

Programa informático para el diseño y evaluación de la turbina Francis en una Pequeña Central Hidroeléctrica



<https://cu-id.com/2177/v33n4e10>

Computer program for the design and evaluation of the Francis turbine in a Small Hydroelectric Power Plant

^①Yoelkis Hernández-Victor¹, ^②Noidys Quirós-Martín^{1*}, ^③Oscar Brown-Manrique¹,
^④Carlos Miguel Sánchez-Monteserín¹, ^⑤Maiquel López-Silva^{II}

¹Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Ciego de Ávila, Cuba.

^{II}Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

RESUMEN: Las centrales hidroeléctricas presentan gran importancia para el desarrollo agropecuario al proporcionar energía limpia, apoyar el riego y contribuir a la estabilidad de la red eléctrica, lo que beneficia directamente a la productividad y sostenibilidad del sector agropecuario. El presente estudio se desarrolló en la Pequeña Central Hidroeléctrica “Alzamiento de Jagüecito” de la Cuenca Chambas con el objetivo de desarrollar un programa informático para el diseño y evaluación de la turbina Francis. La metodología utilizada consistió en sistema web en lenguaje de programación Python a partir del cual se calcularon los siguientes parámetros: potencia, velocidad de rotación, velocidad específica, altura del salto neto, velocidad absoluta de entrada, velocidad tangencial, parámetros del rodets y parámetros de la cámara espiral metálica. Los resultados demostraron que el programa de computo INFO_FRANCIS permite determinar la potencia de la turbina, la energía eléctrica producida y el factor de carga a partir del comportamiento de los niveles de agua en el embalse. Este programa es útil para comparar los resultados del programa con los datos obtenidos de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico y la Unión Eléctrica de la provincia; además de contribuir a monitorear el funcionamiento de la turbina, lo que previene ante posibles problemas que se presenten y sugiere las medidas de corrección viables que deberán aplicarse.

Palabras clave: caudal turbinado, hidroenergía, potencia de la turbina, salto neto.

ABSTRACT: Hydroelectric plants are of great importance for agricultural development by providing clean energy, supporting irrigation and contributing to the stability of the electrical grid, which directly benefits the productivity and sustainability of the agricultural sector. The present study was developed at the Small Hydroelectric Power Plant “Alzamiento de Jagüecito” in the Chambas Basin with the objective of developing a computer program for the design and evaluation of the Francis turbine. The methodology used consisted of a web system in the Python programming language from which the following parameters were calculated: power, rotation speed, specific speed, net jump height, absolute entry speed, tangential speed, impeller parameters and flow parameters. the metallic spiral chamber. The results showed that the INFO_FRANCIS computer program allows determining the power of the turbine, the electrical energy produced and the load factor from the behavior of the water levels in the reservoir. This program is useful to compare the results of the program with the data obtained from the Hydraulic Use Company and the Electrical Union of the province; in addition to helping to monitor the operation of the turbine, which prevents possible problems that may arise and suggests viable corrective measures that should be applied.

Keywords: Turbined Flow, Hydropower, Turbine Power, Net Head.

*Autor para correspondencia: Noidys Quirós-Martín, e-mail: noidysquirosmartin@gmail.com

Recibido: 03/01/2024

Aceptado: 05/09/2024

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE AUTORES: **Conceptualización:** Y. Hernández, N. Quirós, O. Brown. **Curación de datos:** N. Quirós, O. Brown, C. M. Sánchez. **Investigación:** N. Quirós, O. Brown. **Metodología:** Y. Hernández, N. Quirós, O. Brown, M. López. **Supervisión:** N. Quirós, O. Brown. **Validación:** N. Quirós, O. Brown, C.M. Sánchez. **Papeles/Redacción, borrador original:** N. Quirós, O. Brown. **Redacción, revisión y edición:** N. Quirós, O. Brown, C.M. Sánchez.

Artículo bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCION

Los combustibles fósiles son actualmente la principal fuente de energía para suplir los requerimientos energéticos; sin embargo, son altamente contaminantes y muy costosos; por tal motivo, es beneficioso la implementación de tecnologías alternativas como las pequeñas centrales hidroeléctricas [Morales et al. \(2014\)](#), las cuales presentan gran importancia para el desarrollo agropecuario al proporcionar energía limpia, apoyar el riego y contribuir a la estabilidad de la red eléctrica, lo que beneficia directamente a la productividad y sostenibilidad del sector agropecuario [\(Diez y Olmeda, 2008\)](#).

Beneficiar y mejorar el servicio eléctrico en zonas intrincadas y montañosas es una tarea compleja debido al cuidado necesario que se debe tener en la reducción al mínimo posible de los impactos ambientales que pueden generar los proyectos hidroeléctricos [\(Galbán et al., 2023\)](#). Este proceder incluye la visión de un modelo alternativo para el aprovechamiento de los recursos hídricos y energético a través de centrales hidroeléctricas, las cuales representan el esfuerzo del país en la utilización de las nuevas tecnologías agroecológicas en el sector agropecuario [\(Arias, 2009\)](#).

La situación energética mundial requiere de nuevos desafíos para la solución de los problemas que han ocasionado los tradicionales sistemas de generación de energía eléctrica debido al aumento de la demanda energética que se duplicará para el 2050 [Monirul et al. \(2021\)](#), el incremento de los costos de generación y la necesidad de reemplazar el uso del petróleo, lo cual ha promovido la utilización de las fuentes de energía renovables; incluyendo la energía hidráulica, que representa alrededor del 20% de la electricidad en el mundo [\(Prodanović et al., 2019\)](#).

Las pequeñas centrales hidroeléctricas tienen una potencia de generación pequeña; no obstante, su generación hidroenergética debe cubrir la demanda estimada durante su vida útil [Moscoso & Montealegre \(2013\)](#); por tanto, se requiere de un estudio hidrológico y ambiental previo a la construcción de la obra [\(Espejo et al., 2017\)](#).

La modelación matemática de una pequeña central hidroeléctrica debe contemplar todo el sistema hidráulico hasta llegar a las unidades de generación y deben ser evaluados con base en el análisis del error de acuerdo con el índice de desempeño del modelo. El modelo puede ser utilizado para la distribución de carga o potencia a generar [\(Estrada et al., 2013\)](#).

Es evidente que el uso de energía obtenida de la combustión de hidrocarburos debe ser reemplazada por energías renovables; pero se trata de una labor de ingeniería compleja que requiere del apoyo de programas de cómputo que facilite el diseño de los parámetros necesarios de las centrales hidroeléctricas

y hagan menos engorroso este proceso; por tal motivo, el objetivo del presente trabajo es desarrollar un programa informático para el diseño y evaluación de la turbina Francis instalada en la Pequeña Central Hidroeléctrica “Alzamiento de Jagüecito”, la cual genera corriente eléctrica para actividades relacionadas con la producción de caña de azúcar y sus derivados, la agricultura, la ganadería, el abasto a la población y la industria de materiales de la construcción.

MATERIALES Y METODOS

La investigación se realizó en la Cuenca Hidrográfica del Río Chambas, situada en la vertiente norte de Cuba en la provincia de Ciego de Ávila; abarca los municipios de Florencia y Chambas con un área de 384,374 km². Las coordenadas están comprendidas según el Sistema de Coordenadas Cuba Norte GCS_NAD27-CU en: Superior: 286754,723900 m; Izquierdo: 700995,360200 m; Derecho: 720785,727100 m; Inferior: 248273,406300 m. En esta cuenca se encuentra el Conjunto Hidráulico Liberación de Florencia, de Ciego de Ávila, constituido por los embalses Chambas I (Cañada Blanca) y Chambas II; así como la Pequeña Central Hidroeléctrica “Alzamiento de Jagüecito” con una capacidad de generación de 1,2 MW con la utilización de turbinas del tipo Francis.

Se desarrolló un sistema informático consistente en un sistema web en lenguaje de programación Python acorde con [Challenger et al. \(2014\)](#) con la finalidad de calcular los parámetros de una turbina Francis para su utilización en tareas de diseño y evaluación. El sistema informático desarrollado en la investigación fue validado por especialistas de la Empresa de Aprovechamientos Hidráulicos y la Unión Nacional de Energía la provincia de Ciego de Ávila. Los criterios utilizados para la validación fueron los siguientes: necesidad del software, utilidad para la empresa, rapidez, precisión y satisfacción del usuario.

Los parámetros de la turbina Francis que se calculan en este programa informático para una Pequeña Central Hidroeléctrica son: potencia, velocidad de rotación, velocidad específica, altura del salto neto, velocidad absoluta de entrada, velocidad tangencial, diámetro primitivo del rodete, diámetro de salida del rodete, número de álabes del rodete, ancho primitivo del rodete, ancho de entrada del rodete, velocidad de entrada a la cámara espiral metálica, diámetro del primer arco de la espiral y diámetro de los restantes arco de la espiral.

La potencia de la Pequeña Central Hidroeléctrica (P) en kW se calculó según [Gutiérrez et al. \(2019\)](#) y [Pérez et al. \(2022\)](#) en función del caudal turbinado (Q_t) en m³ s⁻¹, la altura del salto neto (H_n) en m y la eficiencia de la turbina (η) como:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q_e \cdot H_n \cdot \eta}{1000} \quad (1)$$

La velocidad de rotación de la turbina (N) en rpm se estimó considerando la velocidad específica de la turbina (N_s) en rpm, la altura del salto neto (H_n) en m y la potencia de la Pequeña Central Hidroeléctrica (P). La velocidad específica del caudal (N_q) se tuvo en cuenta el caudal turbinado (Q_e). Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$N_s = 3470 \cdot H_n^{-0,625} \quad (2)$$

$$N = \frac{N_s \cdot H_n^{5/4}}{\sqrt{P}} \quad (3)$$

$$N_q = \frac{N \sqrt{Q_e}}{N_n^{3/4}} \quad (4)$$

La velocidad absoluta de entrada en $m \ s^{-1}$ (C_o), la velocidad tangencial en $m \ s^{-1}$ (u_1), el diámetro primitivo del rodete en m (D_1), el diámetro de salida del rodete en m (D_2), el número de álabes del rodete (Z), el ancho primitivo del rodete en m (a_1) y el ancho de entrada del rodete en m (b_1) se diseñaron mediante las ecuaciones que se relacionan a continuación:

$$C_o = 0,66 \sqrt{2gH_n} \quad (5)$$

$$u_1 = 0,293 + 0,0081N_q \sqrt{2gH_n} \quad (6)$$

$$D_1 = \frac{60u_1}{\pi N} \quad (7)$$

$$D_2 = 4,375 \sqrt[3]{\frac{Q_e}{N}} \quad (8)$$

$$Z = 18,87e^{-0,001N_s} \quad (9)$$

$$a_1 = (0,191 \ln(N_s) - 0,651)D_1 \quad (10)$$

$$b_1 = (0,000006 N_s^2 + 0,0014N_s + 0,0085)D_1 \quad (11)$$

El diseño de la cámara espiral y el distribuidor se realizó en función de la velocidad de entrada a la cámara espiral metálica en m (C_{ecm}). La cámara espiral se divide en ocho arcos de 45° con igual caudal; por lo que las dimensiones de la cámara espiral son dependientes del diámetro del primer arco de la espiral (d_1). Los restantes diámetros (d_i) se calcularon según ecuaciones utilizadas por [Illidge et al. \(2020\)](#).

$$C_{ecm} = 0,18 + 0,28 \sqrt{2gH_n} \quad (12)$$

$$d_1 = 1,146 \sqrt{\frac{Q_e}{C_{ecm}}} \quad (13)$$

La energía anual producida en kWh (EAP) se determinó a partir de la potencia de la turbina en kW (P), el tiempo de funcionamiento anual del generador en horas (T_{fa}), el tiempo de funcionamiento del generador en el día en horas (T_{fd}) y los días del mes (d_m). Por otra parte, el factor de carga (F_c) se obtuvo con el tiempo equivalente en h (T_e), el tiempo de funcionamiento anual del generador en horas (T_{fa}), la energía anual producida (EAP) y la potencia nominal de la turbina en kW según las ecuaciones siguientes:

$$EAP = P T_{fa} \quad (14)$$

$$T_{fa} = 365 T_{fd} \quad (15)$$

$$T_e = \frac{EAP}{P_{nom}} \quad (16)$$

$$F_c = \frac{T_e}{T_{fa}} \quad (17)$$

RESULTADOS Y DISCUSION

En esta investigación se desarrolló el software INFO_FRANCIS en lenguaje de programación Python v 3.7.6, el cual se utilizó por tener gran cantidad de librerías para procesamiento de datos. Se decidió que la aplicación fuera web, debido a que así los investigadores tendrían acceso a la misma fácilmente desde cualquier estación de trabajo, laptops, tabletas o smartphone. Estas estaciones de trabajo son las encargadas de mostrar la respuesta del servidor al cliente sin necesidad de instalar ningún software adicional excepto el navegador, que viene preinstalado en la mayoría de los Sistemas Operativos utilizados en la actualidad.

Una vez desplegada la aplicación, se puede acceder a la misma utilizando un mecanismo de autenticación basado en usuarios y roles. Cada usuario autorizado deberá pertenecer a uno o varios de los roles definidos a continuación. Administrador del sistema: solo tiene acceso a la asignación de roles a los usuarios, Administrador hidroenergético: tiene permisos para modificar y crear, todo lo relacionado con la configuración de los parámetros del sistema. Puede solicitar además informes sobre las mismas, pero solo en modo lectura y Especialista: puede solicitar todos los tipos de reportes que maneja el sistema. Tiene además permisos para modificar los parámetros independientemente de los valores encontrados.

En la [Figura 1](#) se muestra la interfaz principal, la cual aparece una vez que se accede al sistema

mediante el navegador; dado el rol determinado se accede al interior de la aplicación. Cuando el usuario ingresa al programa (Figura 2) puede suministrar los datos de entrada como: caudal medio, altura del salto bruto, diámetro de la tubería de presión, longitud de la tubería de presión, coeficiente de rugosidad de la tubería, eficiencia de la turbina, potencia nominal de la turbina y tiempo de funcionamiento en el día. El programa cuenta con dos funciones a realizar: operación y limpiar la información.

El programa INFO_FRANCIS, calcula de manera rápida y precisa los parámetros hidráulicos como caudal ecológico, caudal turbinado, caudal mínimo técnico, velocidad del flujo, diámetro de la tubería de presión, pérdidas de carga, altura del salto neto, potencia de la turbina, velocidad específica, velocidad de rotación, velocidad específica del caudal, velocidad absoluta, velocidad tangencial, parámetros del rodete y de la cámara de espiral metálica (Figura 3).

El desarrollo de un programa de computación para el diseño y evaluación de una turbina Francis (una de las turbinas hidráulicas más utilizadas en las centrales hidroeléctricas) tiene gran importancia para la evaluación de diferentes escenarios de daños posibles que pueden sufrir estas turbinas, la comprensión de su comportamiento ante una determinada avería, la obtención de criterios válidos en el proceso del estudio ingenieril en una cuenca dada, la evaluación del impacto ambiental asociado a la construcción de una presas y el mantenimiento de la turbina. En este sentido, Aquino et al. (2019) demostró que la utilización de programas de computo pueden ayudar al mejoramiento del rendimiento de la potencia de la turbina en las condiciones específicas de funcionamiento; requiriendo una investigación intensiva de los parámetros de la cuenca hidrográfica.

CONCLUSIONES

- El programa de computo INFO_FRANCIS es un instrumento computacional sustentado en el conocimiento de las ecuaciones que rigen el proceso de diseño y evaluación de las turbinas hidráulicas Francis instaladas en Pequeñas Centrales Hidroeléctricas en función de parámetros de la cuenca hidrográfica como caudal medio, caudal turbinado, caudal ecológico, caudal mínimo técnico, altura del salto; así como la longitud y diámetro de la tubería de presión.
- La aplicación del programa INFO_FRANCIS permite determinar la potencia de la turbina, la energía eléctrica producida y el factor de carga en un periodo de tiempo determinado, a partir del comportamiento de los niveles de agua en el embalse y los parámetros de la turbina Francis instalada; admitiendo comparar los resultados del programa con los datos obtenidos de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico y la Unión Eléctrica de la provincia.



FIGURA 1. Interfaz principal del programa INFO_FRANCIS.

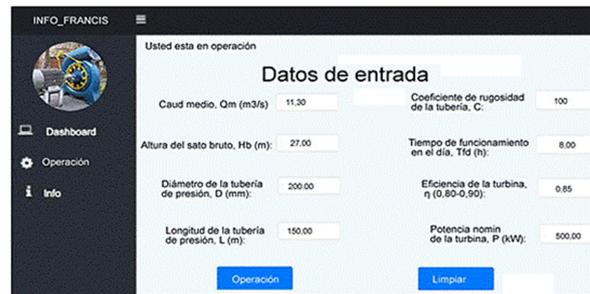


FIGURA 2. Interfaz de datos del programa INFO_FRANCIS.

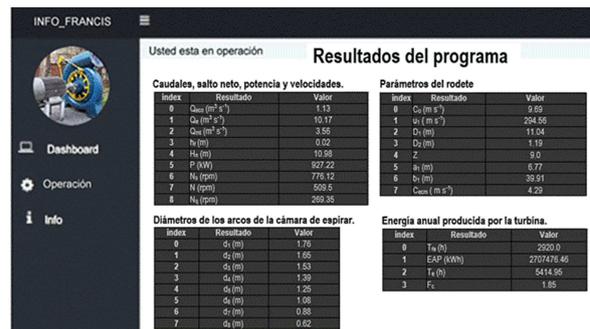


FIGURA 3. Interfaz de resultados del programa INFO_FRANCIS.

- La utilización del programa de computo contribuye a monitorear con mayor calidad y sistematicidad el funcionamiento de la turbina Francis, lo que previene ante posibles problemas que se presenten y sugiere las posibles medidas de corrección que deberán aplicarse.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AQUINO, A.S.M.; FREIRE, Q.M.H.; ORDOÑEZ, V.M.A.; POZO, S.E.R.: "Diseño y manufactura asistida por computadora en la fabricación de la "Kaplan Turbine Blade"", *Polo del Conocimiento*, 4(12): 162-187, 2019, ISSN: 2550 - 682X, DOI: <https://doi.org/10.23857/pc.v4i12.1200>.
- ARIAS, G.M.D.L.A.: "Cuba: reforma y transformación agraria. La crisis de los noventa y el proceso de desestatalización de la agricultura", *Revista IDEAS*, 3(1): 6-29, 2009, ISSN: 2451-6910.

- CHALLENGER, I.; DÍAZ, Y.; BECERRA, B.R.A.: “El lenguaje de programación Python”, *Ciencias Holguín*, 20(2): 1-13, 2014, ISSN: 1027-2127.
- DIEZ, H.J.M.; OLMEDA, S.S.: “Diseño eco-hidrológico de pequeñas centrales hidroeléctricas: evaluación de caudales ecológicos”, *Energética*, 39: 65-76, 2008, ISSN: 0120-9833.
- ESPEJO, M.C.; GARCÍA, M.R.; APARICIO, G.A.E.: “El resurgimiento de la energía minihidráulica en España y su situación actual”, *Revista de Geografía Norte Grande*, 67: 115-143, 2017, ISSN: 0718-3402.
- ESTRADA, V.I.D.; PEÑA, P.J.A.; GUARNIZO, L.C.: “Estimación de modelos lineales para el control predictivo de pequeñas centrales hidroeléctricas”, *Revista Soluciones de Postgrado*, 5(9): 63-78, 2013.
- GALBÁN, R.L.; SÁNCHEZ, L.P.; BRITO, S.A.L.; HERRERA, H.A.: “Potencial hidroeléctrico en cuencas hidrográficas de montaña sujetas a regulaciones ambientales cubanas. Apuntes para su aprovechamiento”, *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 53: 40-50, 2023, ISSN: 0120-3630.
- GUTIÉRREZ, U.L.; PEÑA, P.L.; HIDALGO, G.R.: “Determinación de la carga de diseño en los proyectos hidroenergéticos a pie de presa”, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(3): 126-140, 2019, ISSN: 1680-0338.
- ILLIDGE, A.J.M.; CHACÓN, V.J.L.; CHACÓN, V.A.J.; ROMERO, P.C.A.: “Diseño y simulación de un sistema pico-hydro para la generación de energía eléctrica en zonas rurales, mediante un software de mecánica de fluidos computacional”, *Revista UIS Ingenierías*, 19(1): 155-170, 2020, ISSN: 1657-4583.
- MONIRUL, I.M.; ASHFAQ, A.; SALMAN, R.; HEMAL, C.; TAMAL, C.; PIYAL, C.; SADIQ, M.S.; YOUNG, K.P.: “An overview of the hydropower production potential in Bangladesh to meet the energy requirements”, *Environ. Eng. Res*, 26(6): 200-514, 2021, ISSN: 1226-1025, DOI: <https://doi.org/10.4491/ceer.2020.514>.
- MORALES, S.; CORREDOR, L.; PABA, J.: “Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria”, *DYNA*, 81(184): 178-185, 2014, ISSN: 0012-7353.
- MOSCOSO, M.L.B.; MONTEALEGRE, T.J.L.: “Impactos en la flora terrestre por la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en Alejandría, Antioquia”, *Producción+ Limpia*, 8(2): 85-93, 2013, ISSN: 1909-0455.
- PÉREZ, C.B.; GARCÍA, F.L.; FONG, B.J.; DOMÍNGUEZ, A.H.R.; PEÑA, P.L.: “Control del proyecto de una mini hidroeléctrica auxiliar para una pequeña central”, *Ingeniería Mecánica*, 25(2): 647, 2022, ISSN: 1815-5944.
- PRODANOVIĆ, M.; MILTENOVIC, A.; NIKODIJEVIĆ, M.: “Determination of operating parameters of turbines for micro hydroelectric power plants for optimal use of hydropower”, [en línea], En: *9th International Scientific Conference - Research and Development of Mechanical Elements and Systems-IRMES 2019 Kragujevac, Serbia*, Ed. IOP Publish Ltd IOP, Kragujevac, Serbia, 2019, Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1/012046/pdf>.

Yoelkis Hernández-Victor. Dr.C., Prof. Titular, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Departamento de Informática, Ciego de Ávila, Cuba. e-mail: yoelkishv@gmail.com.

Noidys Quirós-Martín. M.Sc., Prof. Auxiliar, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Departamento de Mecánica Aplicada, Ciego de Ávila, Cuba.

Oscar Brown-Manrique. Dr.C., Prof. Titular, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Centro de Estudios Hidrotécnicos (CEH), Ciego de Ávila, Cuba. e-mail: obrown@unica.cu

Carlos Miguel Sánchez-Monteserín. Dr.C., Prof. Titular, Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Departamento de Mecánica Aplicada, Ciego de Ávila, Cuba. e-mail: monte@unica.cu

Maiquel López-Silva. Dr.C., Prof. Titular, Universidad Ricardo Palma, Perú. e-mail: maiquel.lopez@urp.edu.pe.

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.