

Diseño y simulación de una Pequeña Central Hidroeléctrica para suplir la demanda de energía eléctrica en la vereda Monte dentro del Municipio de Pamplona

Alexander Carabali Alvarado

Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Semillero de Investigación PIENERGY, Centro de la Industria, la Empresa y los Servicios, Supervisor de redes de distribución de energía eléctrica, correo: alcarabalia@sena.edu.co

Resumen

El diseño y simulación de una Pequeña Central Hidroeléctrica [PCH] permite suplir la demanda energética de poblaciones no conectadas al sistema de distribución local de energía eléctrica, específicamente en la vereda Monte dentro. A través de la simulación mediante el software Mathworks Simulink, se logran establecer los parámetros de respuesta de señales eléctricas a partir de condiciones iniciales y de frontera, permitiendo predecir el comportamiento de la aplicación real. La metodología empleada es la Investigación Aplicada mediante la experimentación de las variables involucradas. Se logra establecer una potencia mecánica de salida del sistema de 12,2 kilovatios (kW) con un caudal disponible de 0,06 m³/s y con eficiencia de 81,75 % en la quebrada Cariongo. Con esta potencia mecánica se puede convertir a potencia eléctrica gracias a un generador eléctrico- asincrónico, obteniendo energía eléctrica que puede suplir demanda de 4 viviendas con instalación monofásica bifilar de 127 voltios (V) y 2 kilovoltamperios (kVA).

Palabras clave:

Eléctrico, energía hidráulica, generación, potencia.

Introducción

El aprovechamiento del caudal disponible a orillas de fuentes hídricas es la única alternativa que tienen muchas comunidades rurales para obtener agua potable y energía eléctrica o mecánica (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2015). Específicamente en la vereda Monte dentro existen comunidades que no se benefician de los servicios públicos domiciliarios como la energía eléctrica, entre otros. Su actividad económica principal es la agricultura, la cual suplen en gran parte con las fuentes hídricas disponibles, en este caso la quebrada Cariongo.

La implementación de proyectos de centrales hidroeléctricas requiere de fuertes inversiones públicas o privadas, por tanto, es necesario realizar un estudio de factibilidad técnica y simulación del sistema a implementar antes de realizar una inversión (Tiago et al., 2017). También, se deben considerar otros factores como la topografía, el caudal disponible, la cabeza de bombeo, entre muchos otros; para elegir el tipo de turbina, ya que este depende de la diferencia en la elevación entre la superficie de la cabecera arriba y la superficie del agua de cola debajo; igualmente depende del flujo promedio de agua (Sandoval Erazo, 2018).

Las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH), son la única fuente de suministro de energía eléctrica en áreas rurales como plantas de producción de madera, plantas de producción de productos agrícolas, instalaciones turísticas, centros de comunicación e instalaciones militares (Zivkovic et al., 2018).

Las fuentes de energía eléctrica se pueden clasificar en convencionales y no convencionales, estas últimas muy estudiadas e implementadas en la última década porque son sistemas que generan poco impacto ambiental, lo que las convierte en sistemas amigables con el medio ambiente que incluso favorecen económica y socialmente a las comunidades que las implementan (Ehigiamusoe & Dogan, 2022). Dentro de estos sistemas se encuentran las PCH, que generan energía a partir de la captación de agua de pequeños cauces. Las PCH se clasifican dependiendo de la capacidad energética, como lo son: las Mini Centrales Hidroeléctricas (100 a 1000 kW), Micro Centrales Hidroeléctricas (10 a 100 kW) y Pico Centrales Hidroeléctricas (1 a 10 kW) (Trujillo-Guayara, 2017).

La implementación de proyectos de fuentes alternativas de energía permiten ir acorde con la tendencia nacional y mundial de prevenir la generación de dióxido de carbono (CO₂) y el empleo de Hidrocarburos (Slocum & Gessel, 2022).

Una PCH es un conjunto de instalaciones que tiene como objetivo utilizar una pequeña cantidad de agua que circula por una cuenca hídrica, para así aprovechar la energía potencial y cinética que posee el fluido y transformar esta energía por medio de una turbina y un generador en energía eléctrica (Unidad de Planeación Minero Energetica [UPME], 2015).

El municipio de Pamplona es irrigado por varias fuentes hidrográficas, destacando entre ellas por su caudal y longitud la quebrada Cariongo y la quebrada El Rosal. Actualmente se dispone de dos (2) plantas principales de captación de agua potable: Cariongo y El Rosal; y tres (3) de captación veredales: Monte dentro, Ucuques y Morronegro (Alcaldía de Pamplona, 2015). La actual investigación de la PCH se proyecta para una comunidad de la vereda Monte dentro, que comprende un brazo de la quebrada Monte dentro, con las coordenadas WGS 84 en latitud, longitud, altura metros sobre el nivel del mar [m.s.n.m]: (7,346533; -72,6633286; 2541 m.s.n.m). La PCH tiene como característica trabajar con poco caudal de agua, entregando una potencia en vatios (W) y permitiendo dejar un caudal ecológico reglamentario del 25 % (Metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales, Resolución 865 de 2004), suficiente para suplir la demanda energética a una comunidad de 2 kVA por vivienda, existiendo un total de cuatro (4) predios aledaños al brazo de la quebrada Monte dentro.

Para el diseño de una PCH es de vital importancia la correcta selección de la turbina (Abeykoon & Hantsch, 2017); partiendo del caudal en metros cúbicos por segundo (m³/s) y la cabeza de altura disponible. Para establecer esas cantidades se dispone de estudios previos de anteriores investigaciones como datos de medición de alturas en metros (m) y caudales en litros por segundo (l/s) (Díaz et al., 2019). Para la simulación del sistema final, se requiere de modelado por el software Simulink, que permite predecir el comportamiento de todos los componentes del sistema con las condiciones iniciales y de frontera establecidas (Badano & Menéndez, 2021), por lo que se hace necesario emplear un modelo base que consta de bloques de generador

asincrónico, un transformador trifásico y un inversor de corriente continua (Acakpovi et al., 2014). Dicho modelo esta proyectado para grandes sistemas de generación hidroeléctrica, pero se adaptará a las escalas de las condiciones locativas de la quebrada Monte dentro (Serpoush et al., 2017). Con los datos de potencia mecánica en W y las revoluciones por minuto (RPM) entregados por la simulación se desarrolla el estudio de selección técnica del generador eléctrico, y con la demanda máxima energética de la comunidad se proyecta la carga máxima en kVA a suplir.

Metodología

Se llevó a cabo un tipo de investigación cuantitativa- experimental, puesto que se desarrolló un pretratamiento físico, medición del caudal, formulación del diseño propuesto y análisis costo-beneficio del proyecto. En lo que respecta a las variables, se usó para la variable dependiente la potencia mecánica en W que entrega la turbina hidráulica seleccionada y para las variables independientes: caudal de agua (Q) en m³/s en quebradas o brazos del río Pamplonita y generador hidrodinámico más cabeza de bomba (H) en m de la sección de la quebrada Monte dentro. Por otro lado, para la recolección de datos durante la investigación se utilizaron métodos sencillos de determinación de caudales y desniveles en el brazo de la quebrada en cuestión.

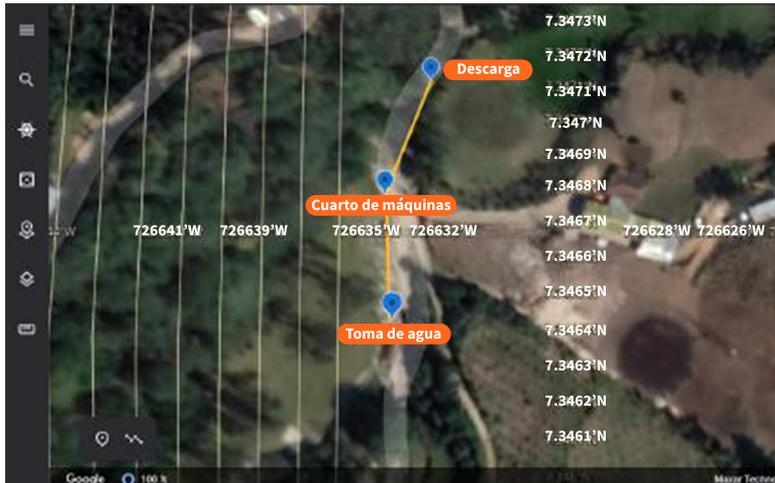
Para la selección técnica de la turbina se debe tener estimación de los caudales máximo y mínimo que entregan las diferentes quebradas del municipio de Pamplona. Para la quebrada Monte dentro, se tiene un caudal máximo de 0,10971 m³/s y un caudal mínimo de 0,06886 m³/s (Alcaldía de Pamplona, 2015).

Para poder determinar el caudal instantáneo de la quebrada se utilizó el método de área-velocidad, recomendado por el Manual piragüero del Programa Integral Red Agua, (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia [CORANTIOQUIA], 2014). El método consiste en medir el tiempo empleado por un objeto flotante en recorrer una longitud determinada de una cuenca, conociendo previamente el área de sección transversal media de la misma. Se procede a calcular el volumen medio y se

divide entre el tiempo medido con un cronometro, en segundos. La toma de datos se dio en la ubicación WGS 84 en latitud, longitud, altura m.s.n.m: (7,346533; -72,6633286; 2541 m.s.n.m), ver Figura 1.

Figura 1

Ubicación de la toma de caudales y alturas.



Nota. Toma propia de la investigación (2021).

Por cada iteración de ensayo se calcula el volumen instantáneo, siguiendo la Ecuación 1.

Ecuación 1

Cálculo del Volumen

$$V = A * L$$

Nota. Volumen es a Área de Sección Transversal por Longitud (Giancoli, 2006). Donde V es el volumen a calcular en cm^3 ; A es el área de sección transversal de la quebrada en cm^2 y L es la longitud la cual se desplaza el objeto flotante en cm.

Para Calcular el caudal en cm^3/s se divide algebraicamente el volumen calculado y el tiempo en segundos (s), medido en el cual tarda el objeto flotante en recorrer la longitud L. Ver Ecuación 2:

Ecuación 2

Cálculo de Caudal

$$Q = \frac{V}{t}$$

Nota. Caudal es a Volumen sobre tiempo en segundos. Se puede definir también como flujo volumétrico, producto de la velocidad del fluido por la sección transversal. (Serway & Jewett, 2008)

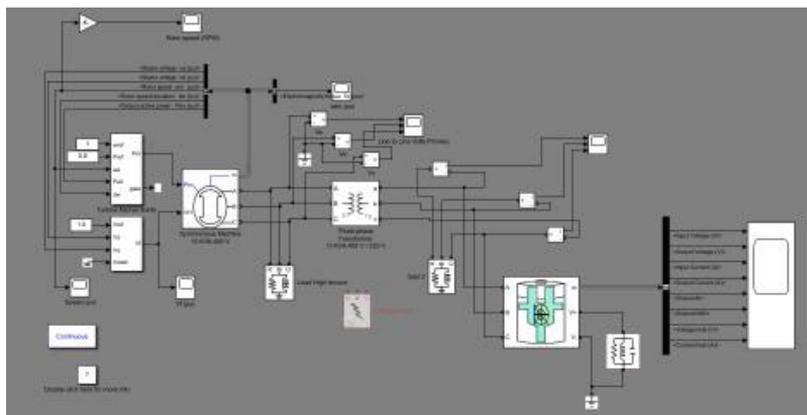
Medición de Desnivel: Debido a la deformidad del terreno y de no disponer de un Teodolito, se logró realizar la medición del desnivel o caída de la quebrada con el método convencional, por niveles de agua y manguera de 1/2", realizando cinco (5) pruebas cada 2 m; logrando así establecer una caída de nivel de hasta un máximo de 2 m en los 13 m de longitud.

Simulación del Sistema: El modelo de control que se utilizó en Simulink como base fue el desarrollado por Acakpovi, Hagan, y Fifatin (Acakpovi et al., 2014). Este comprende diferentes bloques con las variables que intervienen en un sistema sencillo de generación de energía hidráulica.

El sistema en particular utiliza bloques de programación que contienen las variables mecánicas que excitan el generador sincrónico. Para efectos de la investigación, se utilizó el modelo adaptado por Reinaldo Díaz (Díaz et al., 2020), en el cual se editaron los valores a una escala más acorde a las condiciones de los caudales y alturas locales, además se incluyeron nuevas etapas en el sistema de control. El modelo adaptado se encuentra en la Figura 2.

Figura 2

Modelo configurado para la simulación.



Nota. Toma propia de la investigación (2021).

Para la simulación de la posible implementación de la PCH en la quebrada Monte dentro se adaptó el anterior modelo a la escala adecuada. El bloque mecánico de la turbina Michell Banki se modificó con una eficiencia del 80 % y el bloque de la maquina sincrónica se adaptó a un generador comercial de 10 kVA, 400 voltios de corriente alterna (VAC) trifásico, 80 % de eficiencia y 1500 RPM. El transformador trifásico se modificó por uno de 10 kVA, de 400 VAC a 220 VAC.

Resultados y discusión

Caudal Medio por método de Área-Velocidad 3,2. Se tomó el 85 % del caudal ecológico disponible en la quebrada, dejando disponible un 15 % (Metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales, Resolución 865 de 2004), teniendo en cuenta que el caudal mínimo de la quebrada Cariongo es de $68.86 \text{ m}^3/\text{s}$ (0.0688 L/s) y el caudal máximo es de $109.71 \text{ m}^3/\text{s}$. Ver Tabla 1: Caudal Medio por Método de Área-Velocidad (0.10971 L/s), se estima que:

Tabla 1*Caudal Medio por Método de Area-Velocidad*

Iteraciones	1	2	3	4	5	6	7	8
Distancia A-B (L) en m	7	7	7	7	7	7	7	7
Ancho (A) en m	1,3	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,35	1,25
Profundo (H) en m	0,10	0,09	0,10	0,11	0,12	0,10	0,085	0,1
Tiempo (t) en s	9,88	9,73	11	10,3	9,7	9,89	9,53	9,9
Volumen calculado (V) en m ³	0,91	0,76	0,86	0,92	1,01	0,91	0,8	0,88
Caudal Calculado (Q) en m ³ /s	0,09	0,08	0,08	0,09	0,1	0,09	0,08	0,09
Caudal Calculado (Q) en L/s	92,71	77,7	78,59	89,71	103,92	92,01	84,29	88,38

Nota. Fuente propia de la investigación (2021).

Tabla 2*Caudal Ecológico*

	Caudal Disponible	Caudal Ecológico del 0,85
Caudal Mínimo en m ³ /s	68,86	58,531
Caudal Máximo en m ³ /s	109,71	93,254

Nota. Tomado de Metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales, Resolución 865 de 2004: Artículo 3.4.2.

Tabla 3*Desnivel y cabeza de bombeo*

Tramo medido	Desnivel	
	Distancia de Tramo en m	Distancia de Tramo en m
1	0	0
2	2,2	0,9
3	4,4	1
4	6,6	1,28
5	8,8	1,7
6	11,1	1,67
7	13,3	1,93

Nota. Fuente propia de la investigación (2021).

Para el cálculo de la potencia útil, se empleó la expresión de Bernoulli, considerando el agua como un fluido incompresible con pérdidas cercanas a cero en tubería y accesorios. Para ello empleamos la Ecuación 3:

Ecuación 3

Cálculo de Potencia Hidráulica de Bernoulli

$$P = Q * H * \gamma$$

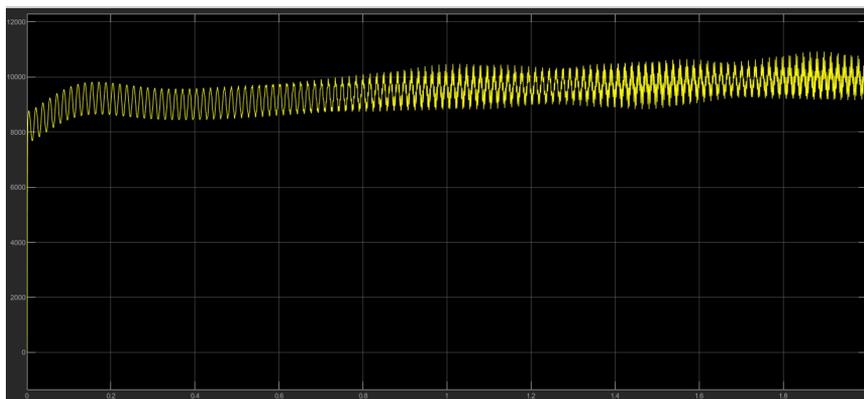
Nota. Q es el caudal medio ecológico medido, en m³/s; H la cabeza de bombeo en m y γ el peso específico del agua. (Serway & Jewett, 2008)

Con los valores obtenidos en la investigación para Q=0,06 m³/s; H=21m y γ =9780,4 N/m³; la potencia de bombeo que entregaría el sistema de generación hidroeléctrico a pequeña escala es de 12,232 kW.

Resultados de la simulación por modelo en Simulink - MATHWORKS R2020a.

Figura 3

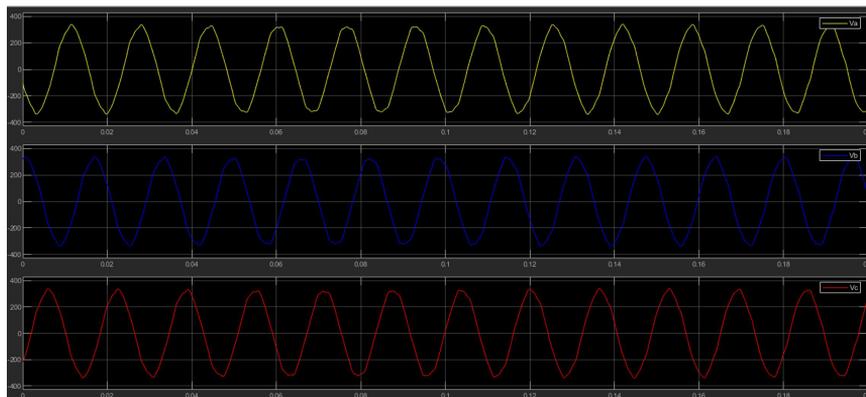
Potencia Mecánica Simulada



Nota. Valor medio de 10 a 11 kW. Creación propia (2021).

Figura 4

Voltajes Fase-Fase de salida del alternador



Nota. 220 V; por fase. Creación propia (2021).

De los valores obtenidos en la medición por el método de área-velocidad, el caudal promedio fue de $0,0875 \text{ m}^3/\text{s}$. Aplicando el valor medio de las 8 iteraciones realizadas en la Ecuación 4.

Ecuación 4

Cálculo del Caudal medido promedio

$$Q_m = \frac{\sum_{n=1}^8 Q_n}{8} \quad Q_m = 0,0875 \text{ m}^3/\text{s}$$

Nota. Propio de la investigación (2021).

A partir del caudal medio de $0,0875 \text{ m}^3/\text{s}$, aplicando un factor de reducción de caudal ecológico de 0.85 y teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos de Caudal de la Quebrada Cariongo (Alcaldía de Pamplona, 2015), el caudal utilizado para el diseño de la central hidroeléctrica es de $68.86 \text{ m}^3/\text{s}$.

El caudal medio está dentro de los caudales disponibles en temporadas secas y lluviosas (Amiri et al., 2016), además de dejar disponible el caudal mínimo del 15 %.

La potencia mecánica máxima en kW que puede llegar a impulsar la turbina es de 12.232 kW, teniendo en cuenta las pérdidas en el eje, pérdidas en el cobre y pérdidas magnéticas; es conveniente seleccionar un alternador eléctrico de 10 kW, dimensionando el sistema con una eficiencia de 81.75 % (Abeykoon & Hantsch, 2017). Ver Ecuación 5.

Ecuación 5

Eficiencia de maquina eléctrica real

$$n = \frac{P_{elec}}{P_{mec}}$$

Nota. Tomado de Abeykoon & Hantsch (2017).

De acuerdo con la ubicación de Google Earth, y teniendo en cuenta la proyección de ubicación del cuarto de máquinas, el tramo total de cabeza de bomba es de 21 m. Esta longitud representa la longitud total de tubería desde la toma de agua hasta la succión de la turbina.

Se selecciona una turbina de tipo Michell-Banki (Polák et al., 2016), ya que se dispone de una potencia hidráulica entre 10 y 15 kW, y un caudal entre los 0,1 y 0,2 m³/s. Se selecciona un alternador de 10 kW a 220 VAC y 1300 R.P.M, el cual se acoplará al eje de la turbina Michell-Banki. Para el diseño del modelo de simulación no se tuvieron en cuenta inestabilidades generadas por el ambiente o agentes externos (Kougias et al., 2019) ya que se consideran, debido a la pequeña escala del sistema, despreciables.

La turbina seleccionada para la simulación es la Michell Banki (de 12 kW), que en comparación con una Kaplan (294 kW) (Abeykoon & Hantsch, 2017) y una Pelton (0,134 kW) (Espitia-Rodríguez, 2013) , es económica y de fácil diseño, obteniendo una Potencia considerable, y se ajusta a las condiciones locales de Caudal. Un 16,4 % de la energía producida en el mundo es Hidroeléctrica en contraste con un 70 % de la energía

producida en Colombia que es de origen hídrico (Ministerio de Minas y Energía [Minenergía], s.f.). La tendencia de aprovechamiento de energía Nacional y Global es hacia las fuentes hídricas.

Tabla 4

Demanda en kVA por vivienda

Detalle Circuito	Cantidad	Volataje	Carga	Carga Total	Factor de potencia	Demanda de energía
Unidad	Und	V	W	W		kVA
Iluminación Led	8	127	6	48	0,95	50,53
Licuadaora	1	127	300	300	0,95	315,79
Nevera	1	127	70	70	0,95	73,68
Toma Uso General	4	127	180	720	0,95	757,89
Computador	1	127	500	500	0,95	526,32
Tv Led	1	127	300	300	0,95	315,79
Cargador De Celular	2	127	10	20	0,95	21,05
Reserva						
Carga Total			1958	1958	0,95	2061,05

Nota. Fuente propia de la investigación (2021).

La pico central hidroeléctrica tendría suficiente capacidad para suplir la demanda energética de cuatro (4) viviendas, cada una con una demanda máxima diversificada de 2 kVA a una tensión de servicio de 127 VAC.

Conclusiones

En la zona de la quebrada Monteadentro en estudio, el caudal ecológico disponible es de 0,06 m³/s, para un desnivel de 1,93 m. La longitud total de cabeza de bombeo es de 21m.

Los resultados de la simulación demuestran que es factible utilizar una turbina de tipo Michell Banki acoplada al generador seleccionado sin afectar el funcionamiento normal de los equipos. Las señales de onda de entrada y salida de generador son estables y dentro del funcionamiento esperado. La respuesta de las señales eléctricas demostró un comportamiento normal. El transformador trifásico baja a baja de 10 KVA, entrega 220 voltios y 5 amperios por fase.

La pico central hidroeléctrica tiene capacidad suficiente para suplir la demanda de energía de 4 viviendas de 2 kVA de carga cada una, con una tensión fase neutro de 127 VAC, con conexión tipo monofásico bifilar.

Referencias

- Abeykoon, C. & Hantsch, T. (2017, del 8 al 10 de junio). Design and analysis of a Kaplan turbine runner wheel [conference]. *Proceeding of the 3rd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'17)*, Rome, Italy.
<https://vdocuments.net/design-and-analysis-of-a-kaplan-turbine-runner-wheel-151-3-the-head-h-is-difference.html?page=1>
- Acakpovi, A., Hagan, E. & Fifatin, F. (2014). Review of Hydropower Plant Models. *International Journal of Computer Applications*, 108(18), 33–38.
<https://doi.org/10.5120/19014-0541>
- Alcaldía de Pamplona. (2015). *Plan básico de ordenamiento territorial municipio de Pamplona*.
<https://es.scribd.com/document/403135887/DIAGNOSTICO-PBOT-PAMPLONA-pdf>
- Amiri, K., Mulu, B., Cervantes, M. & Raisee, M. (2016). Effects of load variation on a kaplan turbine runner. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 9(2), 182-193.
<https://doi.org/10.5293/IJFMS.2016.9.2.182>
- Badano, N. & Menéndez, Á. (2021). Numerical modeling of Reynolds scale effects for filling/emptying system of Panama Canal locks. *Water Science and Engineering*, 14(3), 237–245.
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.03.006>
- Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia [CORANTIOQUIA]. (2014). *Manual Piragüero, Medición de Caudal*.
<https://cia.corantioquia.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=15916&viewallitems=1>

- Díaz, R., Morales, A., Castro, G. y Carabali, A. (2020). Diseño e implementación de una pequeña central hidroeléctrica (pch) en zona rural del municipio de Pamplona - Norte de Santander. *Red Latinoamericana de Jóvenes e Investigadores*, 1 (12), 318–320. <http://fundacionlasirc.org/images/Revista/Volumen1.No.12DERECHOEINGENIERIA.pdf>
- Ehigiamusoe, K. & Dogan, E. (2022). The role of interaction effect between renewable energy consumption and real income in carbon emissions: Evidence from low-income countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111883. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111883>
- Espitia-Rodríguez, S. (2013). *Diseño De Una Pequeña Central Hidroeléctrica a Escala Laboratorio Utilizando Aguas Lluvias Del Bloque a De La Universidad Libre, Sede Bosque Popular* [Tesis maestría, Universidad Libre Colombia]. Repositorio Institución Unilibre. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11325>
- Expotecnología. (2019). Desafíos en Ingeniería investigación aplicada. En A. Carabali, J. Flórez y W. Jaimes. (Eds.). Estudio de factibilidad técnica para implementación de un sistema híbrido de tornillo sin fin hidrodinámico y generador eólico, en zonas rurales del Municipio de Pamplona, Norte de Santander (pp. 191-202). Ediciones TECNAR Cartagena de Indias (Vol. 19, pp. 191–202).
- Filho, G., Santos, I. & Barros, R. (2017). Cost estimate of small hydroelectric power plants based on the aspect factor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.134>
- Giancoli, D. (2006). *Física: principios con aplicaciones* (V. Campos, Trad.; 6.ª ed.). Pearson Educación. (Trabajo original publicado en 2005).
- Kougias, L., Aggidis, G., Avellan, F., Deniz, S., Lundin, U., Moro, A., Muntean, S., Novara, D., Pérez-Díaz, J., Quaranta, E., Schild, P. & Theodossiou, N. (2019). Analysis of emerging technologies in the hydropower sector.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109257>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial República de Colombia (Agosto, 4, 2004). Resolución 865 de 2004. *Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.*

https://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Resolucion_865_20040722.htm

Ministerio de Minas y Energía [Minenergía]. (s.f). Participación global de la generación de la electricidad.

<https://www.minenergia.gov.co/historico-de-noticias?idNoticia=24094573>

Polák, M., Polák, V. & Hudousková, M. (2016, del 7 al 9 de septiembre). Verification of model calculations for the Kaplan Turbine design [conference]. *6th International Conference on Trends in Agricultural Engineering*, Prague, Czech Republic.

http://www.researchgate.net/publication/322757647_Verification_of_Model_Calculations_for_the_Kaplan_Turbine_Design

Sandoval Erazo, W. (2018). Conceptos Básicos de Centrales Hidroeléctricas. En Sandoval, W. (Ed.), *Diseño de Obras Hidrotécnicas* (pp.245-277). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

http://www.researchgate.net/publication/326560960_Capitulo_6_Conceptos_Basicos_de_Centrales_Hidroelectricas

Serpoush, B., Khanian, M. & Shamsai, A. (2017). Hydropower plant site spotting using geographic information system and a MATLAB based algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 152.

<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.095>

Serway, R. & Jewett, J. (2008). *Física Para Ciencias e Ingeniería*. (V. Campos, Trad.; 7.ª ed.). CENGAGE Learning (Trabajo original publicado en 2008).

<http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisgenI/T/Libros/Serway-7Ed.pdf>

- Slocum, A., & Gessel, D. (2022). Evolving from a hydrocarbon-based to a sustainable economy: Starting with a case study for Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111750. <http://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111750>
- Tiago, G., Silva, I. & Mambeli, R. (2017). Cost estimate of small hydroelectric power plants based on the aspect factor. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.134>
- Trujillo-Guayara, A. (2017). *Diseño de una pico central hidroeléctrica en la localidad de Usme, Bogotá* [Tesis pregrado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia - RIUCaC. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15273>
- Unidad de Planeación Minero Energetica [UPME]. (2015). *Hidroenergía*. Ingfocol Ltda. Potencial Hidroenergético de Colombia (pp.25-36). https://www1.upme.gov.co/Energia_electrica/Atlas/Atlas_p25-36.pdf
- Zivkovic, S., Cerce, L., Kostic, J., Majstorovic, V., & Kramar, D. (2018). Reverse engineering of turbine blades Kaplan's type for small hydroelectric power station. *Procedia CIRP*, 75, 379–384. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.037>