para el montaje del generador se midió con una luz estroboscópica la velocidad de rotación de la turbina (ver Fig. 4(a)) y de esta manera se pudo calcular la relación de velocidad que el generador debía llevar para mantenerse en la velocidad de giro que dice el manual del fabricante. Con este montaje se observó mediante un banco de pruebas de bombillas cómo se estaba dando dicha generación. De esta manera se implementó un sistema de control que consta de una red de contactores, los cuales actúan como protección ante subidas y caídas de tensión (ver Fig. 4(b)), evitando daños en los equipos que se conecten a la picocentral. Posteriormente, se determinó el plan de funcionamiento basado en la máxima carga eléctrica que se le puede aplicar a la picocentral, conectando componentes uno a uno hasta que la tensión de la picocentral se sale de los parámetros de funcionamiento.



(a)



(b)

Fig. 4. (a) Medición de velocidad de giro utilizando luz estroboscópica; (b) sistema de control.

3. Resultados y discusiones

Los principales resultados del proyecto están relacionados con la operación de la picocentral, el tiempo de recuperación de la inversión, la reducción de costos de facturación del servicio ofrecido por CENS y la contribución de reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

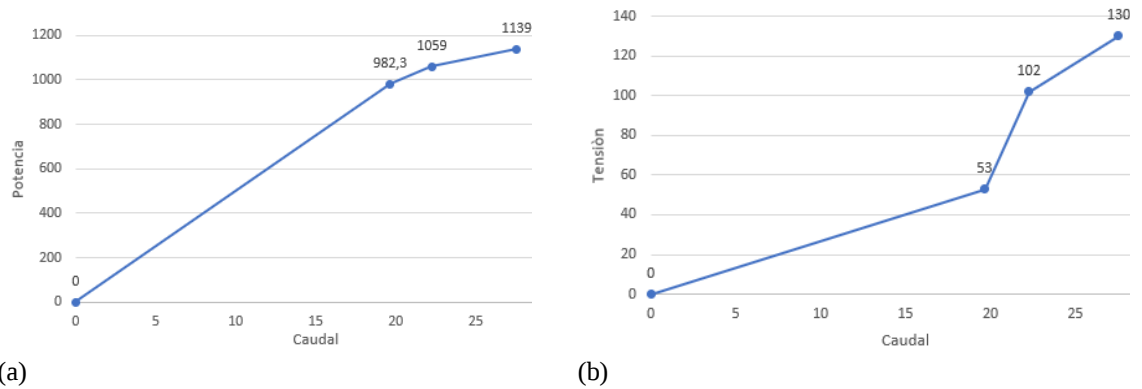
3.1. Implementación de la turbina.

La turbina Banki implementada cuenta con un eje en posición horizontal, con un cuerpo de rotor construido en lámina de acero A-36, y con alabes de rotor curvados, además de alabes debidamente maquinados y pulidos, pintados en Coaltar, según norma CH 70-3, y balanceado según ISO 21940.

El eje del rotor se fabricó en Acero AISI/SAE 1045 y es soportado por 2 rodamientos de simple hilera de bolas. Este cuenta con sus respectivos sellos mecánicos para evitar salidas de agua. La Carcasa de la turbina es una construcción soldada en lámina A 36 debidamente reforzada y rigidizada. El diseño permitirá desmontar el rotor fácilmente, cuando se requieran trabajos de mantenimiento.

3.2. Curvas de potencia.

Se calculó la potencia entregada variando el caudal que pasa por la turbina el cual se ve reflejado en la Gráfica. 1.



Gráfica. 1. (a) Curva de potencia vs caudal. (b) Curva de tensión vs caudal

Cabe resaltar que en la Gráfica 1(a) la medición de la potencia con un rango de caudal bajo puede presentar errores por la abertura de la turbina, debido a que si esta está con poca abertura el agua tiende a devolverse desde la misma entrada de la turbina hasta los respectivos tanques. Así mismo, para la Gráfica 1(b) con los rangos del caudal bajos, se muestra una caída de tensión drástica lo cual representa que dicha generación no se comporta de manera lineal respecto al caudal.

3.3. Potencia eléctrica generada.

La potencia eléctrica generada se calculó a partir de la potencia útil y las respectivas eficiencias de la turbina, transmisión mecánica y generador, conforme la ecuación (1). La eficiencia de la turbina se calculó a partir de la ecuación (2), obteniendo un valor de 0,7434.

$$P_e = \eta_t \eta_m \eta_g P_{\text{útil}} \quad (1)$$

$$\eta_t = 0,771 - 0,384 \frac{D_r}{H_n} \quad (2)$$

donde,

P_e : potencia eléctrica generada.

η_t : eficiencia de la turbina Michell- Banki.

P_{util} : potencia útil.

η_m : eficiencia de la transmisión mecánica, turbina-generator.

η_g : eficiencia del generador.

D_r : diámetro del rotor de la turbina.

H_n : altura neta.

Para el sistema de transmisión de potencia por correas y poleas, se consideró un valor estimado de 95 % de eficiencia [6]. En un generador síncrono no toda la potencia mecánica que le ingresa es convertida en energía eléctrica, esto debido a pérdidas mecánicas, pérdidas en los devanados y pérdidas por excitación lo cuál para principios de funcionamiento constante, el valor de la eficiencia de dichos generadores puede llegar al 95 % [7].

La potencia eléctrica generada es de 764,17 W, este valor satisface aproximadamente un 80 % de la demanda eléctrica de la estación piscícola. Cabe resaltar que dentro del cálculo de este valor no se está considerando las pérdidas que son ocasionadas por la red doméstica de la estación.

3.4. Tiempo de recuperación (Payback)

La inversión inicial fue de \$ 7'750.000 como presentado en la Tabla 1.

Tabla. 1. Información de la inversión.

Ítem	Costo
Turbina	\$4'000.000
Generador	\$2'400.000
Sistema de transmisión	\$350.000
Cableado	\$300.000
Accesorios de tubería	\$200.000
Montaje	\$250.000
Rejillas	\$50.000
Trasporte	\$100.000
Electricista	\$100.000
Total	\$7'750.000

Los ingresos mensuales corresponden al ahorro por el consumo mensual de electricidad que se está autogenerando. Los ingresos son:

$$E_g = P_{eléctrica} \cdot horas$$

$$E_g = 764,17 \text{ W} \cdot 720 \text{ h} = 550,20 \text{ kWh}$$

$$Ahorro consumo = E_g \cdot tarifa$$

$$Ahorro consumo = 550,20 \cdot 390,5386 = \$214.875 \text{ mensual}$$

Con el valor obtenido mediante los cálculos anteriores se puede analizar que la picocentral está ahorrando a la estación piscícola 550,20 kWh al mes, representando \$214.875 pesos ahorrados en su factura de electricidad. El periodo Payback del proyecto es:

$$Payback = 7'750.000 / 205,567 = 36,06 \text{ meses}$$

De este modo, el tiempo de retorno del capital invertido en este proyecto es 36,06 meses, lo que equivale a 3 años aproximadamente.

3.5. Reducción de GEI

La generación de energía eléctrica se ha convertido en todo un reto ambiental, buscando reducir las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en el proceso de generación de electricidad. Debido a esto, se busca que la generación sea a partir de fuentes renovables para mitigar las emisiones de estos gases. De acuerdo a la UPME [8], el factor de emisión del sistema interconectado nacional de Colombia fue de 0.126 tCO₂eq/MWh para el año 2021. El factor de emisión indica un valor medio de las emisiones producidas en la generación de energía eléctrica en un periodo de un año. Para el proyecto desarrollado, la generación anual de electricidad de la picocentral será de 6,6024 MWh, lo que corresponderá a 0,8319 tCO₂eq evitadas al no ser consumida la potencia eléctrica a partir del SIN.

4. Conclusiones

- Este trabajo implementó una picocentral hidroeléctrica a la estación piscícola “la Cascada” para satisfacer parte de su demanda eléctrica. La central consistió en un montaje de una turbina de flujo cruzado Michell Banki conectada a un generador síncrono de 3 kW mediante un sistema de transmisión de potencia por poleas (relación 1:3). Además, se instaló una transferencia automática por contactores para el control del voltaje generado.
- De acuerdo con los resultados e investigaciones obtenidas, con la implementación de PCH's se reducen toneladas de CO₂ equivalentes debido a la generación de energía convencionalmente por cada MWh anualmente.
- Se determinó el tiempo de recuperación de la inversión de este proyecto, el cual requirió una inversión de \$7'750.000 los cuales serán recuperados en aproximadamente 3 años, cabe resaltar que se debe tener en cuenta los mantenimientos que a esta picocentral se le realicen durante este periodo.
- Se estudió el comportamiento de la potencia mediante el *software Engineering Equation Solver*, el cual entregó una serie de datos que fueron graficados para observar dicho comportamiento, concluyendo que cuando la turbina tiene poca abertura puede presentar alteraciones en los cálculos debido a que físicamente retorna el agua.
- Se determinó un plan de operación acorde a la energía producida por la picocentral implementada, suministrando alrededor del 80 % de la energía requerida por la estación piscícola.

5. Agradecimientos

A la Universidad de Pamplona por el préstamo de algunos de sus equipos, a la estación piscícola por abrir las puertas de sus instalaciones y apoyar la implementación de este proyecto y a Colturbinas S.A. por su propuesta y oferta de la turbina a implementar.

Referencias

- [1] J. F. B. González, A. L. Sepúlveda, y K. T. Aponte, «ZONAS NO INTERCONECTADAS ELÉCTRICAMENTE EN COLOMBIA: PROBLEMAS Y PERSPECTIVA», p. 27, 2014.
- [2] S. Tilahun, V. Paramasivam, M. Tufa, A. Kerebih, y S. K. Selvaraj, «Analytical investigation of Pelton turbine for mini hydro power: For the case of selected site in Ethiopia», *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 7364-7368, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.1038.

- [3] S. M. González, L. Cano, y G. López, «Pico Hydroelectric (p CH): an energetic alternative in non-interconnected zones in Colombia», pp. 25-41, 2011.
- [4] A. B. Niño, «MICROTURBINA PELTON, UNA SOLUCION REAL DE ENERGIA PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)», Rev. Colomb. Technol. Av., vol. 1, n.o 31, Art. n.o 31, 2018, doi: 10.24054/16927257.v31.n31.2018.133.
- [5] «Tema 11. Transmisión por correas.pdf».
- [6] T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*, 5th ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2002.
- [7] «Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2021.pdf». Accedido: 26 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2021.pdf
- [8] «Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2021.pdf». Accedido: 26 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2021.pdf

1. INTRODUCCIÓN

La energía es considerada un medio fundamental para el avance de la sociedad. Las zonas no interconectadas de Colombia carecen de energía eléctrica, lo que limita la competitividad en el mercado y el desarrollo de la región. Debido a esto, varias empresas de estas zonas buscan alternativas viables para obtener energía propia, reduciendo costos energéticos, evitando pérdidas y minimizando impactos ambientales.

La generación de energía distribuida es una alternativa para satisfacer la demanda energética de las regiones no interconectadas, por tal razón, en zonas alejadas de la red de distribución se están implementando proyectos de generación aislada de energía eléctrica [1]. En este sentido, el presente trabajo de grado implementó una picocentral hidroeléctrica para suplir demandas eléctricas de las labores cotidianas de la estación piscícola “La Cascada”, aprovechando las instalaciones y el potencial hídrico de la estación.

1.1 Planteamiento del problema

En Colombia, el 52 % del territorio nacional corresponde a zonas no interconectadas que no cuentan con el servicio de energía eléctrica, debido a la geografía accidentada del país, donde la instalación de la infraestructura necesaria para cumplir con la interconexión conlleva un alto costo e impacto ambiental negativo [1]. Es necesario recalcar que en 1938 se declaró como servicio público fundamental el suministro de energía eléctrica y es responsabilidad del estado colombiano “asegurar su prestación eficiente a todos los habitantes del territorio nacional” art. 365 Constitución Política de Colombia [4]. Conjuntamente, el desarrollo tecnológico de la sociedad ha incrementado la demanda energética de la mayoría de sectores industriales y las zonas no interconectadas no están exentas a este desarrollo, el cual se ve entorpecido por la falta de suministro de energía eléctrica [5], [6].

La electrificación es prácticamente improbable en las zonas no interconectadas debido al alto costo de las líneas de transmisión que representan más del 75 % del costo de la electrificación [7]. De esta forma, las zonas no interconectadas no cuentan con un servicio continuo de energía eléctrica de buena calidad y este servicio, donde existe, conlleva altos costos de facturación. En este contexto, se encuentra la estación piscícola “La Cascada”, localizada en el municipio de Mutiscua - Norte de Santander, la cual requiere energía eléctrica de calidad para las diferentes labores y para la operación de algunas máquinas específicas, garantizando los procesos de producción que se llevan a cabo dentro de la misma.

1.2 Justificación

La importancia de la energía en las labores cotidianas de las personas, el futuro agotamiento de los recursos energéticos no renovables y el continuo crecimiento de la industria han impulsado el mejoramiento continuo de las empresas prestadoras

del servicio de energía eléctrica, así como el uso de fuentes alternativas de energía. Así, la generación de energía a partir de fuentes renovables como la energía hidráulica se presenta como una solución viable para la generación de energía en las zonas no interconectadas del país, disminuyendo drásticamente los costos de instalación [7].

En este contexto, Colombia cuenta con 116 pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) en funcionamiento, generando parte de los 868,16 MW totales que se generan en el país, no obstante el tiempo lista 70 pequeñas centrales hidroeléctricas para el 2022 [8], [9] y el número de estas instalaciones continuará aumentando. Paralelamente, mejoras en los materiales y en el diseño de las turbinas, han contribuido a mejorar la eficiencia y aumentar la velocidad de rotación de estos componentes [10], contribuyendo a la solución del problema de suministro de energía eléctrica en zonas no interconectadas del país.

El uso de energías renovables es un tema de interés actual. En el país, las actividades de autogeneración de pequeña escala y de generación distribuida en el sistema interconectado nacional se regulan con la ley 1715 de 2014 que tiene como objetivo promover el uso de energías a partir de fuentes no convencionales, principalmente de carácter renovable [11]. En este sentido, el presente proyecto implementó una picocentral hidroeléctrica que suministra potencia eléctrica para la operación de algunos componentes de la estación piscícola “La Cascada”, aprovechando un flujo hídrico disponible que transcurre por las instalaciones de la misma. La solución contribuirá en la reducción de los costos de la facturación de energía eléctrica ofrecida por la empresa Centrales Eléctricas de Norte de Santander (CENS). El desarrollo metodológico de este proyecto auxiliará la implementación de proyectos similares sobre uso de energías renovables en zonas no interconectadas, contribuyendo de esta forma con el cuidado del medio ambiente [12].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Implementar una picocentral hidroeléctrica en la estación piscícola “la cascada” ubicada en Mutiscua-Norte de Santander.

1.3.2 Objetivos específicos

- Seleccionar la turbina hidráulica considerando la caída y el caudal que transcurre dentro de la estación piscícola, así como las especificaciones técnicas de las turbinas disponibles comercialmente.
- Seleccionar el generador eléctrico de acuerdo a la demanda energética de la estación piscícola y las especificaciones técnicas de los generadores disponibles en el mercado.

- Ejecutar la instalación y puesta en marcha del sistema turbina-generador en las instalaciones de la estación piscícola.
- Definir el plan de operación de la picocentral conforme la demanda energética y evaluar el beneficio económico del plan de operación propuesto.

Este proyecto está compuesto por 9 capítulos planteados de la siguiente manera: (1) Introducción, que describe el planteamiento del problema y los objetivos (2) Revisión bibliográfica. (3) Bases teóricas, se describe el contexto del proyecto. (4) Metodología, se describen todos los pasos e investigaciones realizadas para el montaje de la picocentral (5) Resultados y discusiones. (6) Conclusiones. (7) Recomendaciones y trabajos futuros, se presentan las recomendaciones para el buen funcionamiento de la picocentral y datos para trabajos futuros. (8) Referencias bibliográficas, se presenta las fuentes de información empleadas para la elaboración de la propuesta de investigación. (9) Apéndices, en este apartado se muestran informaciones importantes que no están incluidas dentro del documento.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presentan algunas investigaciones previas relacionadas con la generación hidroeléctrica, desarrolladas en los ámbitos internacional, nacional y regional.

2.1 Antecedentes internacionales

Tilahun et al. [13] en su trabajo diseñaron una turbina para producir una potencia de 32 kW, dispuesta en zonas rurales de Etiopía. Los autores especificaron el proceso de fabricación y seleccionaron los materiales a implementar en dicha turbina. Para seleccionar los materiales adecuados de fabricación de la turbina se listaron los principales materiales a utilizar, con estos se realizaron los respectivos cálculos de potencia y eficiencia y así, poder determinar cuál de ellos era el más adecuado. Los resultados fueron variables debido a la cabeza y caudal máximo de las corrientes de agua, obteniendo la potencia esperada. La turbina diseñada generaría energía para 300 hogares con consumo medio de 100 W cada uno [13].

A sí mismo, Martínez Guillen y Farro Oyola [14] en su investigación dimensionaron una turbina para generar energía en el poblado de San Gerónimo Bajo en Perú. Los autores investigaron para perfeccionar una turbina hidráulica axial para generar energía, eligiendo la turbina a implementar según los parámetros de estudio (ecuaciones y cálculos matemáticos propios de turbo-máquinas) y así, obtuvieron la potencia eléctrica requerida con unos ajustes de los parámetros de caudal y altura neta. Para dimensionar las partes de la turbina seleccionaron el tipo de turbina a implementar y utilizaron un software CAD (SOLIDWORKS) para la realización del diseño. Con todos los datos obtenidos en la investigación dimensionaron la turbina hidráulica y eligieron una turbina tipo hélice y esta a su vez cumplió con la potencia requerida para la generación de energía para el poblado de estudio [14].

De igual manera, Ibáñez Solís Lenin [15] utilizó los datos hidráulicos de un canal para la construcción de una turbina Michell-Banki. El autor eligió el material a utilizar en dicha turbina (plástico por su duración ante el agua), además, realizó un CAD de la turbina para la optimización del material. Posteriormente, construyó la turbina en base al CAD y evaluó la turbina variando los caudales y alturas de caída del agua, calculando porcentajes de error y eficiencias de las mismas, mostrando la curva de potencia de esta turbina respecto a las variaciones de caudal. El autor determinó que al disminuir el caudal la eficiencia de la turbina disminuyó [15].

2.2 Antecedentes nacionales

Monroy G Stella, Cano Carvajal Luis y López Martínez Germán [7] describen un proyecto de investigación para la implementación de una picocentral hidroeléctrica

en zonas no interconectadas de Colombia. Para ello, los autores hicieron un análisis del recurso hídrico disponible; describieron las características de la denominada generación distribuida (GD) y así mismo plantearon una metodología para el estudio del impacto ambiental que una obra de estas genera. Hicieron una revisión bibliográfica sobre la zona, distribución geográfica y recursos hídricos seleccionando las alternativas de generación de energía disponibles en dicha zona. Así mismo, diseñaron detalladamente la propuesta e hicieron un análisis financiero (costo/beneficio) del impacto del proyecto [7].

Del mismo modo, Hincapié Naranjo et al. [16] plantearon el diseño y la construcción de una pico central hidroeléctrica (PCH) que fue elaborada en materiales reciclados (PVC, PET, entre otros). Realizaron pruebas con caudal variable para obtener la eficiencia y generaron energía eléctrica por medio de motores paso a paso reciclados de impresoras. Con lo anterior calcularon los esfuerzos que reciben las aspas y los demás componentes, todo esto, con el objetivo de producir un movimiento circular constante para mover dichos motores y así mismo, producir energía para iluminar con bombillas LED espacios cercanos de la pico central [16].

De igual manera, Agudelo et al. [17] presentaron una metodología para la construcción de un micro generador hidráulico para ciertas condiciones de operación (altura neta y caudal), y a partir de un procedimiento teórico-experimental modelaron los componentes mediante un software de dibujo asistido por computador (CAD), un software de ingeniería asistida por computador (CAE) y un software de simulación de fluido (CFD) para modelar el comportamiento del fluido. Posteriormente, emplearon un software CAM para la fabricación de dichos componentes. Por último, validaron todos los datos y cuantificaron la eficiencia de dicha turbina y el generador, obteniendo los valores de potencia a las cuales puede operar dicha central [17].

2.3 Antecedentes regionales

Niño [18] presenta una solución energética para las zonas no interconectadas en Colombia. El autor expone la implementación de una turbina Pelton aprovechando las pequeñas fuentes de agua para satisfacer la demanda energética de una o algunas viviendas cercanas a dicha fuente. Diseñó y fabricó la turbina, para posteriormente ponerla en marcha con todos los requerimientos y demás componentes necesarios para la generación de energía, con el objetivo de que este sistema sea compacto y se pueda trasladar para ser implementado en varias zonas no interconectadas [18].

De igual manera, Cardozo Sarmiento y Sánchez Mojica [19] realizaron un estudio de la calidad de energía entregada a las escuelas de la vereda de San Miguel en el municipio de Sardinata-Norte de Santander, lo que conlleva a que los estudiantes no aprovechen las herramientas tecnológicas ofrecidas por el ministerio de

educación. Con esta investigación realizaron un estudio de una planta fotovoltaica y los tipos de energía producida. También estudiaron la demanda energética de la escuela, analizando los parámetros geográficos y diseñando los elementos de la instalación con el objetivo de implementar este sistema fotovoltaico y otorgar energía constante y de calidad a la escuela para las labores académicas necesarias en la misma [19].

3. BASES TEÓRICAS

3.1 Generación hidroeléctrica

La energía es un recurso necesario para las actividades diarias de los seres humanos, influyendo significativamente en el desarrollo de una sociedad. Por este motivo, se disponen de diferentes fuentes de generación de energía como la energía hidráulica, también conocida como energía hidroeléctrica, que se basa en el aprovechamiento de la energía potencial y cinética de las corrientes de agua circundantes. Con la invención de la electricidad, este tipo de energía se implementó con más frecuencia, considerándola como una fuente básica para la producción de energía eléctrica, siendo además, una fuente renovable, lo que le da un mayor valor en el ámbito energético [20].

Se dice que una energía es renovable cuando su fuente de generación es obtenida a partir de los recursos naturales existentes con capacidad de renovarse ilimitadamente. El uso de energías renovables genera un impacto ambiental bajo pues no generan contaminantes.

3.1.1 Tipos de centrales hidroeléctricas

- Central de agua fluyente

La central hidroeléctrica de agua fluyente o de pasada consiste en una central que se implementa a las orillas de la fuente disponible, no tiene reserva y por consiguiente su generación varía según las estaciones climáticas. La máxima potencia se obtiene en la época de invierno ya que el caudal aumenta y una potencia mínima en época de sequía pues el caudal disminuye. La Figura 1 presenta una central hidroeléctrica de agua fluyente.

Figura 1. Central de agua fluyente.

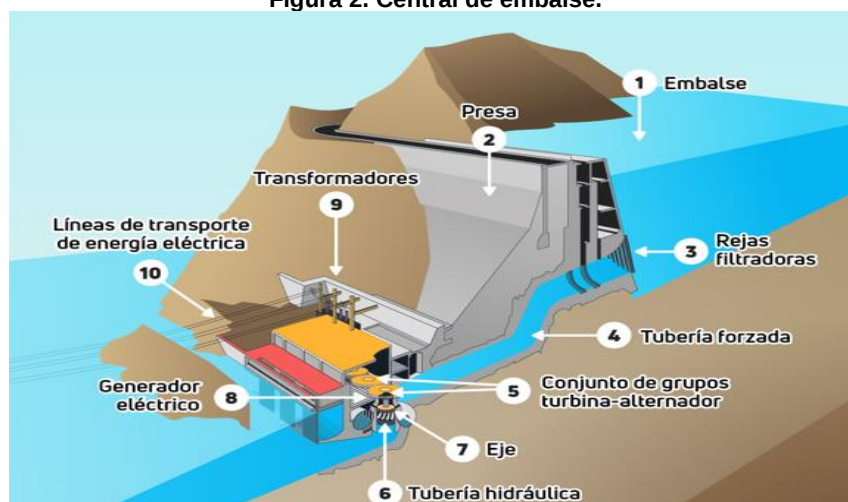


Fuente: <https://crea-portaldemedios.siemens-stiftung.org/central-electrica-de-agua-fluyente-102359>

- Central de embalse o de regulación

La central de embalse consiste en una presa sobre el canal de la fuente hídrica, la cual almacena la mayor cantidad de agua posible (ver Figura 2). La cantidad de agua en la presa es regulada en cantidades específicas necesarias para cualquier temporada del año sin afectar la potencia generada. Cabe resaltar que para este tipo de centrales la inversión es alta en comparación con las centrales que se encuentran a la orilla de la fuente.

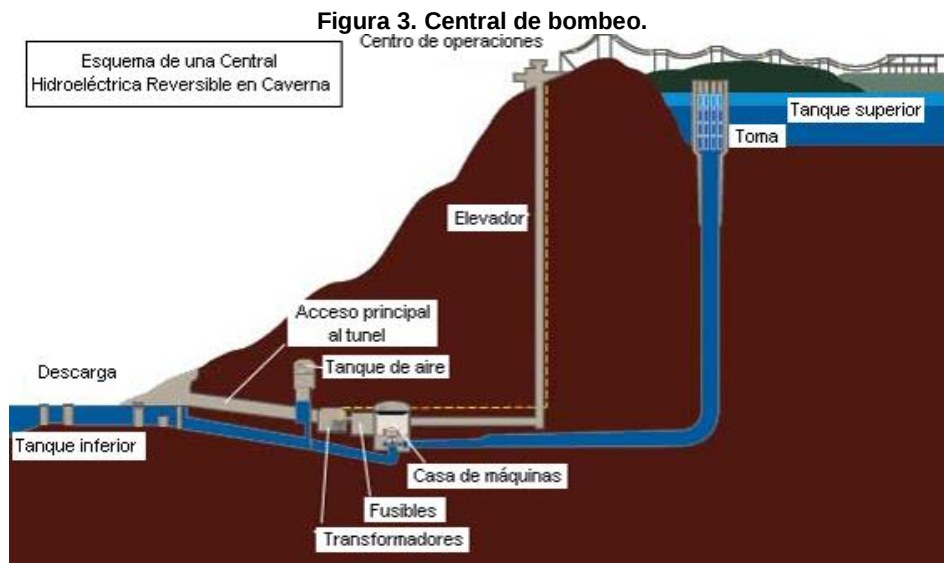
Figura 2. Central de embalse.



Fuente: <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-y-como-funciona-central-hidroelectrica>

- Central de acumulación por bombeo

Esta central consiste en dos presas situadas a diferente nivel, las cuales funcionan como una central de embalse cuando las horas de consumo son altas. Cuando los picos de consumo eléctrico bajan, se bombea el agua nuevamente a la presa superior utilizando motores y bombas o la turbina y el generador son reversibles, en la Figura 3 muestra una representación de una central hidroeléctrica de bombeo.



Fuente: [21]

3.1.2 Clasificación de las centrales según la potencia de generación

Las centrales hidroeléctricas no tienen un criterio único de clasificación ya que este puede variar según el país. La Tabla 1 presenta la clasificación de las centrales hidroeléctricas según la potencia generada de acuerdo a la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) [22].

Tabla 1. Clasificación de las centrales hidroeléctricas según la OLADE.

Tipo de central	Capacidad
Picocentral	0,5 – 5 kW
Microcentral	5 – 50 kW
Minicentral	50 – 500 kW
Hidroeléctricas	500 – 20.000 kW
Centrales hidroeléctricas	Mas de 20 MW

Fuente: [autores]

3.1.3 Componentes de una central hidroeléctrica de agua fluyente

- Canal de derivación

El canal de derivación se utiliza para conducir agua desde el azud (presa de derivación) hasta las turbinas de la central. Generalmente se utiliza una serie de tuberías forzando el flujo de agua hasta que está llegue a las turbinas (ver Figura 4).

Figura 4. Toma de agua de una central fluyente.



Fuente: <https://agronoticias.pe/ultimas-noticias/huaral-inauguran-canal-de-riego-la-esperanza-que-irrigara-mas-de-4-000-hectareas/>

- Conducciones

Son los canales o las principales tuberías implementadas para llevar el agua desde la presa hasta la casa de máquinas para conectarla a la turbina (ver Figura 5).

Figura 5. Conductos de ingreso



Fuente: <https://lorenzocarbonell.com/prueba-de-presion-en-abastecimiento-de-agua/>

- Sala de máquinas

En la sala de máquinas se encuentran los principales componentes de la central (turbina, generadores...) y los demás elementos de control y de regulación de la central.

Figura 6. Sala de máquinas hidroeléctrica

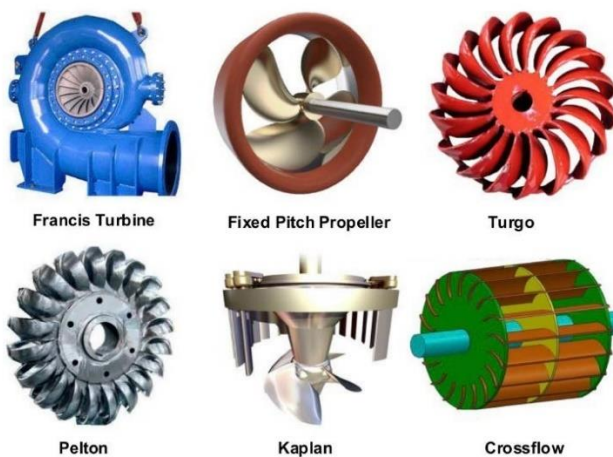


Fuente: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-hidroelectrica>

- Turbina

Es el elemento que transforma la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica para luego ser aprovechada (ver Figura 7).

Figura 7. Turbina hidráulica



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Tipos-principales-de-rodets-de-turbinas-hidraulicas-fuente_fig3_340284354

- Generador alternador

Es un elemento eléctrico que transforma en energía eléctrica la energía mecánica entregada por la turbina (ver Figura 8).

Figura 8. Generador trifásico



Fuente: <https://importadoradubon.com/producto/generador-electrico-de-eje-libre-nova/>

3.2 Turbinas hidráulicas

La turbina hidráulica es un dispositivo capaz de transformar la energía hidráulica en energía mecánica, modificando la energía total del agua que la atraviesa. En el estudio de las turbinas hidráulicas no se consideran los efectos de tipo térmico, aunque a veces se debe recurrir a algunos de estos conceptos para la realización de algunos cálculos [23].

3.2.1 Clasificación de las turbinas

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

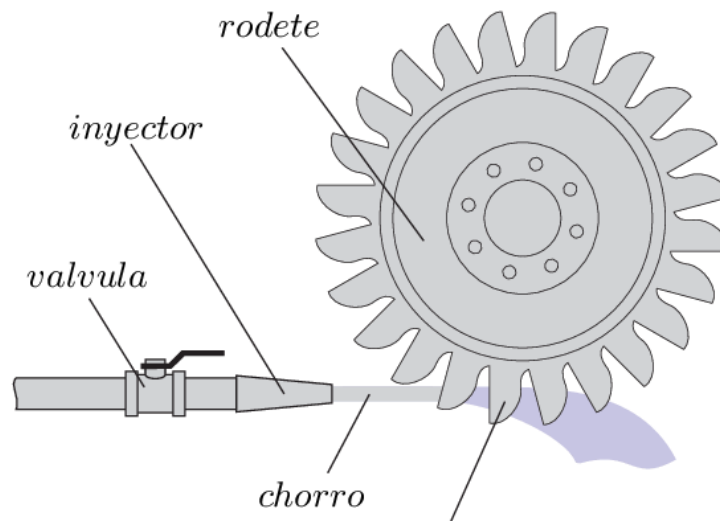
3.2.1.1 Turbinas de acción o impulso

Las turbinas de acción aprovechan la velocidad del agua que choca con el rodete generando un movimiento rotativo que es aprovechado para la generación de energía. En este tipo de turbinas se encuentran las turbinas Pelton, Michell-Banki, entre otras [24].

- Turbina Pelton

La turbina Pelton es una actualización de la rueda hidráulica y su finalidad es transformar la energía cinética del agua en energía mecánica. En la Figura 9 se muestra una representación de una turbina Pelton y sus principales componentes.

Figura 9. Turbina Pelton

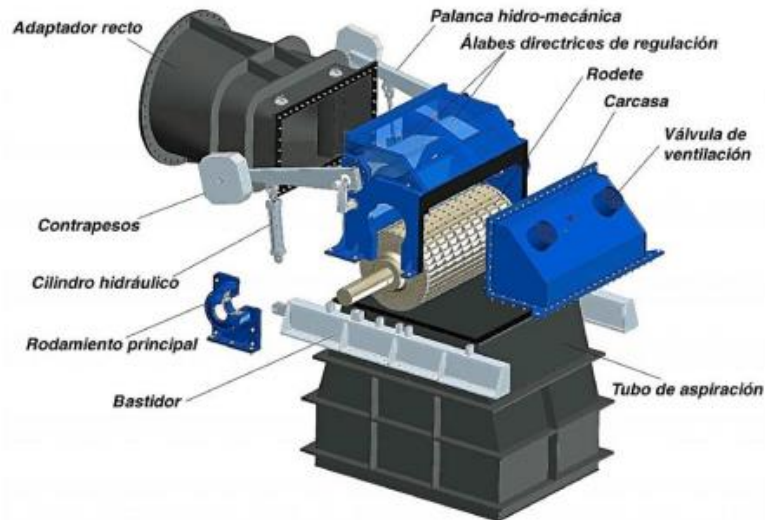


Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Eschema-de-funcionamiento-de-la-turbina-Pelton_fig3_323907454

- Turbina Michell-Banki

La turbina Michell-Banki es una máquina hidráulica utilizada para la generación de energía en pequeños proyectos hidroeléctricos. En esta turbina, el fluido atraviesa los álabes de forma diagonal por lo que también es conocida como turbina de flujo cruzado. Desde su creación ha sido estudiada para mejorar su eficiencia para obtener un máximo aprovechamiento del agua [25]. En la Figura 10 se presenta una turbina Michel-Banki con sus componentes.

Figura 10. Turbina Michel-Banki.



Fuente: <http://www.hnsa.com.co>

3.2.1.2 Turbinas de reacción

En las turbinas de reacción, el giro del rodete no coincide con la dirección del flujo de agua. Estas turbinas utilizan la energía cinética del agua disminuyendo la presión de la misma cuando pasa por la turbina [23]. Las turbinas de reacción más comunes son la turbina Francis y la turbina Kaplan.

- Turbina Francis

La turbina Francis es una turbina de fácil regulación y funciona a un elevado número de revoluciones. Es la turbina más utilizada en la industria hidroeléctrica debido a su fácil mantenimiento y a los diferentes saltos de agua disponibles [23]. En la Figura 11 se presenta una turbina Francis.

Figura 11. Turbina Francis



Fuente: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>

- Turbina Kaplan

Las turbinas Kaplan poseen alabes en el distribuidor, los cuales permiten la regulación del caudal que incide en la turbina. Los álabes cambian la inclinación para mejorar la eficiencia de esta turbina [14]. En la Figura 12 se muestra una turbina Kaplan y algunos de sus componentes.

Figura 12. Turbina Kaplan



Fuente: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>

3.2.2 Parámetros característicos de las turbinas

Para la selección de la turbina se requieren de algunos parámetros que se deben analizar.

3.2.2.1 Caudal

El caudal o flujo volumétrico es el volumen de fluido que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo y puede ser calculado como se muestra en la ecuación (1).

$$Q=V \cdot A \quad (1)$$

donde,

Q : caudal (m^3/s).

V : velocidad media del fluido (m/s).

A : área de la sección transversal por la que transcurre el fluido (m^2).

Para el cálculo de la velocidad media en canales abiertos se utiliza la ecuación de Manning.

La fórmula de Manning es muy utilizada en el campo de la hidráulica y aplicaciones similares debido a su exactitud para el cálculo de la velocidad en canales [26].

$$V=\frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

donde,

V : velocidad media de la sección transversal (m/s).

n : coeficiente de rugosidad de Manning ($\text{s/m}^{1/3}$).

R_h : radio hidráulico (m).

S : pendiente hidráulica (m/m).

El coeficiente de rugosidad de Manning depende del material del canal. En la Tabla 2 se presenta el coeficiente de rugosidad de Manning de algunos materiales.

Tabla 2. Coeficientes de Manning.

Material	n
Hierro fundido	0,015
Acero soldado	0,012
Concreto pobre	0,011 a 0,17
Acero galvanizado	0,011
Concreto comercial	0,013
PVC nuevo	0,007
PVC usado	0,009
Vidrio	0,006 a 0,007

Fuente: Silva [27].

El radio hidráulico es la relación que existe entre el área hidráulica del canal y el perímetro mojado y se calcula como mostrado en la ecuación (3).

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (3)$$

donde,

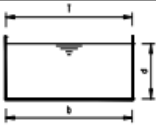
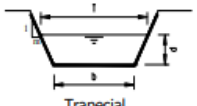
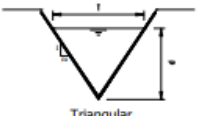
R_h : radio hidráulico (m).

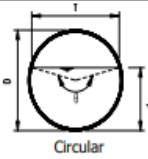
A : área del canal (m^2).

P_m : perímetro mojado (m).

El perímetro mojado es el perímetro de la superficie de la sección transversal por la cual el fluido está en contacto [28]. Según la forma del canal ya se encuentran estandarizados algunos de los canales más frecuentes mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Radio hidráulico y perímetro mojado de algunos canales.

SECCIÓN	ÁREA	PERÍMETRO MOJADO	RADIO HIDRÁULICO	ANCHO SUPERFICIAL	PROFUNDIDAD HIDRÁULICA
 Rectangular	$b \cdot d$	$b + 2d$	$\frac{bd}{b + 2d}$	T	d
 Trapezoidal	$b \cdot d + md^2$	$b + 2d \sqrt{1 + m^2}$ O también : $b + 2d \sqrt{1 + \text{ctg}^2 \theta}$	$\frac{bd + md^2}{b + 2d \sqrt{1 + m^2}}$	$b + 2md$	$\frac{bd + md^2}{b + 2md}$
 Triangular	md^2	$2d \sqrt{1 + m^2}$ O también	$\frac{md}{2 \sqrt{1 + m^2}}$	$2md$	$\frac{d}{2}$

 Circular	$\frac{(\theta - \text{sen } \theta) D^2}{8}$	$\frac{D \theta}{2}$	$\left(1 - \frac{\text{sen } \theta}{\theta}\right) \frac{D}{4}$	$\left(\frac{\text{sen } \theta}{2}\right) D$	$\frac{1}{8} \left(\frac{\theta - \text{sen } \theta}{\text{sen } \frac{\theta}{2}} \right) D$
 Parabólica	$\frac{2}{3} T d$	$T + \frac{8}{3} \frac{d^2}{T}$	$\frac{2 T^2 d}{3 T^2 + 8 d^2}$	$\frac{3}{2} \frac{A}{d}$	$\frac{2}{3} d$

Fuente: [28]

La pendiente hidráulica es la diferencia de elevación de la superficie libre por unidad de longitud medida horizontalmente en dirección del flujo [28]. La pendiente hidráulica se calcula conforme la ecuación (4).

$$S = \frac{\Delta h}{L} \quad (4)$$

donde,

S: pendiente hidráulica (m/m).

Δh : diferencia de alturas entre dos puntos del canal (m).

L: longitud entre los dos puntos medidos del canal (m).

3.2.2.2 Velocidad específica

La velocidad específica, también llamada número específico de revoluciones, es un parámetro que involucra variables de diseño características de cada turbina y presenta el mismo valor para turbinas geoméricamente iguales y con condiciones hidráulicas similares [29].

La ecuación (5) permite calcular la velocidad específica en el sistema internacional.

$$N_s = N (P_t)^{0.5} (H_d)^{-1.25} \quad (5)$$

donde,

N_s : velocidad específica [rpm] [kW^{0.5}] [m^{-1.25}]

N: rotación [rpm]

P_t : potencia de diseño de la turbina [kW]

H_d : carga de diseño de la turbina [m]

No obstante, se recomienda consultar la información de cada turbina según los datos ofrecidos por cada fabricante ya que estos parámetros varían.

3.2.2.3 Potencia hidráulica útil

La potencia hidráulica útil corresponde a la tasa de trabajo mecánico que puede ser extraído de fluido. Esta potencia es función del flujo volumétrico y la presión del fluido, como se muestra en la ecuación (6) [29], [30].

$$P_{util} = \rho g H_n Q \quad (6)$$

donde,

P_{util} : potencia hidráulica disponible del fluido (W).

ρ : densidad del fluido (kg/m³).

g : gravedad (m/s²).

H_n : altura neta (m).

Q : caudal (m³/s).

3.2.2.4 Cabeza neta

La cabeza o altura neta es la diferencia entre la altura bruta y la cabeza de las pérdidas de presión. La altura bruta es la distancia entre el punto de embalse o toma de agua y el punto donde se encuentra ubicada la turbina.

La cabeza de las pérdidas de presión corresponde a las pérdidas de carga a través de la tubería y accesorios.

- Ecuación de energía.

La ecuación general de la energía es un enunciado del principio de conservación de la energía. En mecánica de fluidos se separa la energía mecánica de la energía térmica ya que la energía mecánica por efectos de fricción puede llegar a convertirse en energía térmica, por consiguiente esta ecuación se convierte en un balance de energía mecánica, expresado en todos los componentes mecánicos que existan en dicho balance [31].

La ecuación de energía para un flujo unidimensional, incompresible y estacionario en términos de cargas se puede expresar como:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{bomb} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turb} + h_L \quad (7)$$

donde,

P_1 : presión a la entrada de la tubería (N/m²).
 P_2 : presión a la salida de la tubería (N/m²).
 α_1 : factor de corrección de energía cinética a la entrada (en flujo turbulento es 1).
 α_2 : factor de corrección de energía cinética a la salida (en flujo turbulento es 1).
 V_1 : velocidad del fluido a la entrada de la tubería (m/s).
 V_2 : velocidad del fluido a la salida de la tubería (m/s).
 z_1 : altura neta del punto de ingreso de la tubería (m).
 h_{bomb} : carga de bomba útil hacia el fluido (m).
 h_{turb} : carga de turbina extraída del fluido (m).
 h_L : pérdidas de carga irreversible en el sistema (tuberías y accesorios) (m).

- Caída de presión y pérdida de carga

La caída de presión es una variable considerable en el análisis de tuberías, ya que esta reduce la potencia hidráulica disponible en el fluido. La caída de presión es directamente proporcional a los efectos viscosos y se puede expresar como:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{prom}^2}{2} \quad (8)$$

donde,

ΔP_L : pérdida de presión (N/m²).
 f : Coeficiente de pérdidas por fricción.
 L : longitud de la tubería (m).
 D : diámetro interno de la tubería (m).
 V_{prom} : velocidad promedio del fluido (m/s).

La pérdida de carga de la tubería es la altura de fluido que corresponde a la pérdida de presión [32], y se expresa de la siguiente manera:

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g} \quad (9)$$

El factor de fricción depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Este factor es determinado a través del Diagrama de Moody o de correlaciones específicas reportadas en la literatura técnica [33].

- **Número de Reynolds**

El régimen del flujo en una tubería depende principalmente de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el fluido. El tipo de régimen de los flujos es determinado

por el número de Reynolds y define si el flujo es laminar o turbulento. El número de Reynolds está definido por la ecuación (10).

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu} = \frac{V_{prom} D}{\nu} \quad (10)$$

donde,

ν : viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

μ : viscosidad dinámica del fluido ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$).

En los flujos internos el régimen del flujo se clasifica así:

$Re \leq 2300$	Flujo laminar
$2300 \leq Re \leq 4000$	Flujo transición
$Re \geq 4000$	Flujo turbulento

- **Rugosidad relativa**

La rugosidad relativa es la relación que existe entre la rugosidad del material y el diámetro interno de la tubería [32].

$$\text{rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D} \quad (11)$$

donde,

ε : rugosidad del material

D : diámetro interno de la tubería

En la Tabla 4 se muestran las rugosidades equivalentes para tuberías comerciales nuevas.

Tabla 4. Rugosidades para tuberías comerciales nuevas

Material	Rugosidad ϵ	
	ft	mm
Vidrio, plástico	0 (liso)	
Concreto	0,003-0,03	0,9-9
Duela de madera	0,001600	0,5000
Hule, alisado	0,000033	0,0100
Tubería de cobre o latón	0,000005	0,0015
Hierro fundido	0,000850	0,2600
Hierro galvanizado	0,000500	0,1500
Hierro forjado	0,000150	0,0460
Acero inoxidable	0,000007	0,0020
Acero comercial	0,000150	0,0450

Fuente: [31]

- Pérdidas menores

Las pérdidas menores son las pérdidas que ocurren con el paso del fluido a través de los accesorios, los cuales que no permiten el suave flujo del fluido provocando pérdidas. Los fabricantes de dichos accesorios calculan las pérdidas menores de manera experimental y estas se expresan en términos del coeficiente de resistencia o coeficiente de pérdida [32]. Estas pérdidas se expresan de la siguiente manera:

$$h_m = K \frac{V_{prom}^2}{2g} \quad (12)$$

donde,

h_m : pérdidas menores (m).

K : coeficiente de pérdida del accesorio.

3.2.2.5 Eficiencia de la turbina

La eficiencia se define como la salida de potencia real sobre la potencia extraída del agua que pasa por la turbina [31]. La eficiencia global de una turbina está dada de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{real}}{P_{hidraulica}} \quad (13)$$

donde,

η : eficiencia de la turbina

P_{real} : potencia real de salida

$P_{hidráulica}$: potencia hidráulica neta

Para cada turbina ya se encuentra estandarizada la eficiencia (η_t) en función de la altura neta (H_n) y del diámetro del rotor (D_r), expresadas de la siguiente manera.

- Eficiencia de la turbina Banki [25]:

$$\eta_t = 0,771 - 0,384 \frac{D_r}{H_n} \quad (14)$$

- Eficiencia de una turbina Pelton, Francis y Kaplan

Para el cálculo de la eficiencia en estas turbinas se emplea un análisis por método gráfico. Cada turbina tiene su respectiva grafica dependiendo de la potencia nominal [34], estas gráficas se presentan en el ANEXO 2.

3.2.2.6 Potencia eléctrica generada

La potencia eléctrica generada es la potencia real producida y entregada al sistema eléctrico conectado. La potencia eléctrica se calcula como mostrado en la ecuación (15).

$$P_e = \eta_t \eta_m \eta_g P_{útil} \quad (15)$$

donde,

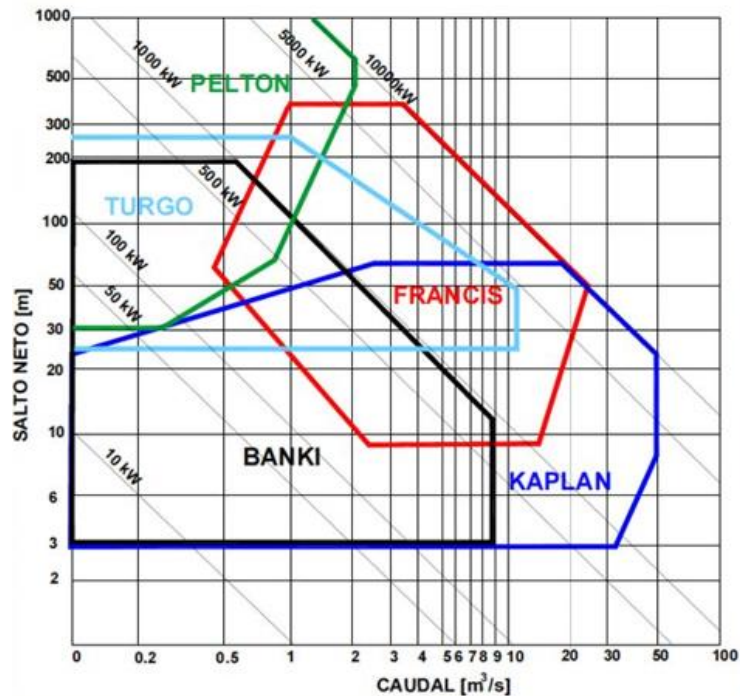
η_m : eficiencia de la transmisión mecánica, turbina-generador.

η_g : eficiencia del generador.

3.2.3 Selección de una turbina hidráulica

La turbina hidráulica puede ser seleccionada para una determinada aplicación considerando parámetros como el caudal y la altura neta. La Figura 13 presenta un diagrama con la aplicabilidad de los diferentes tipos de turbinas para intervalos específicos de altura neta y caudal.

Figura 13. Abaco de selección de turbinas.



Fuente: <http://www.savoiapower.com/hydrotabla.html>.

4. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe la metodología abordada en el desarrollo del proyecto. El desarrollo completo comprendió la caracterización inicial, selección y montaje de equipos, puesta en operación y análisis finales.

4.1 Caracterización inicial

En el inicio del desarrollo de este proyecto se realizaron unas visitas previas a la estación piscícola para conocer el funcionamiento diario y realizar las mediciones respectivas que permitieron la caracterización inicial del potencial hidráulico y la demanda eléctrica de la estación.

4.1.1 Descripción de la estación piscícola

La estación piscícola “La Cascada” inicia su operación en el año 2014 como una empresa familiar ubicada en Mutiscua-Norte de Santander. Se consolidó como empresa legal en el año 2018, recibiendo su matrícula mercantil otorgada por la cámara de comercio de la ciudad de Pamplona.

Actualmente, la estación piscícola “La Cascada” procesa aproximadamente de 5 a 6 toneladas de trucha arcoíris en el mes. Cuenta con un área de 750 m², los cuales se distribuyen en la zona de embalse, zona de ovas, zona de alevines, zona de engorde, zona de sacrificio y zona de embalaje. Además, esta línea de producción cuenta con 11 etapas generales que necesitan un suministro de energía para la iluminación.

Cabe destacar que en la etapa de “sacrificio” y la etapa de “empaquete y sellado al vacío” se requiere que la energía sea de alta calidad para el correcto funcionamiento de las máquinas que se emplean.

Descripción de las etapas.

- ✓ *Siembra de ovas:* en esta etapa ingresan a la estación 50000 huevos de trucha fértiles los cuales son adquiridos de empresa “Truchas Suralá”, estación piscícola que se dedica a la producción de ovas. Este proceso inicia con la climatización de las ovas, sumergiendo la caja en los tanques de germinación por un máximo de 2 horas, para luego proceder al vaciado de los huevos en el tanque de germinación.
- ✓ *Selección de alevines:* en esta etapa se procede al conteo y a la selección de los alevines. Dependiendo del tamaño se clasifican a otros tanques.
- ✓ *Clasificación de la trucha:* en esta etapa se realiza la separación de la trucha por peso aproximado, separándolas en dos rangos: 1) 3 truchas que pesen aproximadamente 1 kilogramo; 2) 4 truchas que pesen aproximadamente 1

kilogramo. Para que esta etapa se lleve a cabo debe transcurrir un tiempo aproximado de 12 meses.

- ✓ *Sacrificio de la trucha:* en esta etapa un operario sacrifica la cantidad de truchas que se hallan pedido, estas truchas se introducen en un tanque para que se desangren.
- ✓ *Extracción de intestinos:* en esta etapa se procede a realizar un corte longitudinal desde la cloaca hasta las agallas para posteriormente poder abrir la trucha y extraer los intestinos.
- ✓ *Lavado:* en esta etapa otro trabajador hace el correcto lavado de la trucha eliminando restos de agallas y sangre.
- ✓ *Deshuesado:* en esta etapa un operario experto procede a realizar la extracción del hueso y las espinas de la trucha, realizando un corte denominado como “corte mariposa”.
- ✓ *Lavado:* en esta etapa el operario realiza otro lavado para eliminar la suciedad que dejó la etapa de deshuesado.
- ✓ *Secado:* esta etapa es la más importante ya que debe realizarse un secado exhaustivo y correcto para garantizar la conservación de acuerdo a la fecha de vencimiento de la trucha.
- ✓ *Empacado y sellado al vacío:* en esta etapa se empaca la trucha por unidad en una bolsa de polietileno y esta se lleva a una máquina manual en la cual otro operario procede al sellado de la bolsa y a etiquetar la fecha de vencimiento.
- ✓ *Distribución a los clientes:* en esta etapa del proceso se empaca en cajas de cartón con un peso de 35 kilogramos y es llevada en un vehículo que posee un sistema de refrigeración hasta las ciudades de la provincia.

4.1.2 Potencial hidráulico

En la estación piscícola ingresa un caudal de 350 litros por segundo aproximadamente, los cuales se pueden variar dependiendo de la necesidad. La fuente hídrica utilizada es tomada del caudal del río La Plata que circula alrededor de la estación. Para utilizar el agua del río, la estación piscícola “La Cascada” cuenta con las especificaciones y permisos otorgados por la corporación autónoma de la frontera nororiental (CORPONOR), que vela por el uso eficiente de los recursos naturales y su protección.

El potencial hidráulico para la implementación de la picocentral fue evaluado en tres puntos diferentes. Los puntos 1 y 2 corresponden a corrientes de agua ya disponibles en la estación. El punto 3 es un montaje nuevo propuesto. En cada punto se realizaron las respectivas mediciones de altura bruta, longitud total de tubería y demás variables según cada caso. Además, se verificaron los tipos de accesorios, diámetros y tipo de material. Las variables medidas permitieron los cálculos de caudal y potencia útil.

La altura bruta se midió utilizando una manguera de nivel entre los dos puntos, haciendo mediciones intermedias para verificar la medición inicial.

La medición del caudal en tuberías se realizó registrando el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido. La medición de la velocidad media del flujo, utilizada en el punto 2, se realizó midiendo el tiempo en que un objeto dentro del fluido transcurría una distancia conocida.

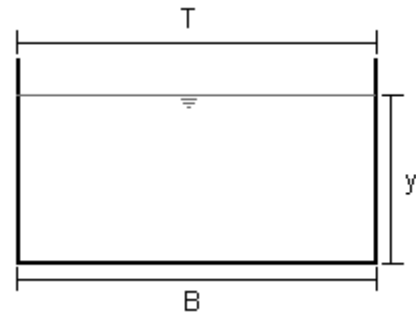
A continuación, se presentan los datos y cálculos del potencial hidráulico en cada uno de los tres puntos analizados.

- a. Punto 1, canal abierto. En la Figura 14 se muestra el canal abierto evaluado como una opción para la implementación de la picocentral.

Figura 14. a. Canal abierto estación piscícola “La Cascada”. b. Sección transversal del canal.



a.



b.

Fuente: autores.

Los datos considerados son presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos del canal e información de interés.

Temperatura del agua (T)	15 [°C]
Densidad (ρ)	1000 [kg/m ³]
Gravedad (g)	9,81 [m/s ²]
Viscosidad cinemática (μ)	0,001236 [N s/m ²]
Altura del canal (h)	1,50 [m]
Rugosidad concreto comercial (n)	0,013 [s/m ^{1/3}]
Caída neta (Δh)	0,18 [m]
Longitud del canal (L)	2,9 [m]
Base del canal (b)	0,65 [m]
Profundidad del agua del canal (d)	0,08 [m]

Fuente: Autores.

Cálculo del caudal:

$$V = \frac{1}{n} R h^{2/3} S^{1/2}$$

$$R h = \frac{A}{P m}$$

$$A = b \cdot d = 0,65 \cdot 0,08 = 0,052 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$P m = b + 2d = 0,65 + 2 \cdot 0,08 = 0,81 \text{ [m]}$$

$$R h = \frac{A}{P m} = \frac{0,052}{0,81} = 0,0641 \text{ [m]}$$

$$S = \frac{\Delta h}{L} = \frac{0,18}{2,9} = 0,0621 \text{ [m/m]}$$

$$V = \frac{1}{n} R h^{2/3} S^{1/2} = \frac{1}{0,013} \cdot (0,0641)^{2/3} \cdot (0,0621)^{1/2} = 3,071 \text{ [m/s]}$$

$$Q = V \cdot A = 3,071 \cdot 0,052 = 0,1596 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Cálculo de la potencia útil:

$$Re = \frac{\rho V_{prom} R h}{\mu} = \frac{999,58 \cdot 3,071 \cdot 0,0641}{0,001236} = 159197,75$$

El factor de fricción se determinó con la correlación de Blasius.

$$f = \frac{0,3164}{Re^{1/4}} = \frac{0,3164}{(159197,75)^{1/4}} = 0,0158$$

$$h_l = f \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} = 0,0158 * \frac{7,40}{0,65} * \frac{3,071^2}{2 * 9,81} = 0,086 \text{ [m]}$$

A partir de la ecuación general de la energía, ecuación (7), considerando $P_1 = P_2 = 0$, $V_1 = V_2 = 0$, $z_2 = 0$, $h_{bomb} = 0$, se tiene:

$$1,50 = h_{turb} + h_L$$

$$h_L = h_l + h_m = 0,086 + 0 = 0,086 \text{ [m]}$$

$$h_{turb} = 1,50 - h_L = 1,50 - 0,086 = 1,414 \text{ [m]}$$

$$P_{\text{útil}} = \rho g H_n Q$$

$$P_{\text{útil}} = 999,58 * 9,81 * 0,1596 * 1,414 = \mathbf{2212,94 \text{ [W]}}$$

- b. Punto 2, tubería de ingreso en la estación piscícola. La Figura 15 muestra una de las 3 tuberías de ingreso a la estación piscícola, dicha tubería es de PVC de 4" y se descarga directamente sobre una sección de la estación para oxigenar los tanques de los peces.

Figura 15. Tubería de ingreso.



Fuente: autores

Tabla 6. Datos de interés tubería del punto 2

Temperatura del agua (T)	15 [°C]
Longitud (L)	43 [m]
Diámetro interno (d_i)	0,105 [m]
Altura neta (h)	5 [m]
Tiempo promedio del cálculo de velocidad (t)	12,55 [s]
Coefficiente de pérdida, semicodo 45°	0,4

Fuente: Autores.

Cálculo del caudal:

$$V = d/t$$

$$V = \frac{43}{12,55} = 3,43 \text{ [m/s]}$$

$$A = \frac{\pi}{4} d_i^2 = \frac{\pi}{4} (0,1015)^2 = 8,091 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\dot{Q} = v A = 3,43 (8,091 \cdot 10^{-3}) = 0,028 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Cálculo de la potencia útil:

$$Re = \frac{\rho V d_i}{\mu} = \frac{999,58(3,43)(0,1015)}{0,001236} = 281552,41$$

El factor de fricción se determinó con la correlación de Blasius.

$$f = \frac{0,3164}{Re^{\frac{1}{4}}} = \frac{0,3164}{(281552,41)^{\frac{1}{4}}} = 0,01373$$

$$h_l = f \frac{L}{d_i} \frac{v^2}{2g} = 0,01373 * \frac{43}{0,1015} * \frac{(3,43)^2}{2 * 9,81} = 3,48 \text{ [m]}$$

A partir de la ecuación general de la energía, ecuación (7), considerando $P_1 = P_2 = 0$, $V_1 = V_2 = 0$, $z_2 = 0$, $h_{bomb} = 0$, se tiene:

$$h_{turb} = z_1 - h_l - h_m$$

$$h_{turb} = 5 - 3,48 - 0,24 = 1,28 \text{ [m]}$$

$$P_{\text{útil}} = \rho g Q h_{turb}$$

$$P_{\text{útil}} = 999,58 * 9,81 * 0,028 * 1,28 = \mathbf{351,44 \text{ [W]}}$$

- c. Punto 3, tubería de ingreso con línea lateral adicional. Este montaje nuevo fue propuesto y realizado para evaluar otra alternativa que presentara mayor potencia útil. El montaje consiste en un sistema de tuberías en paralelo donde a la tubería de ingreso a la estación evaluada en el punto 2 se le conectó una tubería desde un tanque próximo para aumentar el caudal del sistema.

Figura 16. Montaje nuevo.



Fuente: Autores.

Tabla 7. Datos de la tubería del montaje nuevo

Temperatura del agua (T)	15 [°C]
Densidad (ρ)	1000 [kg/m ³]
Gravedad (g)	9,81 [m/s ²]
Viscosidad cinemática (μ)	0,001236 [N s/m ²]
Altura de la tubería 1 (h_1)	5,9 [m]
Altura tubería 2 (h_2)	6,67 [m]
Longitud de la tubería 1 (L_1)	25 [m]
Longitud tubería 2 (L_2)	4,40 [m]
Longitud tubería 3 (L_3)	11 [m]
Diámetro interno de la tubería (d_i)	0,1015 [m]
Coeficiente de pérdida, 2 codos 90°	0,3
Coeficiente de pérdida, 2 semicodo 45°	0,4
Coeficiente de pérdida, 1 accesorio en forma T	0,2

Fuente: Autores

Medición de caudal:

Para la medición del caudal de la tubería del montaje propuesto, se realizaron tres mediciones del tiempo necesario para llenar el recipiente de 200 litros mostrado en la Figura 17. Se obtuvieron los siguientes resultados:

$$t_1 = 4,15 \text{ [s]}$$

$$t_2 = 4,35 \text{ [s]}$$

$$t_3 = 4,262 \text{ [s]}$$

$$t_{prom} = 4,254 \text{ [s]}$$

$$Q = \frac{200 \text{ [L]}}{4,254 \text{ [s]}} = 47,01 \left[\frac{\text{L}}{\text{s}} \right] = 0,04701 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Figura 17. Medición del caudal mediante el llenado de un recipiente.



Fuente: autores

La Figura 18 muestra la diferencia de altura entre la toma de agua y la turbina. El cálculo de la altura neta se realizó resolviendo el sistema de tuberías en paralelo mostrado en la Figura 16. La solución del sistema se desarrolló en el programa *Engineering Equation Solver* (EES), donde fueron escritas las ecuaciones de energía para cada línea del sistema en paralelo, junto con el factor de fricción, la pérdida de carga, el caudal y potencia útil. La secuencia del procedimiento de solución está presentada en el Apéndice 1. Entre los resultados se destaca la altura neta de 1,95 m y potencia útil de 1139 W. Además, el cálculo desarrollado permitió conferir la medida realizada del caudal, obteniendo un valor 0,05006 m³/s, el cual es próximo del valor medido.

Figura 18. Diferencia de alturas entre el embalse y la turbina.



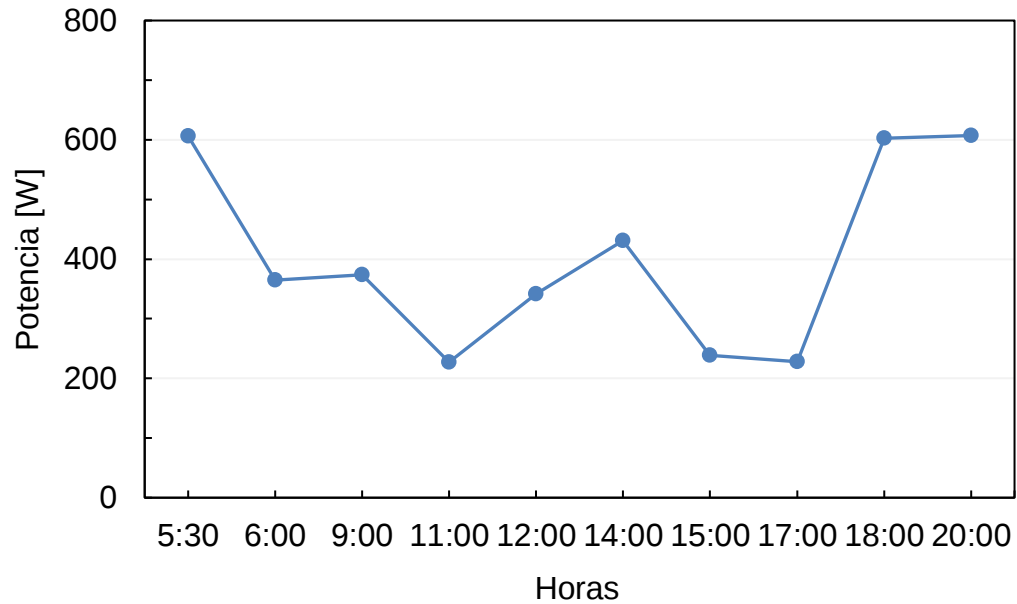
Fuente: autores.

4.1.3 Demanda eléctrica

La demanda eléctrica de la estación piscícola fue caracterizada mediante el uso de una pinza voltiamperimétrica, con la cual se midió la tensión y corriente que emplea la estación. Estas mediciones se realizaron por un periodo de 30 días y con estas mediciones se obtuvo una estimativa de la potencia eléctrica requerida por la estación para realizar sus labores diarias. Se observó que la estación presenta días de demanda baja y días de demanda alta.

- **Días de demanda baja:** según los datos obtenidos, en los días lunes, jueves, viernes, sábado y domingo, se presenta una demanda baja de energía eléctrica debido a que en estos días no se realiza ningún proceso en la estación piscícola, usándose solo la energía eléctrica requerida en las labores caseras. En la Figura 19 se presenta el perfil medio de la demanda eléctrica en un día de demanda baja. Este perfil medio fue obtenido a partir de las mediciones realizadas durante el periodo de 30 días.

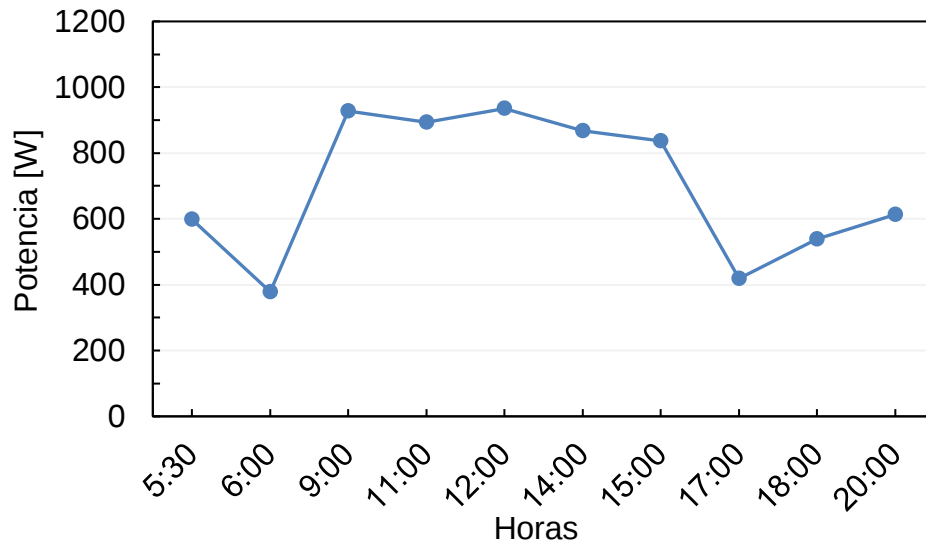
Figura 19. Perfil medio de la demanda eléctrica de un día de demanda baja.



Fuente: autores

Días de demanda alta: en los días martes y miércoles, en la estación piscícola se realiza el proceso de sacrificio en el cual se emplea maquinaria adicional (selladoras, enfriador, entre otras), aumentando así el consumo de energía eléctrica. En la Figura 20 se muestra el perfil medio de la demanda de energía eléctrica en la estación piscícola en los días de demanda alta.

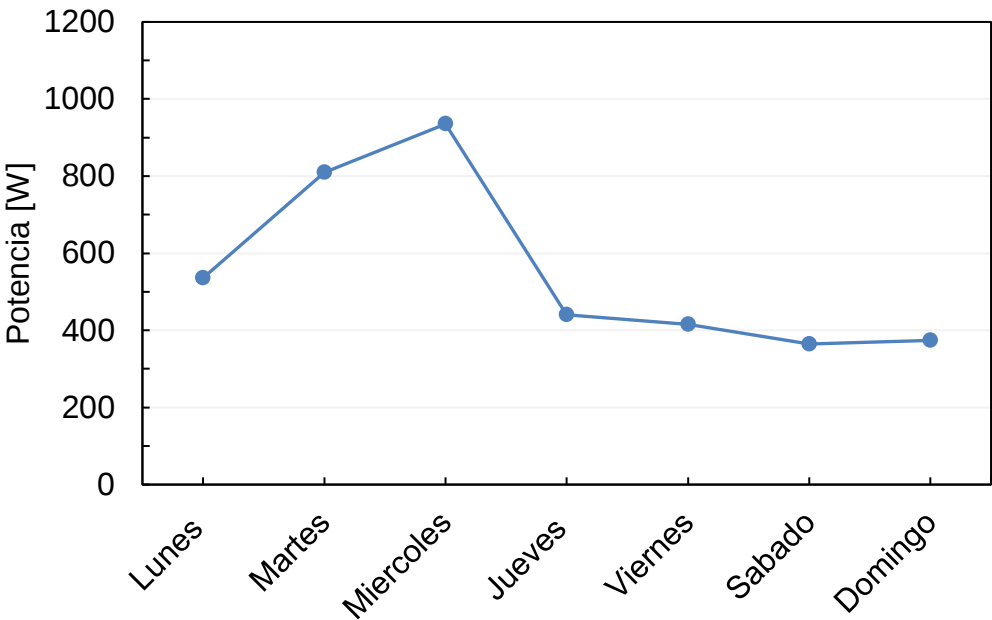
Figura 20. Perfil medio de la demanda eléctrica de un día de demanda alta.



Fuente: autores

Se identificó que el horario de mayor demanda es al mediodía, por lo que se realizaron mediciones de potencia en la estación piscícola durante 1 semana a las 12:00 pm, las cuales se pueden observar en la Figura 21.

Figura 21. Demanda eléctrica a las 12:00 pm de todos los días de una semana.



Fuente: autores

En la Tabla 8 se presenta la demanda eléctrica máxima encontrada a partir de las mediciones y su respectivo consumo.

Tabla 8: Demanda y consumo eléctrico máximo de la estación piscícola.

Unidad consumidora	Demanda eléctrica [W]	Uso semanal [h]	Consumo semanal [kWh]	Consumo mensual [kWh]
Estación piscícola	935,04	168	157,1	628,3

Fuente: autores

4.2 Selección de la turbina

Para la selección de una turbina usualmente se considera la cabeza neta y el caudal disponible, no obstante, para la selección de la turbina a implementar en la estación piscícola “La Cascada”, también se consideraron los aspectos adicionales dispuestos por el propietario de la estación piscícola, relacionados con la disposición y espacio en la estación y el costo de la turbina en el mercado nacional.

4.2.1 Disposición

En concordancia con el propietario de la estación piscícola, se eligió el punto 3 analizado (sistema de tuberías en paralelo) para implementar el sistema hidráulico de la picocentral. Este punto fue seleccionado ya que cuenta con el espacio disponible para facilitar el montaje, no requiere cambios drásticos en la estación y no afecta ningún proceso en la misma. La Figura 22 muestra el espacio disponible en el punto de llegada de la tubería donde se realizó el montaje de la turbina.

Figura 22. Espacio disponible para el montaje de la turbina.



Fuente: autores

La determinación del punto de montaje de la turbina permitió seleccionar el tipo de turbina adecuado. Con base en la cabeza neta y el caudal disponible determinados, la turbina seleccionada fue una turbina tipo Michell-Banki.

4.2.2 Mercado

Se realizó el arduo proceso de búsqueda de esta turbina en el mercado nacional, encontrando algunas empresas y personas que se dedican al diseño y/o construcción de turbinas hidráulicas. A continuación, se describen algunas empresas consultadas.

- Multiservicios MC Ingeniería. Empresa de Medellín dedicada al mantenimiento de centrales hidroeléctricas y a la fabricación de las mismas, ampliándose a la industria hidroeléctrica en general. La cotización ofrecida por esta empresa fue vía telefónica con las siguientes especificaciones:

Turbina Banki + generador monofásico + sistema de control = \$19.000.000

- Colturbinas S.A. Empresa consolidada en la ciudad de Barranquilla dedicada al diseño, planeación y ejecución de proyectos de ingeniería encaminados a la generación de energías renovables. En el campo de energía hidroeléctrica sólo se han dedicado al diseño y fabricación de turbina Pelton y Banki. La cotización ofrecida por esta empresa fue:

Turbina Banki + generador + gobernador + tablero de control = \$15.000.000

De igual manera, se solicitó a Colturbinas una cotización de únicamente el valor de la turbina, la cual fue de un valor de \$4.000.000 IVA incluido. Las cotizaciones ofrecidas por esta empresa se encuentran en el ANEXO 1.

- Aprotec. Empresa de la ciudad de Cali que desarrolla proyectos para el aprovechamiento de las energías renovables, desarrollan actividades de estudio, diseño, simulación y dirección de proyectos encaminados con la generación de energía. La oferta ofrecida por esta empresa se basó en una turbina Pelton, la cual no cumplía los requisitos del proyecto.

Con las cotizaciones disponibles, se realizó una reunión con el propietario de la estación piscícola y se decidió por adquirir la turbina de la empresa Colturbinas S.A. y buscar en el mercado nacional los demás componentes como el generador, gobernador y tablero de control. Estos componentes ofrecidos por Colturbinas S.A. eran importados y el incremento del precio del dólar influyó en el valor de la cotización.

En la Figura 23 se muestra la turbina Banki fabricada por la empresa Colturbinas S.A. con base en la potencia útil disponible de 1 kW, aproximadamente.

Figura 23 a. Turbina Banki Colturbinas S.A. b. Despiece turbina Banki.



a.



b.

Fuente: Colturbinas S.A

4.3 Selección del generador

A partir de las especificaciones de los componentes eléctricos, presentadas en la cotización de Colturbinas S.A., se buscó en el mercado nacional un generador con para satisfacer la demanda eléctrica. Se visitó la mayor parte de empresas de maquinaria agrícola y maquinaria eléctrica de la ciudad de Bucaramanga, obteniendo las siguientes cotizaciones:

- Ferton S.A.S
Generador Síncrono monofásico autoexcitante por escobillas de 7,5 kW a 1800 rpm, \$4.300.000 IVA incluido.
- Servicios industriales de Santander
Generador síncrono trifásico de escobillas, 5 kW a 3600 rpm, \$5.500.000 IVA incluido.
- Maqui ferretería Jiménez S.A.S
Generador síncrono monofásico de 5 kW a 1800 rpm, \$3.400.000 IVA incluido.
- Agroequipos Santander
Generador Síncrono monofásico ST3 de 3 kW a 1800 rpm, \$2.400.000 IVA incluido.

Se eligió realizar la compra en Agroequipos Santander ya que el generador ofrecido es el más cercano a la potencia eléctrica que se puede producir en la estación piscícola. Además de su menor precio, en el mercado nacional no se encontró uno con menor producción de energía. La Figura 24 presenta el generador síncrono monofásico de 3 kW adquirido.

Figura 24.. Generador ST3 series de 3 kW.



Fuente: autores

4.4 Montaje del sistema

Para el montaje de la central hidroeléctrica se realizaron los siguientes montajes y procedimientos.

4.4.1 Montaje de la tubería

Se implementaron los accesorios adicionales requeridos en el sistema de tuberías en paralelo, así como una rejilla de retención de suciedad en la toma del agua (ver Figura 25).

Figura 25 a. Montaje de tubería b. Rejilla de retención de suciedades.



a.

b.

Fuente: autores.

4.4.2 Montaje de la turbina

Una vez instalado completamente el sistema de la tubería, se realizaron las respectivas mediciones para diseñar el montaje de la turbina, realizándose de la siguiente manera.

4.4.2.1 Base soporte de la turbina

El diseño de la base para la turbina se realizó utilizando la herramienta CAD *Solidworks*. En el diseño se consideró la resistencia mecánica de la estructura y que la base estaría sumergida dentro del canal, lo cual iba a afectar la durabilidad del material. En este sentido, se decidió que el recubrimiento de esta estructura tendría que ser impermeable, para ello se utilizó el mismo recubrimiento que implementó Colturbinas S.A con la carcasa de la turbina. En la Figura 26 se aprecia el diseño y fabricación de la base, así como el montaje de la turbina, realizados por los autores del proyecto.

Figura 26. a. Diseño de la base b. Fabricación de la base c. Montaje de la base d. Montaje de la turbina.



Fuente: autores.

4.4.2.2 Acople de la turbina a la tubería

Para conectar la turbina a la tubería, se requirió de un acople específico, el cual fue diseñado por los autores de este proyecto, utilizando el software *Solidworks*. El acople fue diseñado considerando las dimensiones de entrada al alabe de la turbina y las dimensiones de la tubería, con objetivo de tener un acople directo para la perfecta unión de estas partes y así, darle soporte a la tubería. Con las dimensiones de este acople se mandó a fabricar un empaque de un material polimérico para evitar posibles fugas en esta conexión. En la Figura 27 se presenta el diseño del acople en *Solidworks* y su montaje.

Figura 27. a. Diseño del acople b. Montaje del acople.



a.



b.

Fuente: autores.

4.4.2.3 Manómetro de control

Se instaló un manómetro análogo (ver Figura 28) para medir la presión del agua antes de la entrada en la turbina. Con la lectura del manómetro durante el funcionamiento de la turbina, fue posible a través de la solución del sistema de tuberías en paralelo desarrollado en EES, calcular el caudal y potencia hidráulica disponible en el sistema. El manómetro también sirve como instrumento de control sobre alguna obstrucción en el sistema de tuberías, lo cual produciría un incremento de la presión en este punto.

Figura 28 Manómetro análogo instalado antes de la entrada de la turbina.



Fuente: autores.

4.4.3 Montaje del generador

Para el montaje del generador se tuvieron en cuenta los siguientes ítems.

4.4.3.1 Construcción de la base

Se construyó una placa con los trabajadores de la estación piscícola para poder realizar el montaje del generador, a esta placa se le montaron dos ángulos en forma de riel para que la mesa del generador se pudiera desplazar y así poder dar tensión a la correa. La estructura en la cual se montó el generador fue adaptada a partir de una base que se encontraba disponible. En la Figura 29 se muestra el proceso de montaje del generador.

Figura 29. a. Corte del riel. b. Acondicionamiento de la base del generador c. Placa fundida, base del generador d. Generador montado.



a.



b.



c.



d.

Fuente: autores.

4.4.3.2 Relación de velocidad

Para la transmisión mecánica entre la turbina y el generador se seleccionó un sistema de poleas y correa, ya que este mecanismo de transmisión es el más económico, silencioso, de fácil mantenimiento y el más empleado cuando los ejes están muy separados [2].

La relación de poleas a implementar se determinó con base en la velocidad de giro del generador y la velocidad de giro del eje de la turbina, la cual se midió utilizando

el método de la luz estroboscópica. En la Figura 30 se aprecian las mediciones realizadas por este método.

Figura 30. Medición de rpm con luz estrobostrópica



Fuente: Autores.

La relación de velocidad de las poleas que se implementó para que el generador estuviera en su velocidad de rotación de 1800 rpm fue de 1:3 como se muestra en la Figura 31. De esta forma, se adquirieron, maquinaron y montaron dos poleas de aluminio con correa tipo V, una de 4" en el eje del generador y otra de 12" en el eje de la turbina.

Figura 31. a. Poleas de trasmisión de potencia b. Montaje de las poleas en los ejes.



a.



b.

Fuente: autores

4.4.4 Montaje del sistema de control

Para el control de la operación de la picocentral se instaló una transferencia automática por contactores, la cual funciona como protección en caso de una subida o una caída de voltaje (ver Figura 32). Este sistema de control se buscó en la ciudad de Bucaramanga. En la Tabla 9 se presentan algunas cotizaciones del sistema de control.

Tabla 9. Cotización de transferencias automáticas.

Empresa	Cotización de transferencia automática por contactores
MG Electrobombas e Ingeniería	\$900.000 IVA incluido
Electro Agro Ltda.	\$1.200.000 más IVA
Eléctricos y automatización HTC	\$1.300.000 IVA incluido

Fuente: autores.

Figura 32. Montaje del sistema de control.



Fuente: autores.

4.4.5 Montaje de la red eléctrica

En decisión con el propietario de la estación piscícola, la transferencia automática fue ubicada cerca de la caja de disyuntores eléctricos (*breakers*) que controla la estación. Con base en la tensión de trabajo y la denominación de colores distintivos para conexiones domiciliarias [35], se instalaron dos líneas de cable de cobre calibre 14 desde el generador hasta dicha transferencia (ver Figura 33).

Figura 33. Montaje de la red del generador a la transferencia.



Fuente: autores.

4.4.6 Plano de la picocentral

En el Apéndice 2 se presenta el plano de la picocentral implementada en la estación piscícola “La Cascada” con la localización de sus respectivos componentes y distancias.

4.5 Operación de la picocentral

Para la operación de la central hidroeléctrica se tuvo en cuenta que la energía generada debía distribuirse de una forma gradual para no sobrecargar el generador. Para esto se realizaron unas pruebas preliminares con un banco de bombillas para observar dicha generación (ver Figura 34).

Figura 34 Montaje picocentral hidroeléctrica "La Cascada".



Fuente: autores

La potencia hidráulica útil del sistema implementado y las respectivas eficiencias de la turbina, transmisión mecánica y generador eléctrico, mostraron que la potencia eléctrica producida por el picocentral es inferior a la demanda eléctrica de la estación, presentada en las Figura 19 y Figura 20. Por lo tanto, la central no suplirá toda la demanda eléctrica de la estación, ni en días de baja demanda. Consecuentemente, se definieron los componentes con los que la central podría operar en periodos diurnos y nocturnos, sin requerir componentes adicionales de control.

En ese contexto, a partir de la red eléctrica de la estación, utilizando la caja de disyuntores y con ayuda de un técnico electricista, se conectó una parte de la red de bombillas de la estación piscícola (zona de alevines), y toda la red de cámaras de vigilancia de la estación (21 cámaras). Midiendo con la pinza voltiamperimétrica, se calculó la potencia que el generador entregaba y se notó que la tensión en la transferencia automática estaba en el voltaje adecuado para el funcionamiento de los equipos y así utilizar el máximo de energía entregada por el generador.

4.6 Análisis económica y ambiental

Para finalizar el proyecto se evaluó el beneficio económico y el beneficio ambiental de la operación de la picocentral hidroeléctrica.

El análisis económico consistió en determinar el tiempo de recuperación de la inversión o *Payback* del proyecto. Para ello, se calculó el costo total de la inversión en la picocentral y los ingresos anuales que corresponderán al valor ahorrado por causa de la potencia eléctrica generada que dejó de adquirirse de la electrificadora de la región.

Los costos de la implementación de la picocentral se muestran en la Tabla 10. Costos de la implementación de la picocentral.. Cabe resaltar que los costos de este proyecto fueron cubiertos por el propietario de la estación piscícola y los autores de este proyecto. En los costos no se consideró la mano de obra, debido a que esta fue realizada por los autores del proyecto.

Tabla 10. Costos de la implementación de la picocentral.

Ítem	Costo
Turbina	\$4'000.000
Generador	\$2'400.000
Sistema de transmisión	\$350.000
Cableado	\$300.000
Accesorios de tubería	\$200.000
Montaje	\$250.000
Rejillas	\$50.000
Trasporte	\$100.000
Electricista	\$100.000
Total	\$7'750.000

Fuente: Autores.

Los ingresos anuales se calcularon a partir de la potencia eléctrica generada y el costo del kWh en la estación.

La potencia eléctrica generada se calculó como mostrado en la ecuación (15).

La tarifa de electricidad aplicada en la estación piscícola está regida por la empresa CENS. Para una vivienda normal promedio en el municipio se le aplica un subsidio por consumo, el cual es descontado del monto total. De este modo, el valor del kWh para la estación piscícola es de \$390.54 pesos como se observa en la factura de energía eléctrica.

Considerando una operación uniforme a lo largo del tiempo, se tiene una estimativa de ingresos constantes en cada periodo de tiempo. De este modo, el Payback del proyecto en meses será:

$$\text{Payback} = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ingresos homogéneos mensuales}} \quad (16)$$

Con relación al beneficio ambiental, se cuantificó la contribución en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con la implementación del proyecto. Para ello se consideró el factor de emisión (FE) del sistema interconectado nacional (SIN) en Colombia, publicado en 2021 [36].

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los principales resultados del proyecto están relacionados con la operación de la picocentral, el tiempo de recuperación de la inversión, la reducción de costos de facturación del servicio ofrecido por CENS y la contribución de reducción de GEI.

5.1 Turbina Michell-Banki implementada

La turbina Banki implementada cuenta con un eje en posición horizontal, con un cuerpo de rotor construido en lámina de acero A-36, y con alabes de rotor curvados, además de alabes debidamente maquinados y pulidos, pintados en Coaltar, según norma CH 70-3, y balanceado según ISO 21940.

El eje del rotor se fabricó en Acero AISI/SAE 1045 y es soportado por 2 rodamientos de simple hilera de bolas. Este cuenta con sus respectivos sellos mecánicos para evitar salidas de agua.

La Carcasa de la turbina es una construcción soldada en lámina A 36 debidamente reforzada y rigidizada. El diseño permitirá desmontar el rotor fácilmente, cuando se requieran trabajos de mantenimiento. Se instaló un cáncamo sobre la carcasa para efectos de montaje. La carcasa tendrá una adecuada ventilación para venteo de efectos de golpe de ariete o flujo de aire inverso por turbulencia en la salida o al ser turbinado, y el diseño permitirá disminuir las pérdidas por fricción. La parte inferior, tendrá una brida la cual se apernará a la base de acero.

Se instalaron las respectivas graseras para lubricar rodamientos, y bujes.

El interior de la carcasa se pintó con 1 capa de pintura epoxi de 3 mm. La superficie exterior de la pintura está recubierta con una capa de pintura epoxi, de 3 mm y una mano de acabado de 3 mm.

Las principales características de diseño de la turbina se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Información de la turbina.

Tipo de turbina	Flujo cruzado Michell Banki
Caudal de diseño	25 l/s
Cabeza neta de diseño	6,67 m
Potencia	1 kW
Inyectores o alabe directriz	1
Diámetro del rodete	300 mm
Alabes	36
Material	Acero A-36
Rodamientos	50.000 horas
Velocidad de operación	600 a 900 rpm

Fuente: Colturbinas S.A.

5.2 Curva de Potencia

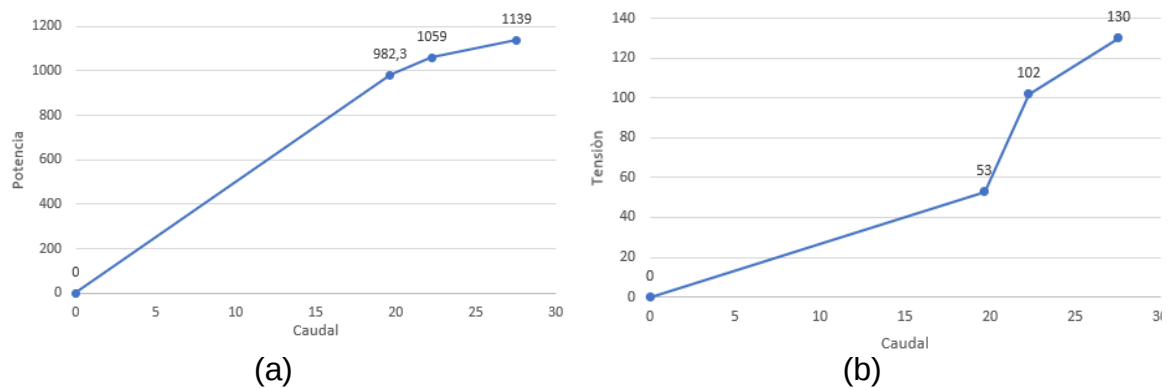
Como no se contaba con la instrumentación adecuada para medir el caudal del sistema operando, se utilizó la medida de presión en la entrada de la turbina y se realizó el cálculo del caudal y potencia hidráulica del sistema para diferentes posiciones de abertura en la entrada de la turbina. Estos resultados se presentan en la Tabla 12 y en la Figura 35. Las curvas obtenidas de potencia y voltaje en función del caudal presentan un comportamiento coherente con lo esperado en este tipo de sistema hidráulico. Además, se observa que la potencia y el voltaje son directamente proporcionales con el caudal.

Tabla 12. Datos de caudal, potencia y tensión respecto a la abertura de la turbina.

Número de vueltas	Presión (kPa)	Caudal (L/s)	Potencia (W)	Tensión (volts)
0	55,14	0	0	0
3	51,00	19,65	982,3	53
6	47,56	22,26	1059	102
9	41,36	27,55	1139	130

Fuente: Autores.

Figura 35. (a) Curva de potencia respecto al caudal. (b) Curva de tensión respecto al caudal.



Fuente: Autores.

Cabe resaltar que en la Figura 35(a) el cálculo de la potencia con un rango de caudal bajo puede presentar errores pues en esta condición de poca abertura de la turbina, el agua tiende a devolverse hacia el tanque superior. Así mismo, para la Figura 35 (b) con los rangos del caudal bajos, se muestra una caída de tensión drástica lo cual representa que dicha generación no se comporta de manera lineal respecto al caudal.

5.3 Potencia eléctrica generada

La potencia eléctrica generada se calculó a partir de la potencia útil y las respectivas eficiencias de la turbina, transmisión mecánica y generador, conforme la ecuación (15).

La eficiencia de la turbina se calculó a partir de la ecuación (14), obteniendo un valor de 0,7434. Para el sistema de transmisión de potencia por correas y poleas, se tiene un valor estimado de 95 % de eficiencia [2]. En un generador síncrono no toda la potencia mecánica que le ingresa es convertida en energía eléctrica, esto debido a pérdidas mecánicas, pérdidas en los devanados y pérdidas por excitación lo cual para principios de funcionamiento constante, el valor de la eficiencia de dichos generadores puede llegar al 95 % [3].

De este modo, la eficiencia global del sistema turbina-generador en la condición de caudal máximo es de 0,671. Así, la potencia eléctrica generada es de 764,17 W. Este valor satisface aproximadamente un 80 % de la demanda eléctrica de la estación piscícola. Cabe resaltar que dentro del cálculo de este valor no están consideradas las pérdidas que son ocasionadas por la red doméstica de la estación.

5.4 Tiempo de recuperación (Payback)

La inversión inicial fue de \$ 7'750.000 como presentado en la Tabla 7. Los ingresos mensuales corresponden al ahorro por el consumo mensual de electricidad que se está autogenerando. Los ingresos son:

$$E_g = P_{\text{eléctrica}} \cdot \text{horas}$$

$$E_g = 764,17 \text{ W} \cdot 720 \text{ h} = 550,20 \text{ kWh}$$

$$\text{Ahorro consumo (\$)} = E_g \cdot \text{tarifa}$$

$$\text{Ahorro consumo (\$)} = 550,20 \cdot 390,5386 = \text{\$ 214.875 mensual}$$

Con el valor obtenido mediante los cálculos anteriores se puede analizar que la picocentral está ahorrando a la estación piscícola 550,20 kWh al mes, representando \$214.875 pesos ahorrados en su factura de electricidad. El periodo *Payback* del proyecto es:

$$\text{Payback} = \frac{7'750.000}{214.875} = 36,06 \text{ meses.}$$

De este modo, el tiempo de retorno del capital invertido en este proyecto es 36,06 meses, lo que equivale a 3 años aproximadamente.

5.5 Reducción de gases de efecto invernadero (GEI)

La generación de energía eléctrica se ha convertido en todo un reto ambiental, buscando reducir las emisiones de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en el proceso de generación de electricidad. Debido a esto, se busca que la generación sea a partir de fuentes renovables para mitigar las emisiones de estos GEI.

De acuerdo a la UPME [36], el factor de emisión del sistema interconectado nacional de Colombia fue de 0,126 tCO₂eq/MWh para el año 2021. El factor de emisión indica un valor medio de las emisiones producidas en la generación de energía eléctrica en un periodo de un año.

Para el proyecto desarrollado, la generación anual de electricidad de la picocentral será de 6,6024 MWh, lo que corresponderá a 0,8319 tCO₂eq evitadas al no ser consumida la potencia eléctrica a partir del SIN. Esta reducción equivale a 357 litros de gasolina no consumidos al año.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo implementó una picocentral hidroeléctrica en la estación piscícola “La Cascada” para satisfacer parte de su demanda eléctrica. La central consistió en un montaje de una turbina de flujo cruzado Michell Banki de 1 kW conectada a un generador síncrono de 3 kW mediante un sistema de transmisión de potencia por poleas (relación 1:3). Además, se instaló una transferencia automática por contactores para el control del voltaje generado. El conjunto turbina-generador instalado opera con una eficiencia global de 0,671 y satisface alrededor del 80 % de la demanda eléctrica de la estación piscícola.

La turbina de flujo cruzado Michell Banki seleccionada fue adecuada para el aprovechamiento de la potencia hidráulico disponible en el punto seleccionado en la estación.

El potencial hidráulico aprovechado se limitó por las condiciones de espacio e infraestructura disponible en la estación piscícola.

El mercado nacional para la adquisición de turbinas hidráulicas se basa principalmente en turbinas Pelton, las cuales, al ser utilizadas fuera de su rango de trabajo, presentan una pérdida de eficiencia considerable.

De los generadores disponibles en el mercado nacional, el generador síncrono seleccionado es el más eficiente y adecuado para ser implementado en este tipo de sistemas.

El plan de operación propuesto para la picocentral atiende las cámaras de seguridad y la iluminación del área de alevines, equipos que operan las 24 horas del día.

La operación de la picocentral contribuye con una reducción de 0,8319 tCO₂eq/año.

La curva de potencia hidráulica en función del caudal del sistema propuesto, presenta un comportamiento coherente con la operación de un sistema con turbina hidráulica.

La operación de la picocentral en la estación piscícola “La Cascada” representa un beneficio económico y soporte energético para el funcionamiento de la misma.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para el cuidado y mejoramiento del sistema implementado, así como la continuación de proyectos similares, se presentan las siguientes recomendaciones y propuestas de trabajos futuros.

- Realizar en el tiempo establecido el mantenimiento respectivo a la turbina, transmisión de potencia, así como al generador.
- Realizar periódicamente la limpieza del tamiz que retiene suciedades evitando obstrucciones en la turbina.
- Implementar un medidor de consumo en tablero de control de la picocentral.
- Apagar la picocentral cuando se realicen los respectivos lavados y movimiento de trucha de los tanques superiores.
- Instalar una protección al sistema de transmisión de potencia para evitar un posible accidente.
- Analizar la posibilidad de aumentar el diámetro de la tubería para disminuir las pérdidas de carga del sistema y aumentar el caudal, obteniendo una mejora en la potencia útil.
- Construir una cubierta de protección al generador para evitar el deterioro por la humedad del ambiente.
- Si la generación de energía se incrementa, conectarse a la red de distribución de energía eléctrica.
- Evaluar el potencial de implementación de estos sistemas en otras estaciones piscícolas del municipio como forma de incentivar el uso de una fuente de energía renovable.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. F. B. González, A. L. Sepúlveda, y K. T. Aponte, «ZONAS NO INTERCONECTADAS ELÉCTRICAMENTE EN COLOMBIA: PROBLEMAS Y PERSPECTIVA», p. 27, 2014.
- [2] «Tema 11. Transmisión por correas.pdf».
- [3] T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*, 5th ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2002.
- [4] C. P. De Colombia, «Constitución política de Colombia», *Bogotá Colomb. Leyer*, vol. 1, 1991.
- [5] E. E. Gaona, C. L. Trujillo, y J. A. Guacaneme, «Rural microgrids and its potential application in Colombia», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 125-137, nov. 2015, doi: 10.1016/J.RSER.2015.04.176.
- [6] C. M. Arias y B. I. V. Villar, «ENERGÍA LIMPIA PARA ILUMINACIÓN EN LOS HOGARES DE LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS», *Encuentro Int. Educ. En Ing.*, ago. 2020, Accedido: 15 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/811>
- [7] S. M. González, L. Cano, y G. López, «Pico Hydroelectric (p CH): an energetic alternative in non-interconnected zones in Colombia», pp. 25-41, 2011.
- [8] T. F. G. Vergara, «Actualización del inventario de PCHs en Colombia en una herramienta computacional para visualización web», p. 76, 2020.
- [9] C. E. E. Tiempo, «Nación alista 70 pequeñas centrales hidroeléctricas», *Portafolio.co*. <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/nacion-alista-70-pequenas-centrales-hidroelectricas-553547> (accedido 23 de noviembre de 2022).
- [10] F. E. S. Vargas, A. F. S. Alarcón, y C. A. G. Fajardo, «Pequeñas y microcentrales hidroeléctricas: alternativa real de generación eléctrica.», *Inf. Téc.*, vol. 75, dic. 2011, doi: 10.23850/22565035.22.
- [11] C. 174 D. 2021, «República de Colombia», 2021.
- [12] V. A. Ballesteros-Ballesteros y A. P. Gallego-Torres, «Modelo de educación en energías renovables desde el compromiso público y la actitud energética», *Rev. Fac. Ing.*, vol. 28, n.º 52, Art. n.º 52, jun. 2019, doi: 10.19053/01211129.v28.n52.2019.9652.
- [13] S. Tilahun, V. Paramasivam, M. Tufa, A. Kerebih, y S. K. Selvaraj, «Analytical investigation of Pelton turbine for mini hydro power: For the case of selected site in Ethiopia», *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 7364-7368, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.1038.
- [14] G. Martínez Guillen y F. Farro Oyola, «Elección y dimensionamiento de una turbina hidráulica para la generación de energía en el centro poblado San Gerónimo Bajo», *Univ. Tecnológica Perú*, p. 82, 2019.
- [15] L. E. I. Ibañez Solis, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI-TURBINA HIDRÁULICA TIPO MICHELL – BANKI PARA SER INSTALADA EN CANALES PRIMARIOS ABIERTOS Y GENERAR ENERGÍA MECÁNICA.», n.º 2, pp. 1-13, 2019.

- [16] C. A. Hincapié Naranjo, E. Muñoz Mejía, y J. E. Lezcano Valencia, «Pico central con materiales reciclables», 2016, [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.pascualbravo.edu.co:8080/jspui/handle/pascualbravo/117>
- [17] S. Agudelo, E. Chica, F. Obando, N. Sierra, L. Velásquez, y W. Enríquez, «Diseño, simulación, fabricación y caracterización de una turbina tipo Pelton de 5 kW Design, simulation, construction and characterization of a 5 kW hydraulic Pelton turbine», 2013.
- [18] A. B. Niño, «MICROTURBINA PELTON, UNA SOLUCION REAL DE ENERGIA PARA ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)», *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 1, n.º 31, Art. n.º 31, 2018, doi: 10.24054/16927257.v31.n31.2018.133.
- [19] D. O. C. Sarmiento, K. Y. S. Mojica, C. Sarmiento, y S. Mojica, «Diseño de un sistema fotovoltaico aislado para la generación de energía eléctrica en escuelas rurales de Norte de Santander Design of an isolated photovoltaic system for the generation of electric power in Rural Schools of Norte de Santander», p. 17, 2017.
- [20] E. Soria, «Energía hidráulica», *Rev. Energ. Renov. Para Todos Haya*, 2010.
- [21] «Atlas_p25-36.pdf». Accedido: 22 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p25-36.pdf
- [22] OLADE, «Organización Latinoamericana de Energía», 2020, [En línea]. Disponible en: <http://www.olade.org/informativo/>
- [23] P. F. Díez, «TURBINAS HIDRÁULICAS», p. 149.
- [24] «cuaderno_HIDRAULICA.pdf». Accedido: 12 de noviembre de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.energias-renovables.com/ficheroenergias/productos/pdf/cuaderno_HIDRAULICA.pdf
- [25] Fredys Romero, Laura Velásquez, Edwin Chica, «Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki», *13 Oct. 2020*, p. 23.
- [26] «Determination of the manning coefficient from measured bed roughness in natural channels», 1970. doi: 10.3133/wsp1898B.
- [27] J. D. G. Silva, «Cálculo del coeficiente de rugosidad de manning utilizando gravilla, arena, piedra pegada y tierra como fondo mediante un canal a escala como modelo físico», p. 81, 2009.
- [28] «hidraulica_ruiz20190605-53177-dlu0cu-with-cover-page-v2.pdf». Accedido: 17 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/59539423/hidraulica_ruiz20190605-53177-dlu0cu-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1655476807&Signature=EQtHvAQwgUaBiSlam0kjEaThBSTYiulG4FiTb~wrt2gZ52iBX9lgYOk8zYSImkqRoY8VcPKN36hG7oqVAA3YOVWzWnWbPIAEVb8~-FoDoE1J68dEUI6UPwoBC2eyCn9gGrkz1PCjQ5JBMnlbb6r84CcsCad6gcn51b0FrqB5xL1e6zML1SxIBuMNSO3rKccfGWpOP639~vyIWwyASSby1ql2O-65wIYzZCoH24McNLg1~WmEsRgBKeg~UIQ5olqUyRVQyTPyJv9AlndIVgU5j5-ZujBnSRoFPjoGa1Yd0NjTB6YgaafUn0whhbQUt00wmhNVbifnnee1IE4J2jKA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- [29] «SELECyDIMENSIONAMIENTODETURBINAS.pdf». Accedido: 16 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECyDIMENSIONAMIENTODETURBINAS.pdf
- [30] «La potencia hidráulica». https://hidraulicahidraoil.es/articulos/la-potencia-hidraulica/#calculo_potencia (accedido 16 de junio de 2022).
- [31] Y. A. Cengel; J. M. Cimbala «Mecanica de Fluidos», p. 997.
- [32] F. M. White, *Fluid mechanics*, 5th ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.
- [33] «Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías», *Educ. Quím.*, vol. 25, n.º 2, pp. 128-134, abr. 2014, doi: 10.1016/S0187-893X(14)70535-X.
- [34] «TURBINAS_0.pdf». Accedido: 29 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM120/APOSTILA_MH/TURBINAS_0.pdf
- [35] F. Retalliau, *Enciclopedia de la Construcción, 11vols.* Reverte, 1982.
- [36] «Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2021.pdf». Accedido: 26 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://www1.upme.gov.co/siame/Documents/Calculo-FE-del-SIN/Documento_calculo_Cartilla_Factor_de_emision_2021.pdf

9. APÉNDICES

Apéndice 1. Código EES.

T=15

rho=Density(Water;T=T;P=101,325)

mu=Viscosity(Water;T=T;P=101,325)

g=9,81

D=0,1015 [m]

A=pi*D^2/4

Re_1=rho*V_1*D/mu

Re_2=rho*V_2*D/mu

Re_3=rho*V_3*D/mu

1/f_1^0,5=-2*log10(e_r/3,7+2,51/(Re_1*f_1^0,5))

1/f_2^0,5=-2*log10(e_r/3,7+2,51/(Re_2*f_2^0,5))

1/f_3^0,5=-2*log10(e_r/3,7+2,51/(Re_3*f_3^0,5))

e_r=0

p_A/(rho*g)+V_A^2/(2*g)+z_A-h_L_1-h_L_3=p_C/(rho*g)+V_C^2/(2*g)+z_C

p_A=0

V_A=0

z_A=5,9

{p_C=0}

V_C=V_3

z_C=0

h_L_1=V_1^2/(2*g)*(f_1*L_1/D+K_1)

L_1=25

$$h_{L_3} = V_3^2 / (2g) * (f_3 L_3 / D + K_3)$$

$$L_3 = 11$$

$$p_B / (\rho g) + V_B^2 / (2g) + z_B - h_{L_2} - h_{L_3} = p_C / (\rho g) + V_C^2 / (2g) + z_C$$

$$p_B = 0$$

$$V_B = 0$$

$$z_B = 6,67$$

$$h_{L_2} = V_2^2 / (2g) * (f_2 L_2 / D + K_2)$$

$$L_2 = 4,4$$

$$V_1 + V_2 = V_3$$

$$Q_1 = A * V_1$$

$$Q_2 = A * V_2$$

$$Q_3 = A * V_3$$

$$K_1 = K_{\text{semicodo}} + K_{\text{tee}_l}$$

$$K_2 = K_{\text{semicodo}} + 2 * K_{\text{codo}} + K_{\text{tee}_b}$$

$$K_3 = 0$$

$$K_{\text{semicodo}} = 0,4$$

$$K_{\text{codo}} = 0,3$$

$$K_{\text{tee}_l} = 0,2$$

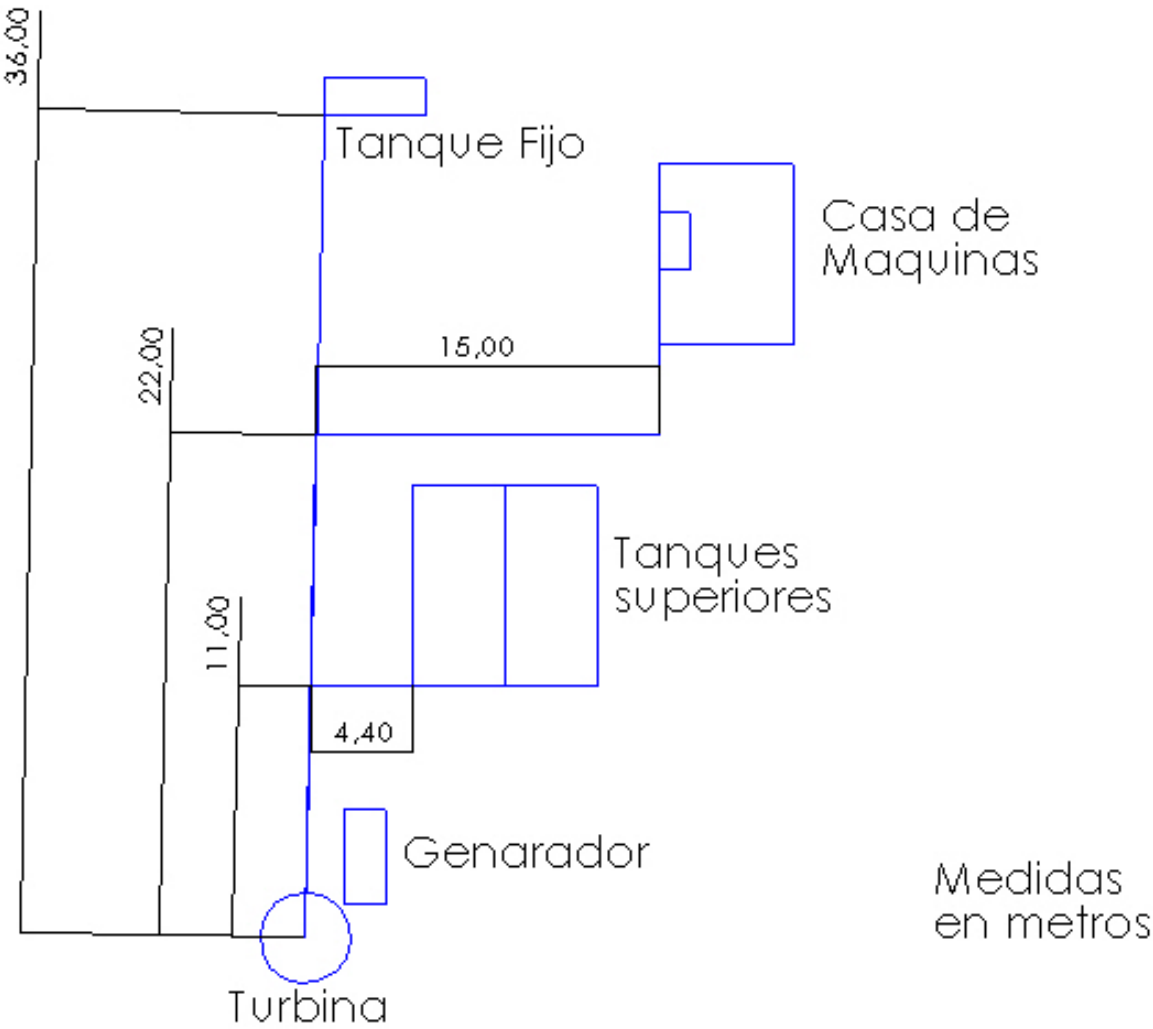
$$K_{\text{tee}_b} = 1$$

$$p_C = 41360$$

$$p_C = \rho * g * h_T$$

$$W_{\text{dot}_T} = Q_3 * p_C$$

Apéndice 2. Plano de la picocentral.



Apéndice 3. Plan de mantenimiento preventivo de la picocentral.

Proceso	Descripción	Equipo-componente	Frecuencia
Lavar	Realizar una limpieza y vaciado de impurezas	Tamiz	Diario
Lavar	Realizar una limpieza superficial e interna eliminando factores externos	Turbina	60 días
Engrasar	Aplicar grasa utilizando un graseo manual	Rodamientos chumacera F-204	60 días
Cambiar	Reemplazar componente	Rodamientos chumacera F-204	30.000 horas
Cambiar	Realizar una limpieza exhaustiva y reemplazar componente	Escobillas-generator	6 meses
Ajustar	Realizar un ajuste de tensión a la correa del sistema de transmisión	Correa B-97	30 días
Cambiar	Reemplazar componente y dar ajuste	Correa B-97	1 año
Cambiar	Reemplazar componente	Polea tipo B x 3" eje de 32 mm	3 años
Cambiar	Reemplazar componente	Polea tipo B x 3" eje de 20 mm	3 años

Apéndice 4. Tabla de proveedores

Componente	Empresa	Teléfono
Correa B-97	Cadenas & bandas	(7) 6 42 7899
Polea tipo B x 3" eje de 32 mm	Cadenas & bandas	(7) 6 42 7899
Polea tipo B x 3" eje de 20 mm	Cadenas & bandas	(7) 6 42 7899
Escobillas-generator	Agroequipos Santander	(7) 6 33 2478
Rodamientos chumacera F-204	Rodamientos & aceros	(7) 6 30 8086
Turbina Michell-Banki	Colturbinas LTDA	(+57) 320 570 4598

Anexo 2. Curvas de eficiencias de las turbinas hidráulicas.

REGULACIÓN DE TURBINAS (II)

$$\eta = \eta(\dot{W})$$

$$\eta = \eta(Q)$$

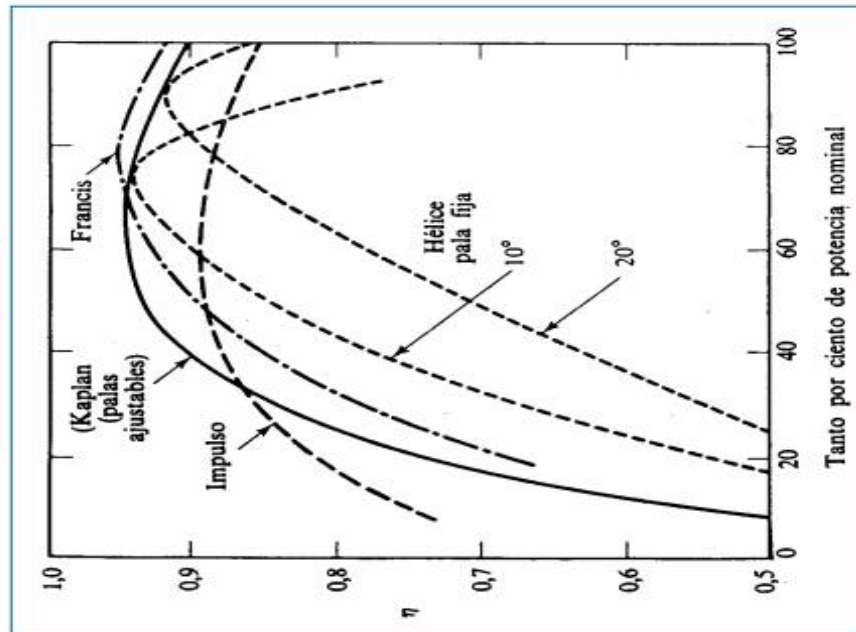
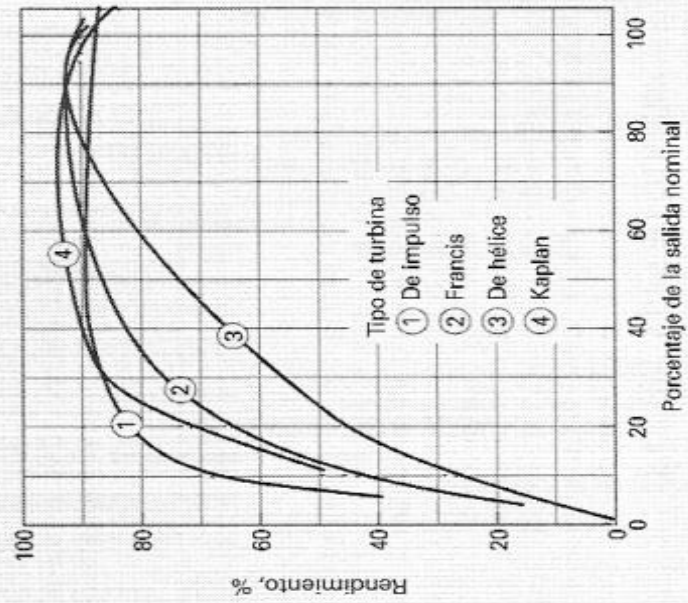


FIGURA 16.13

Rendimiento en función de la carga para turbinas típicas.



Anexo 3. Especificaciones de la correa



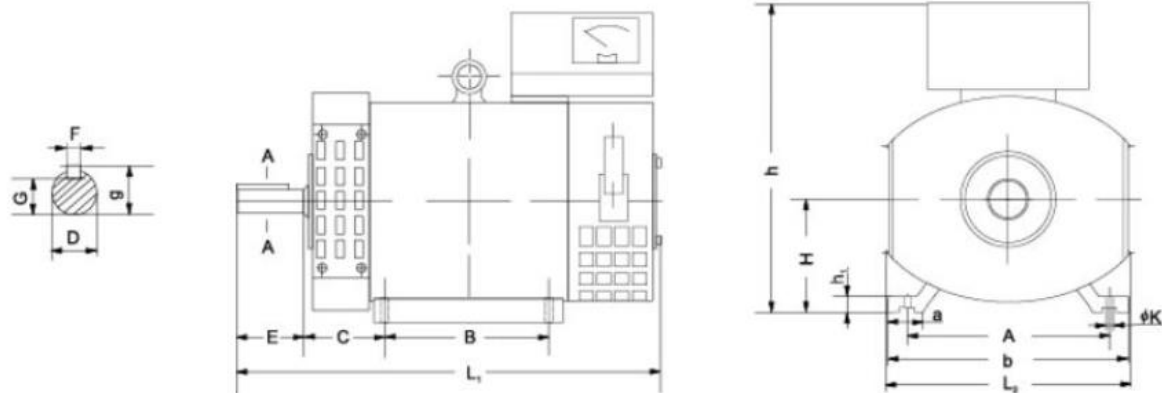
Referencia: B97

- Descripción: B97 Correa en V Clasica
- Longitud: 97 in Longitud interna, 100 in Longitud externa
- Ancho superior: 21/32 in
- Altura: 5/16 in
- Peso: 0.21 lb
- Material: Caucho con refuerzo en cable de Poliester, cubierto con una capa de tela de Algodon-poliester resistente a la abrasion.
- Resistencia a la temperatura: -35C a +70C Caucho con refuerzo en cable de Poliester, cubierto con una capa de tela de Algodon-poliester resistente a la abrasion.
- Resistencia a la temperatura: -35C a +70C: Uso recomendado: Maquinaria Agricola e Industrial
- Diametro de polea recomendado: 112 mm (4 -13/32 in)
- Otras características: Resistencia limitada a la grasa, antiestatica

Tipo de Correa	V Belt
Ancho	5/8 in
Material	Rubber
Longitud Interna (in)	97 in
Longitud Externa (in)	100 in
Height	7/16 in

Anexo 4. Especificaciones del generador ST-3

No. de Modelo.	ST-3kw
Speed	1500rpm or 1800rpm
Bearing	Double Bearing
Color	as Your Request
Power	2kw--50kw
Marca Comercial	JIMMINS POWER
Especificación	61x35x52 cm
Código del HS	85016100
Tipo de salida	Monofásico AC
Metodo de instalacion	Fijo
Frequency	50Hz or 60Hz
Voltage	110/220/230/240/380/400/415V
Package	Plywood Case
Pole	4
Copper	100% Copper



El modelo	La salida	Dimensiones de montaje (mm)										Dimensiones del bastidor (mm)					
	(KW).	H	Un	B	C	D	E	F	G	G	K	Un	B	H1	H	L1	L2
ST-3	3.0	132	216	178	89	32	80	10	27	34.8	12	34	250	18	384	480	270
ST-5	5.0	160	254	254	108	38	80	10	33	40.8	15	50	310	25	440	580	325
ST-7.5	7.5	160	254	254	108	38	80	10	33	40.8	15	50	310	25	440	580	325
ST-10	10	180	279	203	121	42	110	12	37	44.8	15	60	339	25	480	610	365
ST-12	12	180	279	203	121	42	110	12	37	44.8	15	60	339	25	480	610	365
ST-15	15	200	318	228	133	48	110	14	42.5	51.2	19	60	378	30	540	660.	400
ST-20	20	200	318	228	133	48	110	14	42.5	51.2	19	60	378	30	540	660.	400
ST-24	24	200	318	228	133	48	110	14	42.5	51.2	19	60	378	30	540	660.	400