

Emisiones de CO₂ de una turbina Pelton en laboratorio para condiciones de caudal entre 0.1 l/s y 0.2 l/s

CO₂ Emissions from a Pelton Turbine in Laboratory from Flow Conditions between in 0.1 l/s and 0.2 l/s

Camilo Andrés Beltrán Prieto¹
María Fernanda Guevara Martínez¹
Gabriel de Jesús Camargo Vargas¹
Camilo Andrés Arias Henao²

¹Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre Bogotá, Colombia. Email: camiloa.beltranp@unilibrebog.edu.co, mariaf.guevaram@unilibrebog.edu.co, gabriel.camargov@unilibrebog.edu.co.

²Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Bogotá, Colombia. Email: carias@udistrital.edu.co.

 OPEN ACCESS



Copyright:

©2021. La revista *Ingenierías USBmed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución no comercial SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Tipo de artículo: Investigación.

Recibido: 22-06-2020.

Revisado: 01-09-2020.

Aprobado: 06-04-2021.

Doi: 10.21500/20275846.4789

Referenciar así:

C. A. Beltrán Pietro, M. F. Guevara Martínez, G. J. Camargo Vargas y C. A. Arias Henao, "Emisiones de CO₂ de una turbina Pelton en laboratorio para condiciones de caudal entre 0.1 l/s y 0.2 l/s," *Ingenierías USBMed*, vol. 12, no. 1, pp. 43-48, 2021.

Disponibilidad de datos:

todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

Conflicto de intereses:

los autores han declarado que no hay conflicto de intereses.

Editor: Andrés Felipe Hernández.
Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

Resumen. Este trabajo estudia a escala de laboratorio la eficiencia de la turbina Pelton en un rango de caudal entre 0,1 L/S y 0,2 L/S, con el propósito de cuantificar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) emitidas a partir de su operación y el resultado compararlo con el consumo energético de un hogar piloto.

Por consiguiente, es necesario contemplar diferentes métodos de obtención de energía, que aporten una disminución en el impacto al medio ambiente.

Palabras Clave. Emisiones, CO₂, Turbina Pelton, Eficiencia, Energía eléctrica, Potencia.

Abstract. This paper studies to laboratory scale the efficiency of the Pelton turbine in a flow range between 0,1 L/S y 0,2 L/S, with the purpose of quantify emissions of carbon dioxide (CO₂) from operation and the result compare with the energy consumption of a pilot home.

Therefore, it is necessary to consider different methods of obtaining energy, with provide a decrease in the impact on the environment.

Keywords. Emissions, CO₂, Pelton Turbine, Efficiency, Electric energy, Power.

I. Introducción

El presente estudio tiene como objetivo principal calcular las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) equivalentes a una turbina Pelton a escala de laboratorio, con el fin de contrastar la reducción de emisiones frente a un hogar piloto en la ciudad de Bogotá.

Las emisiones de CO₂ son una de las principales causas del cambio climático [1], estas aumentaron anualmente en torno a un 80% entre 1970 y 2004, por lo que se evidencia un incremento en la temperatura del planeta [2], lo que ha generado compromisos de mitigación a nivel mundial: un claro ejemplo es el protocolo de Kyoto [3], donde se establece la disminución de emisiones producidas por las actividades antrópicas [4].

Un impacto asociado es la generación de energía eléctrica, la que trae consigo efectos negativos como el deshielo de glaciares, cambios de humedad, acidificación del océano, incendios, entre otros, generando riesgos sobre los recursos naturales [5]. A partir de estudios de investigación de diferentes autores como “Emisiones de CO₂ en hogares urbanos. El caso del Distrito Federal” de Cruz I. [6] y “Consumo de energía y emisiones de CO₂ del autotransporte en México y escenarios de mitigación” de Solís J, *et al.* [7], se ha demostrado en diferentes escenarios que el cambio climático ha aumentado a través de los años por la alta generación de gases de efecto invernadero, creando la necesidad de generar medidas de mitigación de impactos y diversificar los métodos de obtención de energía eléctrica [8], con el fin de prevenir las consecuencias que se pueden presentar en el futuro, tales como el impacto de la huella de carbono, la duración de nuestros recursos naturales y la reducción del calentamiento global [4].

Debido a las implicaciones que traen consigo las emisiones de CO₂, se busca conocer si la turbina Pelton presenta una disminución de emisiones, en comparación con las generadas por la empresa productora de energía eléctrica de la ciudad de Bogotá; esto, con el fin de contrastar el gasto de energía eléctrica en ambos sistemas e identificar cual presenta una mayor reducción de emisiones de CO₂.

En función de lo anterior, se tuvo en cuenta la relación entre el gasto de energía eléctrica y la eficiencia de la turbina, soportados en las leyes de semejanza [9], para ello se calculó la eficiencia de la turbina a pequeña escala trabajando con caudales entre 0.1 l/s y 0.2 l/s, determinados como caudales bajos, característica que hace parte de una de las propuestas de impacto en la producción de hidroenergía, explicadas por la Organización Latinoamericana de Energía (Olade), como el desarrollo de reglas adaptativas de manejo y ejecutar modificaciones como la selección de turbinas de flujos bajos [5].

II. Desarrollo

Se buscó una turbina con bajos caudales, que cumpliera con dimensiones reducidas [10], por ello, se eligió la turbina Pelton. Se contó con un fácil acceso, debido a que se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad Libre.

La turbina Pelton elaborada por la empresa Edibon International, ubicada en las instalaciones de la Universidad Libre, cuenta con una válvula de aguja retráctil que permite regular el flujo, dispone de un manómetro colocado a la entrada de la turbina que mide la presión de entrada (presión de descarga de agua), además cuenta con un freno de cinta, conectado a dos dinamómetros, cada uno de ellos registra una fuerza expresada en nanómetros, los cuales permiten variar la carga suministrada a la turbina mediante un dispositivo de conexión (Figura 1).



Figura 1. Turbina Pelton Edibon. Fuente: Manual Turbina Pelton Edibon

El banco hidráulico es el equipo que permite el flujo del agua para el funcionamiento de la Turbina Pelton, que consiste en un depósito sumidero de alta capacidad, cuenta con una válvula para regular el caudal, tiene una escala para medir el volumen que ha sido descargado y un rebosadero que devuelve el excedente de agua a dicho depósito (Figura 2), evitando así pérdidas del recurso. Con la medición brindada por la escala para medir el volumen descargado y el tiempo se calcula el caudal suministrado para la prueba.



Figura 2. Banco Hidráulico Edibon. Fuente: Manual Turbina Pelton Edibon

En el laboratorio, para hallar la eficiencia de la turbina, se obtienen las revoluciones por minuto (3) y la velocidad del eje, medidas con el Tacómetro Lutron DT-2236 (Figura 3), los caudales trabajados, la potencia y las caídas de presión, determinados mediante las leyes de semejanza para turbinas hidráulicas, con el fin de realizar una relación con la energía producida según el caudal suministrado.



Figura 3. Tacómetro Lutron DT-2236. Fuente: TECPEL Co., Ltd

Se realizaron mediciones a escala de laboratorio con caudales entre 0.1 l/s y 0.2 l/s, ejecutando el trabajo con un caudal constante.

Los valores utilizados para la realización de los cálculos en el presente proyecto se simplifican mediante símbolos, consignados en la siguiente tabla.

Tabla 1. Lista de símbolos.

Dimensiones	Símbolo	Unidades
Eficiencia de la turbina	nt	P_{mec}/P_w
Potencia disponible	P_w	$\frac{J}{s}$
Potencia producida	P_{mec}	$\frac{J}{s}$
Caudal	Q	$\frac{m^3}{s}$
Gravedad	g	$\frac{m}{s^2}$
Peso específico del agua	γ	$\frac{kg}{s^2m^2}$
Altura dinámica	HT	m
Velocidad de giro	n	RPM
Velocidad angular	ω	$\frac{Rad}{s}$
Torque	M	nm
Emissiones de CO2	ECO2	kgCO2/año
Consumo energético	CE	kWh/año
Factor de emisión	FE	$\frac{kgCO2}{kWh}$

Con el objetivo de determinar la eficiencia de la turbina, se sigue el procedimiento propuesto por el fabricante Edibon [11], en el cual se establecen ecuaciones para conocer la potencia producida por la turbina (P_{mec}) y la potencia disponible por la turbina (P_w), teniendo en cuenta que son variables fundamentales presentes en las ecuaciones (2, 3 y 4) para realizar el cálculo.

En la ecuación 1, la eficiencia de la turbina (nt) fue presentada en porcentaje determinando la relación entre P_{mec} y P_w por la turbina.

$$\%nt = \frac{P_{mec}}{P_w} \times 100 \quad (1)$$

En la ecuación (2), la potencia disponible por la turbina (P_w) con unidades en J/s; depende directamente del caudal (Q) que recibe en $\frac{m^3}{s}$; de la gravedad a la cual está sometido el fluido en $\frac{m}{s^2}$; del peso específico del agua (γ) en $\frac{kg}{s^2m^2}$; y de la altura dinámica (HT) con la unidad de m [12].

$$P_w = \gamma \cdot Q \cdot HT \cdot g \quad (2)$$

En la ecuación (3), la velocidad angular (ω) de la turbina está medida en $\frac{Rad}{s}$, ésta depende directamente de la velocidad de giro (n), medida en (RPM).

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

La ecuación (4) establece la potencia producida por la turbina, estableciendo que el torque de la turbina (M) está medida en nanómetros (nm) y la velocidad angular en $\frac{Rad}{s}$.

$$P_{mec} = M\omega \quad (4)$$

Una vez calculada la potencia disponible (P_w) por la turbina (5), se logró hallar la relación entre el funcionamiento de la turbina y la generación de CO2 en el desarrollo del sistema (6), estableciendo una relación directa entre el consumo energético (CE) y las emisiones de CO2 (ECO2), teniendo en cuenta el factor de emisión (FE) que se atribuye al suministro eléctrico necesario para cubrir el consumo [13], con el fin de conocer la posibilidad de reducir la huella de carbono producto de las actividades cotidianas, disminuyendo su influencia en la alteración de los recursos naturales.

$$P_w(Kw/h) \quad (5)$$

$$ECO2=CE \cdot FE \quad (6)$$

El factor de emisión (FE) es expedido anualmente por la unidad de planeación minero-energética (UPME) [14].

Tabla 2. Valores obtenidos en medición.

Variable	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Promedio
Volumen (L)	2.2	2	1.8	2
Tiempo (s)	8.41	10.38	8.63	9.14
Caudal (L/s)	0.2332	0.1927	0.2306	0.2188
Fuerza 1 (N)	4.3	4.3	4.3	4.3
Fuerza 2 (N)	0.4	0.4	0.4	0.4
(W) Velocidad angular (rpm)	860.7	366.9	843.6	690.4
(Ht) Altura (M)	3.309	2.859	3.024	3.064

III. Resultados

Se procedió con la recolección de datos en laboratorio, se tabularon los valores registrados, para hacer más confiable el dato a evaluar, se llevó a cabo la medición por triplicados, sacando de allí un promedio de cada variable como puede verse en la Tabla 2.

Los resultados tabulados a continuación fueron, algunos tomados en laboratorio como el volumen, el tiempo, las fuerzas y la velocidad angular y otros calculados mediante correlaciones, como el caudal y la altura.

La velocidad de giro (n) hace referencia a la cantidad de revoluciones de la turbina en una unidad de tiempo, dichas revoluciones son medidas por el tacómetro ubicado en el eje de rotación de la turbina.

Para realizar el cálculo de potencia se empleó la ecuación (2), teniendo en cuenta los datos recolectados en la tabla anterior. El resultado obtenido fue de $6.57 \frac{J}{s}$.

$$P_w = 9800 \frac{kg}{s^2 m^2} \times 0.000219 \frac{m^3}{s} \times 3.064m = 6.57 \frac{J}{s} \quad (7)$$

Para obtener la velocidad angular de la turbina, se empleó la ecuación (3), dando como resultado $72.29 \frac{Rad}{s}$, cuyo valor es utilizado en la ecuación (4), reemplazando los valores para obtener la potencia producida por la turbina.

$$\omega = 2\pi \frac{690.4}{60} = 72.29 \frac{Rad}{s} \quad (8)$$

$$P_{mec} = 4.7 \times 72.29 = 339.76 \frac{J}{s} \quad (9)$$

En seguida se realiza el cálculo de la eficiencia para la turbina Pelton, utilizando la ecuación (1), se determinó que ésta alcanza una eficiencia del 5.17%

$$\%nt = \frac{339.76 \frac{J}{s}}{6.57 \frac{J}{s}} \times 100 = 5.17\% \quad (10)$$

A continuación, se realiza el cálculo de generación

de emisiones de CO₂, éste se obtuvo a partir de la turbina con el resultado de la potencia disponible (P_w) 5.

$$6.57Watts \times 1 \frac{kW}{1000} Watts \times 1h = 0.00657kWh \quad (11)$$

Dado el cálculo anterior se halló el valor de kWh durante un día, haciendo la conversión se obtuvo un resultado de 0.1576 kWh. Al mes se obtuvo un valor de 4.7304 kWh, y al año 56.76 kWh.

En función de los resultados anteriores, se evidencia una generación de energía suficiente para suplir el gasto equivalente a mantener un bombillo convencional de 0.1 kW, en un hogar, encendido diariamente por 10 horas, durante 56 días, mientras que, la energía generada por la turbina sería equivalente a mantener encendido un bombillo led durante 10 horas por 436 días. El bombillo que se encuentra en el hogar piloto, tiene una potencia de 0.013 kW y se caracteriza por tener una disminución del 80% del consumo de energía eléctrica en comparación con el bombillo convencional [15].

Seguido a esto se realiza el cálculo de emisiones de CO₂ utilizando la información energética de un hogar de la ciudad de Bogotá con el fin de establecer un valor del ahorro de emisiones que se daría en caso de implementar el sistema.

Según la información calculada en la Tabla 3, se puede calcular el ahorro de emisiones.

$$557.78kgCO_2/año - 536.16kgCO_2/año = 21.62kgCO_2/año$$

De acuerdo con lo expresado en la Figura 4 se logra evidenciar que la generación de emisiones de CO₂ producidas por el hogar piloto a raíz de actividades antrópicas, según lo mencionado en la guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) [16] es superior a la emisión que genera la turbina Pelton de banco analizada, mostrando un ahorro en el hogar de 21.62 KgCO₂/año, contribuyendo en el cumplimiento de lo pactado en el Protocolo de Kyoto con respecto a la reducción de uno de los componentes que conforman los gases de efecto invernadero [3].

Tabla 3. Lista de símbolos.

Inicialmente	Finalmente
CE Hogar	CE Hogar–CE Turbina
	1464 KWh/año– 56.76KWh/ año=
1464 kWh/año	1407.24 KWh/año
$ECO_2=CE \times FE$ (6)	$ECO_2=CE \times FE$ (6)
$ECO_2=1464 \text{ kWh/año} \times 0.381 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} =$	$ECO_2= 1407.24 \text{ kWh/año} \times 0.381 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} =$
557.78 kgCO₂/ año	536.16 kgCO₂/ año

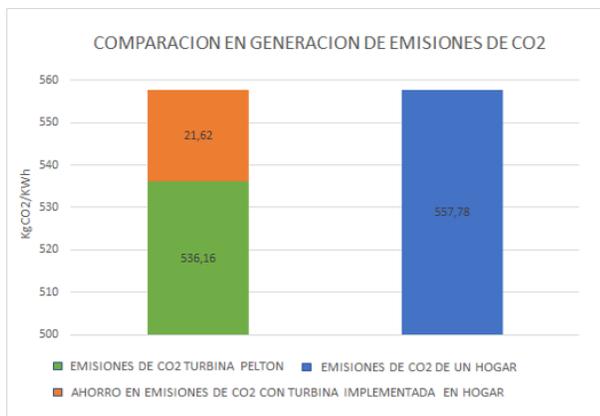


Figura 4. Gráfica comparativa de emisiones de CO₂ en los sistemas. Fuente: Autores, 2020

1. IV. Conclusión

La alternativa planteada en este proyecto muestra un ahorro de emisiones de CO₂ de 21.62 KgCO₂/año, contribuyendo en la diversificación de la generación de energía eléctrica.

Según las condiciones trabajadas en la turbina Pelton de banco de laboratorio, la energía producida por la turbina puede abastecer en el hogar únicamente lo equivalente a un bombillo convencional de 0.1 kW, en un periodo de un mes y 56 días, de igual manera se evaluó esta situación con un bombillo led de 0.013 kW, encontrando un resultado más favorable, en donde, la energía generada por la turbina sería equivalente a mantener encendida la bombilla durante 10 horas por 436 días.

La eficiencia obtenida por la turbina fue de 5.19%, resultado dado en función de la cabeza de altura reducida, pese a esto ofrece un potencial de uso justificado en la reducción de emisiones de CO₂.

Referencias

- [1] C. A. Jara González, “Alternativas para la reducción de emisiones de CO₂ del sector doméstico del municipio de Santa María de Palautordera. En el contexto del Pacto de los Alcaldes,” Tesis de maestría, Barcelona, Universidad Politécnica de Catalunya, 2010.
- [2] Grupo intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambio climático 2007. Informe de síntesis, Ginebra, 2007.
- [3] Organización de las Naciones Unidas [ONU], “Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático,” 1998. [Online]. Available: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- [4] G. O. Magrin, Adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe, Euroclima, CEPAL, Unión Europea, 2015.
- [5] Olade, Inti, WWF, “Cambia la energía, cambia el clima,cambio climático y su impacto en el sector energético,” 2016. [Online]. Available: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0357.pdf>.
- [6] I. C. Cruz Islas, “Emisiones de CO₂ en hogares urbanos. El caso del Distrito Federal,” *Estudios demográficos y urbanos*, vol. 31, n.º 1, págs. 115-142, abr. de 2016.
- [7] J. C. Solís Ávila y C. Sheinbaum Pardo, “Consumo de energía y emisiones de CO₂ del autotransporte en México: y escenarios de mitigación,” *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 32, n.º 1, págs. 7-23, 2016.
- [8] H. García, A. Corredor, L. Calderón y M. Gómez, *Análisis costo beneficio de energías renovablesno convencionales en Colombia. Documento preparado para WWF*. Bogotá: Fedesarrollo, 2013.

- [9] M. A. García Pérez, “Turbomáquinas–Turbinas Hidráulicas,” Tesis de pregrado, Perú, Universidad Nacional del Callao, 2011.
- [10] M. Eisenmng, *Micro Pelton Turbines*, Eschborn, 1992.
- [11] Edibon. Engineering and Technical Teaching Equipment, “Turbina Pelton, máquinas hidráulicas,” 2021. [Online]. Available: <https://www.edibon.com/es/equipment/pelton-turbine>.
- [12] H. García Gutiérrez y A. Nava Mastache, *Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [13] IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería de Colombia, *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia*, Bogotá: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, Cancillería de Colombia, FMAM, 2015.
- [14] Unidad de Planeación Minero Energética, “Resolución No. 000642 de 2019, por el cual se actualiza el factor marginal de emisión de gases de efecto invernadero del Sistema Interconectado Nacional- 2018, para proyecto aplicables al Mecanismo de Desarrollo Limpio- MDL,” dic. de 2019. [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/Normatividad/642_2019.pdf.
- [15] F. Vasco Vera, “Efecto del empleo de focos ahorradores. Estudio técnico experimental en instalaciones,” Tesis de pregrado, Cuenca, Universidad Politécnica Salesiana, 2011.
- [16] Generalitat de Catalunya, Comisión Interdepartamental del Cambio Climático, Oficina Catalana del Canvi Climatic, *Guía práctica para el cálculo de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)*, 2011.