

Diseño y análisis de un sistema pluvio-eléctrico adaptable a la región del pacifico colombiano

Manuel Salvador Acosta Castro¹, Manuel del Jesús Martínez²

¹ Grupo de investigación en energía y medio ambiente, Escuela de ingeniería mecánica, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Email: giema@uis.edu.co

Resumen

Se analizó el aprovechamiento de la energía proveniente de la lluvia de acuerdo con las condiciones ambientales que existen en la región del chocó biogeográfico colombiano; por consiguiente, se diseñó una turbina tipo Michell-Banki que aprovecha la energía que genera el sistema debido a la delimitación de los parámetros de operación de caudal y presión. Se logró demostrar la viabilidad del sistema de generación de energía eléctrica a partir de aguas pluviales

Palabras clave: Hidroeléctrico, Pluviosidad, Michell-Banki.

Abstract

The possibility of using rainwater as an energy source was analyzed by considering the unique environmental conditions of the biogeographical region of Chocó, Colombia. For that reason, a crossflow turbine was designed to harness the energy based on the discharge and pressure parameters, and the viability of this type of system was proven.

Keywords: Hydropower, Crossflow turbine, Rainwater.

1. Introducción

Este estudio busca ampliar la discusión de sobre el uso del agua lluvia como fuente energética considerando la energía potencial que posee sobre alguna edificación; el punto de partida fueron sistemas artesanales [1], sobre los cuales se busca concebir una técnica más robusta con un enfoque ingenieril, centrado en un diseño de una turbina Michell-Banki reemplazando a iteraciones previas de turbinas Pelton [2]. Para los cual se consideraron las recomendaciones de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y de las tesis de grado [3][4].

Debido a las limitaciones de energía disponible en este tipo de sistemas se buscará brindar las mejores condiciones posibles para su operación, razón por la cual se decidió considerar la región del chocó biogeográfico colombiano como área de estudio puesto que es la zona con mayor pluviosidad del mundo; bajo estas condiciones se buscará encontrar la factibilidad de la implementación de un sistema pluvio-eléctrico. Para lo cual se buscará encontrar la energía disponible considerando las pérdidas e intermitencia del recurso.

Este estudio busca extender a distintas regiones lluviosas del mundo sistemas homólogos como complemento a la red energética local o incluso como parte de un sistema autónomo que incluya otros recursos como el solar o el eólico; se discutirán retos, limitaciones y potencial para su implementación y se presentarán posibles alternativas o soluciones a los retos propuestos.

2. Metodología

El desarrollo de este proyecto se dividió en 2 partes principales, la primera, el diseño conceptual donde se concibió el esquema de la central pluvio-eléctrica estableciéndose sus condiciones de operación, y una segunda parte en la cual se desarrolló específicamente el diseño de la turbina.

2.1 Diseño conceptual del sistema pluvio-eléctrico

Se establecieron los componentes que debe poseer un sistema pluvio-eléctrico que emplee la energía potencial del agua lluvia, las cuales se pueden observar

en la figura 1. Con el fin de establecer condiciones óptimas para la implementación del sistema se buscó una edificación en la cual se maximice se la superficie de recolección y la altura de descarga, junto con una demanda energética baja, decantándose por el diseñar el sistema para un coliseo o polideportivo los cuales típicamente cuentan con mayores dimensiones a viviendas particulares y consumos relativamente menores gracias a la intermitencia de su uso.

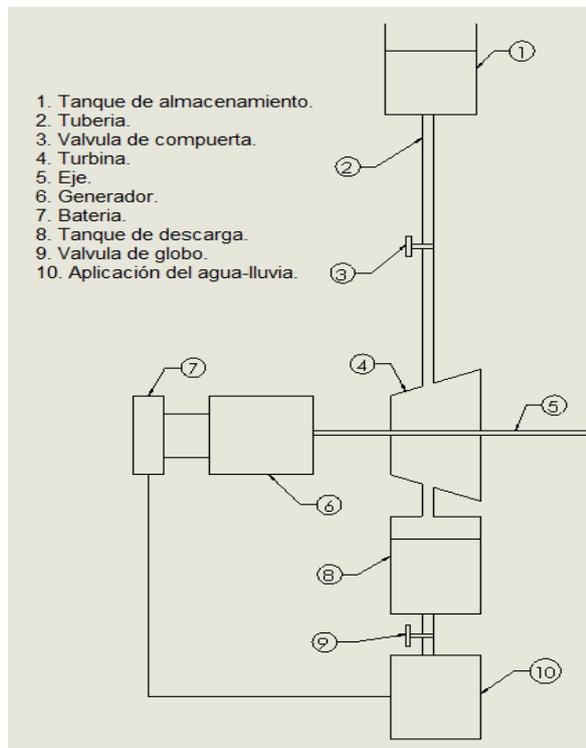


Figura 1. Esquema de la central “Pluvio-eléctrica”. Fuente: elaboración propia.

2.2 Cálculo y dimensionamiento de elementos

En primera instancia se definieron los parámetros en los cuales operará el sistema como marco de referencia empleando estimaciones de parámetros de operación coherentes e intuitivos de: Caudal de 5 a 20 L/s, un salto entre 6 a 15 m y una potencia de 0.1 a 1 kW, además de incluir un tanque de almacenamiento con capacidad de 1 a 10 m³ que permita suministrar un flujo constante de agua, estos parámetros ubican el sistema en la categoría de microcentral.

2.2.1 Volumen de agua disponible

Fueron seleccionadas 4 posibles zonas para implementar el sistema (ubicadas en la región del chocó biogeográfico): Buenaventura, Tumaco, Popayán y Quibdó. Obteniéndose datos de Pluviosidad Media [5], junto a las dimensiones de altura y área aproximada del techo de un coliseo local; el volumen de agua que será recolectada a lo largo de un año se calculó por medio de la ecuación (1).

$$V_{\text{año}} = Plv * \Omega_T \quad (1)$$

$V_{\text{año}}$: Volumen anual de precipitaciones. [m³]

Plv : Pluviosidad media. [m/año]

Ω_T : Área de Techo aproximada. [m²]

Los resultados se exponen en la tabla 1, de los cuales se seleccionó a Buenaventura para diseñar el sistema debido a presentar los mayores valores de volumen y altura.

Tabla 1 Análisis de pluviosidad por ciudad.

CIUDAD	Buenaventura	Quibdó	Popayán	Tumaco
PLUVIOSIDAD MEDIA [m/año]	6,275	8,13	2,127	2,292
ALTURA aprox. [m]	15	9	9	9
ÁREA DEL TECHO aprox. [m ²]	4200	2500	3600	2000
VOLUMEN ANUAL [m ³ /año]	26357,52	20325	7657,2	4584
VOLUMEN DIARIO [m ³ /día]	72,21	55,68	20,98	12,56

Fuente: elaboración propia.

2.2.2 Potencia disponible

Se estableció que el valor de potencia debiese ser superior al kilovatio con el fin de mitigar de la pérdida generada por las distintas eficiencias del sistema (Volumétrica, Mecánica, de transmisión, del generador), que podrían llevar a una generación muy inferior de la deseada. Para dicho cálculo se emplea la ecuación (2).

$$Pot = Q * \Delta P \quad (2)$$

Pot : Potencia [W]

Q : Caudal [m³/s]

ΔP : Cabeza de Altura [Pa]

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

2.2.3 Tiempo de operación de la turbina.

Debido a lo limitado del suministro de agua, se calcula el tiempo que llegará a operar la turbina con el caudal hallado anteriormente, empleando un cálculo simple estipulado en la ecuación (3).

$$t = V/Q \quad (3)$$

t : Tiempo estimado de operación [s]

V : Volumen de precipitación diario [m³]

Q : Caudal [m³/s]

Cabe aclarar que el volumen es una simplificación ya que se considera a la precipitación como constante en el tiempo y no se toman en cuenta las curvas de intensidad-duración-frecuencia de la región.

En la ecuación 3. a partir del volumen de agua diario y el caudal seleccionado, se calcula el tiempo de descarga; obteniéndose que la turbina puede llegar a operar aproximadamente 2 horas por día, sin embargo, esta operación no puede ser continua ya que implica la creación de un tanque capaz de almacenar 72 toneladas de agua en el techo de una estructura, por consiguiente, se diseña un tanque de una capacidad máxima de 10 m³ con el fin de generar 7 ciclos de llenado y descarga del mismo para mover la turbina, cada ciclo de vaciado constará de 17 minutos, dichos ciclos serán regulados por un sistema de control, activándose al momento que el tanque alberge su máxima capacidad y descargue hasta un nivel mínimo; dichos ciclos permiten a su vez que el sistema opere en temporadas con mayores o menores valores de pluviosidad diaria, aumentando o disminuyendo el número de ciclos de manera respectiva.

2.2.4 Selección del tipo de Turbina

Se inicia ingresando a la carta de selección de turbinas (ver figura 2). Para las condiciones de diseño del sistema, cuyo caudal rodea los valores de 10 l/s y la altura en un valor de 15 m, surgiendo solamente la posibilidad de aplicación de la turbina Michell-Banki, ya que se aproximan a sus límites de trabajo. Utilizando las leyes de semejanza y mediante una serie de iteraciones, se encontró que en las turbinas Kaplan, Francis y Pelton, los valores de diámetro exterior del rodete y revoluciones no se encuentran en el rango de aplicación, por las altas velocidades específicas recomendadas.

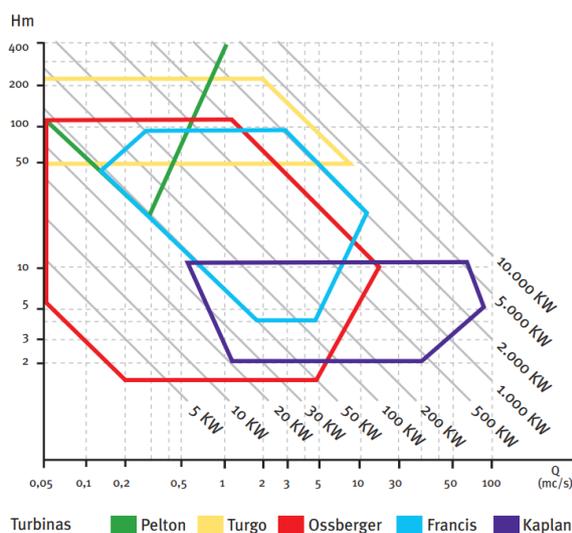


Figura 2. Diagrama de rangos de operación de distintos tipos de turbinas Fuente: instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE)[6].

Se decidió analizar y adoptar la posibilidad de una turbina Michell-banki, que presenta un rango de aplicación que abarca las condiciones de diseño del proyecto como se ve en la carta de selección. Con el valor de velocidad específica requerida en el proyecto, $N_s = 40.72$, y contrastando con los valores de la tabla 2, se confirma que se puede diseñar una turbina que cumple con la aplicación estipulada del tipo Michell-Banki.

Tabla 2. Velocidades Específicas de los Distintos Tipos de Turbinas.

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

Fuente: T. Lorzundy Salamanca, J.S. García García. “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander(UIS), 1983.

2.3 Cálculo de Pérdidas Hidráulicas

El análisis de pérdidas de fricción en la tubería, se realiza con el objetivo de conocer la disipación de energía o de altura piezométrica por el paso de agua mientras avanza por esta; se dividen en dos tipos, aquellas que son provocadas por cortante en la pared de la misma y las que son inducidas por sus componentes. La primera se distribuye a lo largo de la tubería y la segunda se analiza como discontinuidad de la línea piezométrica y en línea de energía, también es conocida como pérdidas menores, las ecuaciones presentes en esta sección son tomadas de los libros: Mecánica de Fluidos de Mott [7] y de Çengel [8].

En primer lugar, en el análisis de pérdidas, se deben buscar los parámetros que posee el fluido, comúnmente son la temperatura de operación, presión de operación, viscosidad tanto cinemática como dinámica, entre otros. Los cuales se establecieron para las condiciones de la ciudad de Buenaventura que posee una temperatura promedio de 26 °C y una presión de 100 KPa a partir de las cuales se establecen las siguientes propiedades del agua: (ρ) densidad, (γ) peso específico, viscosidad cinemática (ν) y viscosidad dinámica(μ).

Además, se considerarán los valores del diámetro de la tubería del sistema, longitud, caudal, rugosidad de la

tubería (en este caso será PVC), entre otros parámetros que se tengan ya determinados.

$$\begin{aligned} L &= 15 \text{ [m]} \\ D &= \frac{66}{1000} = 0.066 \text{ [m]} \\ Q &= \frac{10}{1000} = 0.01 \text{ [m}^3/\text{s]} \\ \varepsilon &= \frac{0.0015}{1000} \text{ [m]} \end{aligned}$$

Donde:

L : Longitud aproximada de la tubería.

D : Diámetro estimado de la tubería.

ε : Rugosidad absoluta del PVC.

Q : Caudal de descarga.

Desde el punto de vista académico la ecuación de Darcy-Weisbach, es la más utilizada y la más completa para todos los fluidos. Para implementar esta ecuación, se debe buscar el parámetro adimensional de Reynolds, que indica el grado de turbulencia que presenta el flujo en la tubería indicado en la ecuación (4).

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{v * D}{\nu} \quad (4)$$

Donde:

Re : Número de Reynolds.

ρ : Densidad. [kg/m^3]

v : Velocidad del Fluido. [m/s]

D : Diámetro de la sección. [m]

ν : Viscosidad cinemática. [m^2/s]

μ : Viscosidad dinámica. [$N \cdot s/m^2$]

Una vez realizada esta operación, se procede al cálculo del factor de fricción de Darcy (f) para encontrar las pérdidas de fricción de la tubería. Empleando el diagrama de Moody partiendo de los valores de Reynolds y la rugosidad relativa se determina dicho coeficiente.

Posteriormente se encuentra por medio de la ecuación (5) de C.F Colebrook, el factor de fricción a total turbulencia (f_T), indicador que permite estimar el valor de las pérdidas menores que son producidas por los accesorios instalados en el sistema de tubería.

$$\frac{1}{\sqrt{f_T}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f_T}} \right) \quad (5)$$

Donde:

f_T : factor de fricción a total turbulencia.

D : Diámetro estimado de la tubería. [m]

ε : Rugosidad absoluta del PVC. [m]

Se procede a hallar las pérdidas de fricción en la tubería debido al paso del agua (h_{LR}) partiendo de la ecuación de Darcy (6) y las pérdidas menores debido a los elementos que componen el sistema (h_{LM}), como se representa en la ecuación (7).

$$h_{LR} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

Donde:

h_{LR} : Pérdidas por fricción. [m]

f : Factor de fricción de Darcy.

L : Longitud aproximada de la tubería. [m]

D : Diámetro estimado de la tubería. [m]

v : Velocidad de flujo promedio [m/s]

g : Gravedad. [m/s^2]

$$h_{LM} = K_L \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Donde:

h_{LM} : Pérdidas menores. [m]

K_L : Constante de pérdida.

v : Velocidad de flujo promedio [m/s]

g : Gravedad. [m/s^2]

Para el cálculo de la constante de pérdidas menores, es importante realizar la suma de diferentes valores como se muestra en la ecuación (8), los cuales se encuentran estandarizados en el manual de CRANE [9] y su valor depende del accesorio utilizado.

$$K_L = \sum k_i \quad (8)$$

Donde:

K_L : Constante de pérdidas menores.

k_i : Constante de cada elemento.

En el caso actual, solo se incluyó una válvula de compuerta que permite el paso del líquido y el número 1, puesto que va de tanque al sistema, resultando la ecuación (10).

$$K_L = 0.5 + 8f_{T12} + 1 \quad (9)$$

Donde:

K_L : Constante de pérdidas menores

f_T : factor de fricción a total turbulencia.

Finalmente, la pérdida total del sistema es el resultado de la suma de h_{LR} y h_{LM} .

2.4 Diseño de la Turbina

El presente capítulo está basado en los apuntes para un manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas de la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE)[10], con referente a la turbina Michell Banki, además se incluyeron ecuaciones y conceptos deducidos por los ingenieros mecánicos Tomas Lerzundy Salamanca y José Saúl García García, estipulados en el proyecto de grado "Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbo-maquinas hidráulicas de la UIS", de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander en el año de 1983.

En primer lugar, se debe establecer unos parámetros que restrinjan los diferentes cálculos que se van a realizar y son de vital importancia al momento de

llevar a la práctica, ya sea para reducir espacio de aplicación o costos en el momento de ejecutarlo, estas variables representarían los conceptos básicos que se necesitan en una turbina para identificar otros como: potencia, velocidades específicas y revoluciones por minuto a las que debe trabajar el sistema, además, son parámetros que por lo general se pueden deducir del mismo lugar de ejecución, en este caso, ya que se asignó un tanque que podrá regular el caudal, se puede variar dependiendo a la pluviosidad del lugar, como también la altura a la que se encuentre el edificio a utilizar. Basado en lo anterior, se escogieron los siguientes valores y restricción para el presente análisis:

$$\begin{aligned} Q &= 10[L/s] = 0.010 [m^3/s] \\ H_N &= 15 [m] \\ D_E &= 0.20 [m] \\ N &< 1000 [rpm] \end{aligned}$$

Q : Caudal de descarga.

H_N : Altura.

D_E : Diámetro del rodete.

N : Revoluciones por minuto.

Estos parámetros no son definitivos, simplemente son indicadores que ayudan a evidenciar la veracidad de los cálculos correspondientes al sistema, con el fin de llevarlos a la práctica, es decir, el caudal puede variar como también el diámetro exterior del rodete. Con referente a la altura, solamente puede llegar a disminuir por pérdidas en la tubería y accesorios a utilizar; las revoluciones por lo general dependerán del generador a utilizar y el sistema de transmisión de potencia que se vaya a implementar, ya sea correas, engranajes o simplemente un acople directo con el eje de la turbina. Continuando con los conceptos involucrados en los sistemas de turbo máquinas, se encuentran las velocidades específicas, una depende del caudal a utilizar y la otra de la potencia obtenida de la turbina; las velocidades específicas han sido utilizadas para clasificar las turbinas dependiendo a su valor, comúnmente se sabe que un valor alto dependiente de la potencia, significa una turbina Kaplan y si es lo contrario sería una turbina Peltón; pero esto solamente es un indicador para clasificarlas. Los valores de velocidades específicas para cada uno de las turbinas son los estipulados en la tabla 2 Y dichos valores fueron calculados en las ecuaciones (10) y (11) [11].

$$N_Q = N * \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H_N^{\frac{4}{3}}} \quad (10)$$

$$N_S = N * \frac{P_T^{\frac{1}{5}}}{H^{\frac{4}{5}}} \quad (11)$$

Donde:

N_Q : Número de revoluciones específico según criterio europeo.

N_S : Número de revoluciones específico según criterio estadounidense.

Q : Caudal máximo de diseño [m^3/s].

H_N : Altura neta de trabajo [m].

P_T : Potencia al freno [Kw].

N : Numero de revoluciones [rpm].

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

$$Q = \frac{P_T}{9.807 * H * \eta_T} \quad (13)$$

$$D_E = \frac{39.85 * H^{0.5}}{N} \quad (14)$$

Donde

Q : Caudal [m^3/s].

P_T : Potencia al freno [Kw].

D_E : Diámetro externo del rodete [m].

H_N : Altura de trabajo [m].

η_T : Eficiencia de la turbina.

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

$$P_T = \frac{P_G}{\eta_G * \eta_{Tr}} \quad (14)$$

$$N = \frac{120 * F}{N_{polos}} \quad (16)$$

$$\eta_T = \eta_{Tr} * \eta_V * \eta_M * \eta_H \quad (17)$$

Donde:

P_T : Potencia al freno [Kw].

η_V : Eficiencia volumétrica.

η_H : Eficiencia Hidráulica.

η_M : Eficiencia Mecánica

P_G : Potencia máxima entregada al generador [Kw].

η_G : Eficiencia del generador.

η_{Tr} : Eficiencia de la transmisión mecánica utilizada.

N_{polos} : Número de polos del generador.

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

A partir de estos parámetros se procede a dimensionar los componentes de la turbina dicho proceso sigue la metodología propuesta en las referencias previamente mencionadas. En el cual se habla a detalle del rodete de la turbina Michell-Banki, el cual se caracteriza y se diferencia en que permite el paso del agua dos veces por el mismo, comúnmente se le llama turbina de flujo cruzado por este motivo, por consiguiente, es necesario el análisis de los triángulos de velocidades en cada una de estas etapas, tanto en la entrada como en la salida de cada una de ellas junto a la geometría de sus álabes como se observa en la figura 3.

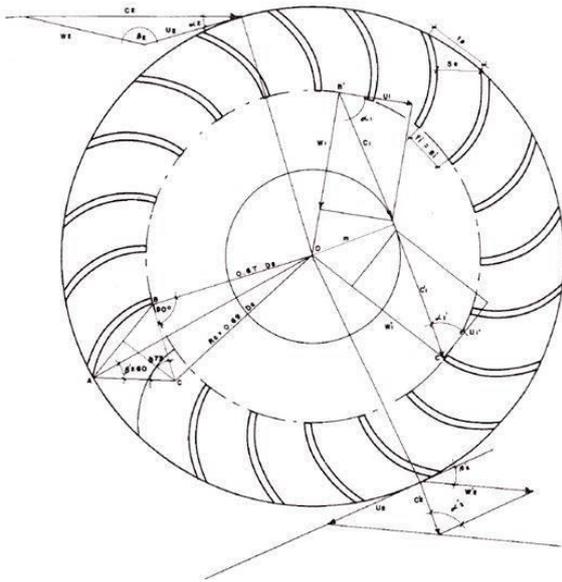
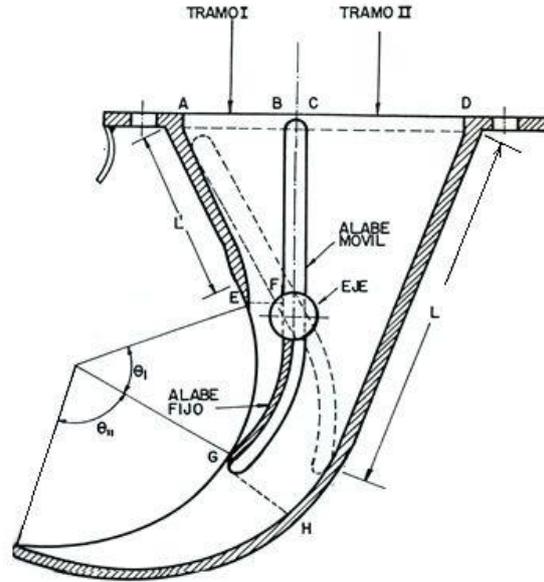


Figura 3. Diagrama de Velocidades de una Turbina Michell-Banki. Fuente: C. Hernandez, et.al. Apuntes para un Manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas-turbinas Michell Banki, OLADE (Organización Latinoamericana de Energía), 1988.

El otro elemento fundamental es el inyector cuya función principal es transformar la presión estática a presión dinámica o de velocidad, pero a su vez puede ser empleado para cambiar el caudal que ingresa a la

turbina. Además, es una pieza fundamental para el funcionamiento de una turbina Michell-Banki, ya que no solo acelera el flujo de agua, sino que a aprovechará al máximo la energía del mismo ejemplificado en la figura 4.



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

Figura 4. Dimensiones Primarias del Inyector. Fuente: T. Lerzundy Salamanca, J.S. García García. “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander(UIS), 1983.

3. Resultados y Discusión

Finalizados los respectivos cálculos se determinaron los parámetros de operación los cuales se presentan en la tabla 3, a partir de los cuales le dimensionó la respectiva turbina Michell-Banki la cual se puede observar el rodete e inyector en la figura 5.

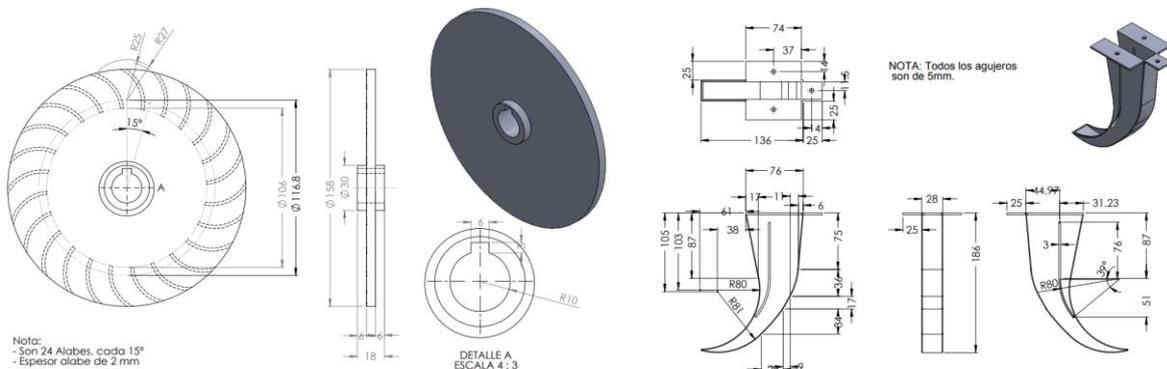


Figura 5. Planos del rodete e inyector diseñados. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Características generales del sistema

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA	
Caudal	10 [LPS]
Altura	15 [m]
Potencia	1,471 [kW]
Tiempo por ciclo	16,7 [min]
Numero de Ciclos por día	7
Volumen del tanque	10 [m^3]
Energía total disponible	3,87 [GJ]

Fuente: elaboración propia.

3.1 Diseño del banco de laboratorio

Con el fin de aportar al desarrollo de la investigación en este tipo de sistemas en la Universidad Industrial de Santander, se realizó el diseño de un banco de laboratorio para fomentar la práctica de los conceptos del funcionamiento de una turbina Michell-Banki, vertederos y generación a base de turbinas hidráulicas, tal como se puede apreciar en la figura 6.



Figura 6. Banco de laboratorio Turbina Michell-Banki. Fuente: elaboración propia.

3.2 Adaptabilidad a otras estructuras

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

$$E[J] = \frac{\Delta h * 9810 * Plv}{12} * \frac{1[W-h]}{3600[J]} \quad (18)$$

$$E_{m^2} \left[\frac{W-h}{m^2 * mes} \right] = 0.227 * \Delta h * Plv \quad (19)$$

Tabla 4. Producción de Energía por ciudad por m^2 .

CIUDAD / PAIS	PLUVIOSIDAD	ENERGÍA
	MEDIA	MENSUAL
Buenaventura / COL	6,275	$14 \frac{W-h}{m^2 * mes}$
Quibdó / COL	8,130	$18 \frac{W-h}{m^2 * mes}$
Popayán / COL	2,127	$5 \frac{W-h}{m^2 * mes}$
Barrancabermeja / COL	2.836	$6.5 \frac{W-h}{m^2 * mes}$
Hilo / USA	3.218	$7 \frac{W-h}{m^2 * mes}$
Kuala Lumpur / MYS	2.427	$5.5 \frac{W-h}{m^2 * mes}$
Bergen / NOR	2.250	$5 \frac{W-h}{m^2 * mes}$
Bombay / IND	2.258	$5 \frac{W-h}{m^2 * mes}$
Singapur / SGP	2.150	$5 \frac{W-h}{m^2 * mes}$

Fuente: elaboración propia.

3.3 Recomendaciones

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

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

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

Se debe ahondar más a fondo en la disposición final del agua recolectada, puesto como se mostró en el proyecto, esta permite sustentar fácilmente las

necesidades de una familia. Estas recomendaciones buscan permitir la implementación de este tipo de sistemas en viviendas familiares.

4. Conclusiones

El sistema “pluvio-eléctrico” discutido en el presente texto, se enfoca en la obtención de energía eléctrica a base de agua-lluvia adaptable para la región del chocó biogeográfico colombiano, específicamente a la ciudad de Buenaventura, dimensionado para operar bajo una pluviosidad de 6200 mm y proporcionar una potencia cercana a 1 KW. Definiendo como alternativa viable la utilización de una turbina tipo Michell-Banki que opera bajo un caudal aproximado de 10 LPS y una cabeza de 15 metros, seleccionados para cumplir los parámetros hidráulicos, demostrando así que la conceptualización y diseño de sistemas impulsados por precipitaciones son plausibles y viables desde el punto de vista ingenieril.

Esta tecnología puede ser implementada en distintas regiones a nivel mundial con precipitaciones considerables, pudiendo contribuir al mejoramiento de la calidad de vida en comunidades apartadas y con deficiencias sociales; sin embargo cabe destacar que por sí sola no es una solución energética a gran escala para edificaciones de alto consumo, por lo que se recomienda emparejarla con otros medios alternativos como paneles solares o turbinas eólicas o forme parte del suministro de agua potable en sistemas autónomos empleando la energía lograda en la purificación del agua.

Con el fin de poder implementar este tipo de sistemas en con un enfoque práctico se recomienda que futuros estudios consideren: la construcción de un prototipo que ejemplifique el funcionamiento del sistema o un análisis técnico económico que discuta la factibilidad financiera, además se sugiere estudiar una alternativa que busque maximizar la disponibilidad energética de este tipo de tecnología, considerando una mayor área de recolección, siendo una posibilidad la instalación de este de equipos similares en alcantarillados de agua-lluvia que aprovechan las superficies impermeables propiciadas por las ciudades.

Otra rama de investigación frente a este campo que puede ser abordada en un futuro es el cambio de elementos del sistema, siendo la turbina un enfoque crucial con el propósito de que esta pueda funcionar sin la necesidad de poseer un sistema de almacenamiento, siendo accionada por el flujo generado en precipitaciones intensas, pudiéndose diseñar como un accesorio más en los sistemas de disposición de agua lluvia.

5. Referencias

[1] R. Al Amin, S. H. Talukder. “Introducing Pico Hydro From Daily Used Water And Rain Water”. Mymensingh, Bangladesh”. Int. Journal of

Engineering Research and Applications (IJERA), Vol 4, issue 1(Version 2), 2014. Pp. 382-385.

[2] M. Shaleen, K. S. Abhay. “Analysis on Rainwater Harvesting and its Utilization for Pico Hydro Power Generation”. India: International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET) Volume 3 Issue, 2014.6p.

[3] M.S. Acosta Castro, J.S. Díaz Piedrahita. “Diseño y análisis de un sistema “pluvio-eléctrico” adaptable a la región del chocó biogeográfico colombiano”. Universidad Industrial de Santander (UIS), 2018. [PDF] Disponible: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/173402.pdf>

[4] T. Lerzundy Salamanca, J.S. García García. “Diseño y construcción de una turbina hidráulica Michell-Banki para el laboratorio de turbomáquinas hidráulicas de la UIS”, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander(UIS), 1983.

[5] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s.f). Atlas climatológico de Colombia [en línea]: Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

[6] Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE). Manuales de Energías Renovables-Minicentrales Hidroeléctricas, Madrid, España, octubre de 2006. [PDF] Disponible en: <https://www.idae.es/publicaciones/minicentrales-hidroelectricas>

[7] R. L. Mott, J. A. Untener. “Mecánica de Fluidos”. 7ma ed., pp. 181-187 2015. Pearson educación.

[8] Y.A. Çengel, J.M. Simbala. “Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones”. 4ta ed., pp. 366-379 2018. Mecánica de fluidos Fundamentos y aplicaciones

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

[10] C. Hernandez, et.al. Apuntes para un Manual técnico de diseño, estandarización y fabricación de equipos para pequeñas centrales hidroeléctricas-turbinas Michell Banki, OLADE (Organización Latinoamericana de Energía), 1988.

[11] P. Fernández Díez. Turbinas Hidráulicas [en línea]. Disponible en: <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=10>.