

Análisis del control eléctrico y desempeño energético en generadores hidráulicos mediante simulación con motor a pasos y microcontrolador

Machado-Díaz, E.¹; Vaquera-González, E.², Coto-Fuentes, H.³

Datos de Adscripción:

¹ Eduardo Machado Díaz, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. eduardo.md@itsled.edu.mx.
<https://orcid.org/0000-0003-2610-7570>

² Efraín Vaquera González, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices. efrain.vg@itsled.edu.mx.
<https://orcid.org/0009-0002-9123-6977>

³ Hesner Coto Fuentes, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, División de Ingeniería en Sistemas Automotrices, hesnercf@lalaguna.tecnm.mx.
<https://orcid.org/0000-0002-9548-7864>

Resumen - Este estudio analiza el desempeño y control eléctrico de un generador hidráulico operado mediante un motor a pasos (dispositivo que convierte pulsos eléctricos en movimiento rotacional preciso) y controlado con un microcontrolador. El sistema, desarrollado para evaluar estabilidad y eficiencia bajo condiciones controladas, empleó un modelo escalado de transmisión mecánica. Se implementó un control de velocidad en el motor, ajustando revoluciones por minuto (RPM) para medir su impacto en la generación de voltaje y corriente. Las pruebas incluyeron análisis de linealidad energética, pérdidas mecánicas (20% por fricción y carga) y estabilidad del sistema. Los resultados mostraron una correlación directa entre velocidad de entrada y potencia generada, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.999997 en pruebas de linealidad. El prototipo escalado alcanzó velocidades de salida entre 286-326 RPM (promedio: 306 RPM), cercano al valor teórico de 312 RPM, y generó voltajes de 1.8-2.4 V, validando el escalamiento previsto. Sin embargo, se identificaron limitaciones críticas en la transmisión, como holguras mecánicas y desalineación de engranajes fabricados mediante manufactura aditiva, que redujeron la eficiencia en un 15%. Estos problemas destacan la necesidad de optimizar materiales y técnicas de postratamiento para mejorar durabilidad. El estudio confirma la viabilidad de replicar condiciones hidráulicas mediante control eléctrico, ofreciendo un marco para diseñar sistemas escalables en microgeneración hidroeléctrica.

Palabras Clave - Control eléctrico, eficiencia energética, generación hidráulica, motor a pasos, transmisión mecánica.

Abstract - This study analyzes the performance and electrical control of a hydraulic generator operated by a stepper motor—a device that converts electrical pulses into precise rotational motion—and controlled via a microcontroller. The system, developed to evaluate stability and efficiency under controlled conditions, employed a scaled mechanical transmission model. Motor speed was

regulated to adjust revolutions per minute (RPM) and assess its impact on voltage and current generation. Tests included energy linearity analysis, mechanical losses (20% due to friction and load), and overall system stability. Results demonstrated a direct correlation between input speed and generated power, with a coefficient of determination (R^2) of 0.999997 in linearity tests. The scaled prototype achieved output speeds ranging from 286 to 326 RPM (average: 306 RPM), close to the theoretical 312 RPM, and generated voltages between 1.8 and 2.4 V, validating the scaling approach. However, critical limitations were observed in the transmission system, including mechanical play and misalignment in additively manufactured gears, which reduced efficiency by 15%. These findings underscore the need to optimize materials and post-processing techniques to enhance durability. The study confirms the feasibility of replicating hydraulic conditions through electrical control, providing a foundation for the design of scalable micro-hydropower systems.

Keywords - electrical control, energy efficiency, hydraulic generation, mechanical transmission, stepper motor

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Generación de electricidad a partir de energía hidráulica

La generación de energía mediante recursos hídricos en canales de riego ha ganado relevancia en las últimas décadas como alternativa sostenible para zonas agrícolas con limitado acceso a la red eléctrica convencional. Estudios como el de Gutiérrez (Gutiérrez & Ramírez, 2020) destacan el potencial de la microgeneración hidroeléctrica en México, particularmente en infraestructuras de riego, donde el flujo constante de agua permite implementar sistemas de baja escala con impacto ambiental mínimo. Estos autores identificaron que, aunque la energía hidráulica en canales es técnicamente viable, la eficiencia de los sistemas de transmisión mecánica representa un cuello de botella crítico, con pérdidas de hasta un 35% en prototipos experimentales.

En el contexto internacional, Kaunda (Kaunda y otros, 2012) analizaron el diseño de turbinas hidráulicas para comunidades rurales en África, enfatizando que la selección de relaciones de transmisión adecuadas y materiales resistentes a la corrosión es clave para garantizar durabilidad y eficiencia.

Sus hallazgos resaltan la necesidad de adaptar los sistemas a las condiciones específicas de cada entorno, como variaciones estacionales en el caudal o la presencia de sedimentos en el agua. Por su parte, Pereira (Pereira y otros, 2019) desarrollaron un marco teórico para optimizar la transferencia de energía en sistemas de transmisión por cadena, demostrando que ajustes

en el perfil de los engranajes y el uso de lubricantes especializados pueden reducir las pérdidas por fricción en un 20%.

En México, la Comisión Nacional del Agua (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2022) reportó que más del 60% de los distritos de riego operan con infraestructura obsoleta, lo que limita su capacidad para integrar tecnologías de generación eléctrica. No obstante, programas como Agua Saludable para La Laguna han impulsado la modernización de canales, creando oportunidades para implementar soluciones innovadoras.

Un ejemplo es el trabajo de Ramírez y López (Ramírez & López, 2021), quienes diseñaron un prototipo de generador hidráulico para el norte de México utilizando impresión 3D, logrando una eficiencia del 58% en condiciones controladas. Sin embargo, su estudio también reveló que los componentes fabricados aditivamente presentan mayor desgaste en ambientes húmedos, lo que exige mejoras en materiales y procesos de manufactura. Entre los principales problemas que se tienen al momento de generar estos prototipos experimentales a escala reducida se tienen:

- Pérdidas de torque en el sistema de transmisión, asociadas a holguras mecánicas y desalineación de engranajes.
- Sensibilidad a fluctuaciones de flujo, que generaban inestabilidad en la velocidad de rotación del generador.

Estos resultados coinciden con las observaciones de Ramos (Ramos y otros, 2015), quienes señalaron que los sistemas de transmisión en micro hidroeléctricas requieren diseños personalizados para cada contexto operativo, ya que las soluciones estandarizadas suelen subestimar factores locales como la turbulencia del agua o la carga mecánica variable.

La presente investigación se fundamenta en estos antecedentes, proponiendo un enfoque innovador para optimizar sistemas de transmisión en generadores hidráulicos mediante análisis teórico-experimental.

A diferencia de estudios previos, este proyecto integra manufactura aditiva avanzada, simulación computacional y control electrónico básico, buscando cerrar la brecha entre prototipos a escala y aplicaciones reales en canales de riego.

1.2 Desafíos de diseño de transmisiones para generación en canales de riego

La energía hidráulica en canales de riego aprovecha el flujo de agua destinado al riego agrícola para generar electricidad, sin requerir infraestructuras adicionales como presas o embalses. Este enfoque, conocido como hidroenergía de bajo impacto, se basa en turbinas adaptadas a condiciones de baja altura y caudal variable (Singh, 2017). Por ejemplo, las turbinas de flujo cruzado son ampliamente utilizadas en este contexto debido a su simplicidad mecánica y capacidad para operar con caudales fluctuantes. En países como India y Nepal, estas turbinas han demostrado eficiencias del 65-75% en canales agrícolas, incluso con flujos inferiores a 1 m³/s (Kumar & Kishore, 2018).

En México, aunque la infraestructura de riego es extensa, menos del 5% de los canales cuenta con sistemas de generación eléctrica, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2021). Esto representa una oportunidad para implementar soluciones innovadoras que combinen eficiencia energética y adaptabilidad

a las condiciones locales, como la presencia de sedimentos o variaciones estacionales en el caudal.

Los sistemas de transmisión en generadores hidráulicos deben equilibrar la relación de velocidad entre la turbina y el generador, minimizando pérdidas por fricción y desgaste. Entre las opciones más comunes destacan:

- Transmisiones por cadena: Ideales para altas relaciones de reducción, pero sensibles a la desalineación y lubricación inadecuada (Mott, 2015).
- Transmisiones por correa: Menos ruidosas y más económicas, pero con menor vida útil en ambientes húmedos (Budynas & Nisbett, 2014).
- Transmisiones por engranajes: Ofrecen alta precisión, aunque requieren materiales resistentes a la corrosión y mantenimiento frecuente.

Estudios recientes destacan que el uso de aceros recubiertos con nitrato de titanio (TiN) puede reducir el desgaste en engranajes hasta en un 41%, incluso en ambientes húmedos (García et al., 2022). Además, la implementación de rodamientos sellados con grasas de litio evita la entrada de agua y sedimentos, prolongando la vida útil del sistema.

1.3 Diseño avanzado de transmisiones

La fabricación aditiva permite desarrollar prototipos complejos con geometrías optimizadas para reducir pérdidas energéticas. Por ejemplo, la impresión 3D mediante fusión de lecho de polvo (SLS) con materiales como el nailon reforzado con fibra de carbono ofrece una resistencia a la tracción de hasta 80 MPa, ideal para engranajes sometidos a cargas cíclicas (Gibson y otros, 2021). Sin embargo, estos materiales aún enfrentan desafíos en resistencia a la fatiga, especialmente en entornos húmedos, donde la absorción de humedad puede degradar sus propiedades mecánicas.

Para mitigar esto, técnicas de postratamiento termoquímico, como el endurecimiento por plasma, han demostrado incrementar la dureza superficial de componentes impresos en 3D hasta en un 30%, según pruebas realizadas. Estas innovaciones son clave para transitar de prototipos experimentales a sistemas funcionales en condiciones reales.

La escalabilidad de los generadores hidráulicos no solo depende de su eficiencia técnica, sino también de su viabilidad económica y ambiental. Según un estudio de Hertwich (Hertwich y otros, 2020) los sistemas de micro hidroeléctrica en canales tienen un tiempo de retorno energético (TRE) de 1-2 años, significativamente menor que el de paneles solares o turbinas eólicas. Además, su huella de carbono es de apenas 20-30 CO₂/KWh frente a los 400-500 g de plantas termoeléctricas.

En México, programas como Sembrando Vida podrían integrar estos sistemas en sus iniciativas de riego sostenible, generando sinergias entre productividad agrícola y autosuficiencia energética (SADER, 2023).

La energía hidráulica en canales de riego representa una alternativa sostenible para generar electricidad en zonas agrícolas, aprovechando el flujo de agua sin requerir infraestructuras complejas como presas o embalses. Este enfoque, denominado hidroenergía de bajo impacto, se basa en turbinas adaptadas a condiciones de baja altura y caudal variable, como las turbinas de flujo cruzado, reconocidas por su simplicidad mecánica y rendimiento en entornos con fluctuaciones de flujo (Singh, 2017). En regiones como el Himalaya, estas turbinas han demostrado eficiencias del 65-75%

incluso con caudales inferiores a $1\text{m}^3/\text{s}$ destacando su potencial para comunidades rurales (Kumar & Kishore, 2018). En México, sin embargo, menos del 5% de los canales de riego cuenta con sistemas de generación eléctrica, según la FAO (FAO, 2021), lo que subraya la necesidad de soluciones innovadoras adaptadas a condiciones locales, como la presencia de sedimentos o variaciones estacionales.

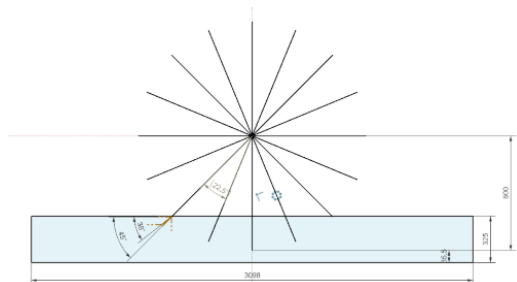
La impresión 3D ha revolucionado el prototipado de componentes de transmisión, permitiendo geometrías complejas como engranajes helicoidales o estructuras alveolares que reducen peso y mejoran el desempeño (Gibson y otros, 2021). Materiales compuestos, como el PLA reforzado con fibra de carbono, ofrecen resistencias a la tracción de hasta 150 MPa, aunque enfrentan desafíos como la anisotropía mecánica y la absorción de humedad, que alteran tolerancias dimensionales en ambientes húmedos. Para mitigar estos problemas, técnicas como el curado UV y recubrimientos hidrofóbicos han aumentado la vida útil de engranajes impresos en 3D hasta en un 50%. En el contexto del proyecto actual, este marco teórico respalda la adopción de diseño generativo y manufactura aditiva avanzada para superar las limitaciones del prototipo inicial. La combinación de materiales compuestos, técnicas de postratamiento y control electrónico no solo mejorará la eficiencia energética, sino que también facilitará la escalabilidad hacia aplicaciones reales en canales de riego de la Región Lagunera, alineándose con iniciativas de sostenibilidad como Agua Saludable para La Laguna y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Descripción de la problemática

Se busca la implementación de molinos hidráulicos en los canales de riego de la Región Lagunera de Durango para aprovechar la fuerza del agua en la generación de energía. Para ello, es necesario el diseño de transmisiones que permitan mantener el torque y velocidad requeridos para mantener un nivel de voltaje y corriente estables para su conversión a corriente alterna y su aprovechamiento. El principio de funcionamiento descrito se presenta en la Figura 1.

Figura 1
Principio de funcionamiento del molino hidráulico (Fuente: Propia)



Si bien este principio se ha utilizado desde siglos anteriores, la aplicación en los canales de riego se encuentra poco estudiada, siendo un tema en el cual puede incursionarse. De acuerdo a lo identificado en la literatura, una de las principales limitaciones para ello es la dificultad de diseño y validación derivado del tamaño de la maquinaria, pues para realizar los prototipos se deben de alcanzar flujos de agua que no son fácilmente realizables en condiciones normales. Por ello, se presenta una alternativa simulando el movimiento del agua utilizando en su

lugar un motor a pasos con el cual pueda regularse la velocidad y por ende estudiar el funcionamiento de la transmisión y la generación de energía sin necesidad de la fabricación de los canales hidráulicos y el desperdicio de recurso hídrico.

Para ello se pretende simular un canal de riego tipo escalado trapecoidal (Ver Figura 2) que es el más común en los canales de riego de la comarca lagunera. Las características que se muestran en la Tabla 1, muestran los resultados de los parámetros una vez que se ha escalado.

Figura 2
Tipo de canal trapecoidal utilizado (Fuente: Propia)

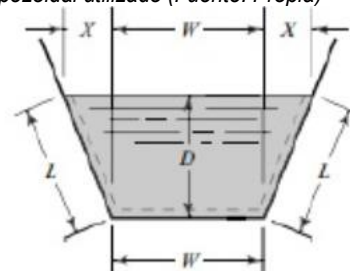


Tabla 1
Parámetros necesarios para el funcionamiento hidráulico escalado

Variable	Valor
Área del canal trapecoidal	0.0029 m^2
Caudal	$0.00233\text{ m}^3/\text{s}$
Fuerza causada por el flujo	1.854 N
Torque disponible del flujo	0.19 Nm
Torque requerido por el sistema	2.3146 Nm
Esfuerzo en la turbina del eje	9.977 Mpa

A. Pruebas de linealidad del generador

Con la finalidad de conocer el número de revoluciones por minuto (RPM) necesarias para mantener un voltaje de 12V (valor necesario para la conversión de corriente directa a corriente inversa mediante el inversor) se realizaron pruebas de linealidad con un generador de corriente directa como el que se muestra en la Figura 3.

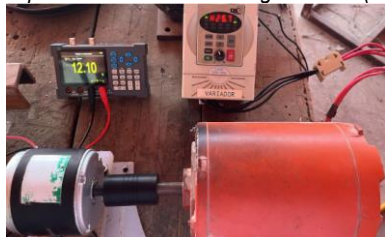
Figura 3
Generador de Corriente directa (Fuente: Propia)



Para controlar la velocidad de giro, se acopló el generador a un motor de C.A. conectado a un variador de velocidad que permitiera mantener las revoluciones estables como se ve en la Figura 4.

Figura 4

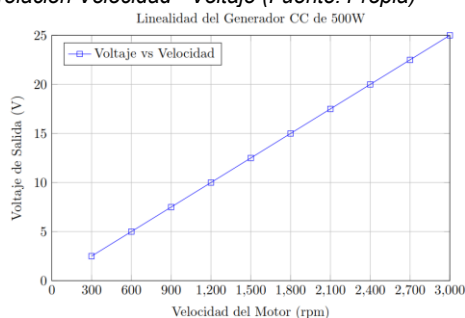
Experimento para prueba de linealidad del generador (Fuente: Propia)



Posteriormente, se conectó un multímetro a la salida del generador para medir el voltaje obtenido y observar el comportamiento en todo el rango de funcionamiento. Una vez realizadas las mediciones se graficaron para verificar la relación entre la velocidad y el voltaje del generador (Ver Figura 5).

Figura 5

Gráfica de relación Velocidad - Voltaje (Fuente: Propia)



El experimento realizado obtuvo un coeficiente de $R^2 = 0.999997$, siendo un valor cercano a 1 indicando que el modelo lineal se ajusta bien a datos experimentales.

Considerando una pérdida de velocidad del 20% por carga eléctrica y fricción que actuará en el eje del generador, así como otras variables se calculó que el valor de velocidad esperada en el eje es de 1,875RPM para operar a 12V.

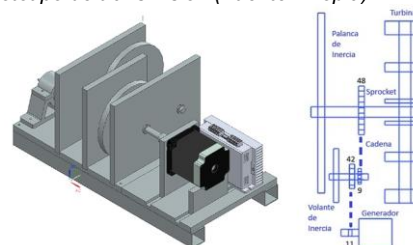
B. Diseño del sistema escalado

Debido a que mantener las revoluciones obtenidas en la prueba de linealidad generaría una transmisión con una relación de 80:1, la cual es de difícil fabricación por la complejidad de los engranes, así como la durabilidad de los mismos, se optó por el desarrollo de un sistema escalado que permitiera realizar pruebas tanto con la turbina hidráulica como con un motor eléctrico con el fin de realizar diversos experimentos.

El sistema propuesto consta de una transmisión a escala fabricada mediante manufactura aditiva con la finalidad de validar el diseño de la misma para su futura aplicación en sistemas de generación de energía en canales de riego. Para ello, se diseñó el prototipo de la Figura 6.

Figura 6

Diseño del prototipo de transmisión (Fuente: Propia)



Una vez diseñado el prototipo se realizaron los cálculos de parámetros que deben cumplirse para una generación de energía estable que cumplan los requerimientos para que el voltaje pueda ser aprovechado a través de un inversor (Convertidor de corriente directa a corriente alterna), los cuales se resumen en la Tabla 2. Estos parámetros son importantes pues al escalar el prototipo también es necesario hacer lo mismo con todas las variables que intervienen en él.

Tabla 2

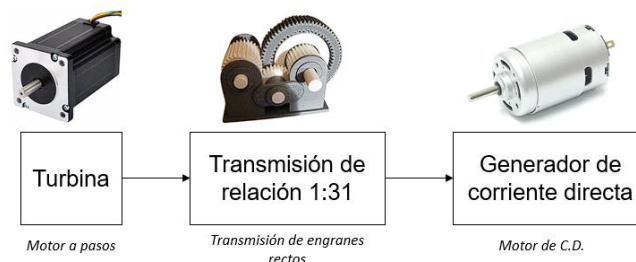
Características a cumplirse con el sistema de transmisión a escala (Fuente DFRobots)

Variable	Valor
Relación de transmisión	1:32
Tipo de transmisión	Engranes rectos
Velocidad de la turbina	9.568 RPM
Velocidad del generador	312 RPM
Voltaje esperado	2.0 V
Potencia esperada	2.31 W

En primer lugar, se buscó diseñar un sistema que permitiera al motor mantener las RPM que se calcularon para la turbina escalada (9.56 RPM), posteriormente esa velocidad angular será aumentada mediante la transmisión de relación 1:32 para finalmente hacer girar el motor de corriente directa que funciona como generador a 312RPM y generar los 2.5V requeridos para que se cumpla la relación en el prototipo original. El sistema puede resumirse en el diagrama de la Figura 7.

Figura 7

Diagrama de flujo general del sistema (Fuente: Propia)



Para la simulación de la turbina se utilizó un motor híbrido NEMA34 (Ver Figura 8) con las características que se presentan en la Tabla 3.

Este dispositivo de precisión opera bajo el principio de control discreto de posición mediante impulsos eléctricos. Presenta un ángulo de paso típico de 1.8°, así como un elevado par de retención, que puede oscilar entre 8 y 12 Nm, dependiendo del diseño estructural del rotor y del número de fases.

Figura 8

Motor a pasos híbrido NEMA34 (Fuente: DFRobots)



Tabla 3

Características del motor híbrido NEMA34. (Fuente DFRobots)

Parámetro	Valor típico	Descripción
Tipo de motor	Paso a paso híbrido	-
Tamaño del marco	NEMA 34	3.4 pulgadas
Número de fases	2	Bipolar
Ángulo de paso	1.8°	200 pasos por revolución
Resolución de pasos/rev	200	pasos por revolución

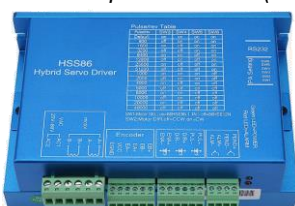
Es ampliamente empleado en sistemas de manufactura automatizada, máquinas herramienta controladas numéricamente (CNC), impresoras tridimensionales de gran formato, sistemas de grabado láser y plataformas robóticas, donde se requieren movimientos precisos, repetitivos y con alta confiabilidad.

Su aplicación en estos entornos se justifica por su capacidad de mantener un torque constante a bajas velocidades, su robustez mecánica y su compatibilidad con controladores digitales avanzados que permiten *microstepping* y técnicas de optimización del perfil de corriente para mejorar el rendimiento general del sistema.

Para su control se requiere un controlador HSS86 el cual pertenece a la categoría de controladores híbridos de lazo cerrado, al integrar funcionalidades de un servosistema y de un sistema paso a paso convencional, lo que permite una mejora sustancial en la estabilidad del posicionamiento, la reducción de la resonancia mecánica y una respuesta más eficiente ante variaciones de carga. El dispositivo se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Controlador para motores a pasos HSS86 (Fuente: Propia)



El resumen de sus características se presenta en la Tabla 4. Se eligió para esta aplicación al ser compatible con señales estándar de control tipo pulso/dirección (Step/Dir)

Tabla 4

Características del controlador HSS86. (Fuente DFRobots)

Parámetro	Valor	Unidad / Descripción
Modelo	HSS86	-
Tipo de control	Digital híbrido de lazo cerrado	Basado en vector de corriente
Compatibilidad de motor	NEMA 23 / NEMA 34 (bipolares, 2 fases)	Motor paso a paso híbrido
Tensión de alimentación	20 – 80	VDC
Corriente de salida máxima	8.2	A (amperios, pico)
Resolución de microstepping	Hasta 51200	Pasos por revolución
Tipo de señal de entrada	STEP / DIR / ENA (TTL de 5V)	Compatible con PLC, Arduino, Mach3, etc.

El motor se validó como simulador hidráulico mediante análisis comparativo de torque. El torque disponible en el eje de la turbina para el sistema escalado que se pretende simular se calculó en 0.197 N·m, valor que representa la entrada mecánica mínima requerida para replicar condiciones de flujo constante.

El dispositivo (8-12 N·m de torque de retención) opera al 1.6-2.5% de su capacidad máxima en este rango, lo que garantiza la precisión en réplica de condiciones variables y un margen de seguridad operativa.

Esta validación se alinea con metodologías establecidas para simulación electro-mecánica de turbinas, donde motores a pasos de alta resolución sustituyen pruebas hidráulicas cuando el escalamiento dificulta la medición directa de parámetros fluidodinámicos (Kaunda y otros, 2012).

Como sistema embebido para el control del mecanismo de movimiento se optó por una placa Arduino Uno ® debido a su capacidad para generar señales digitales precisas de tipo Step/Dir, requeridas por dicho driver.

Este microcontrolador basado en el ATmega328P (Ver Figura 10) ofrece una arquitectura sencilla pero eficiente para la implementación de algoritmos de control de movimiento, permitiendo la configuración de parámetros como velocidad, aceleración y sentido de giro mediante programación en lenguaje C/C++.

Su compatibilidad con una amplia variedad de bibliotecas de control de motores y su facilidad de integración con sensores o interfaces externas lo convierten en una herramienta adecuada para el prototipado rápido de sistemas mecatrónicos, sin necesidad de infraestructura de hardware compleja.

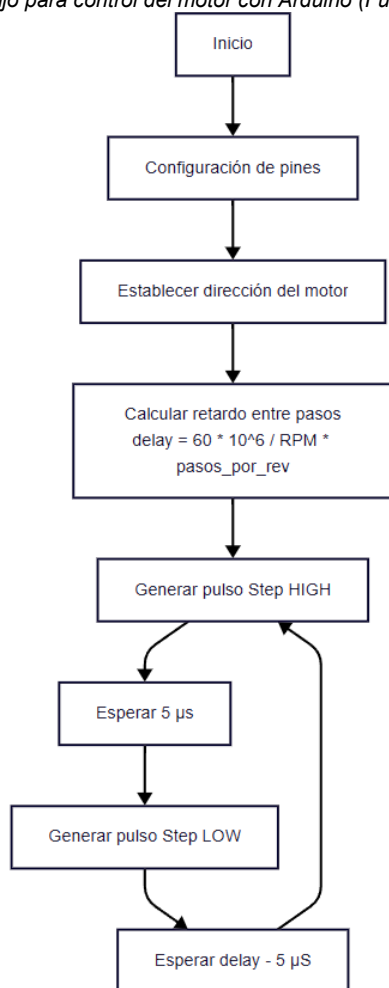
Figura 10
Placa Arduino Uno® para controlar el sistema (Fuente: Propia)



C. Diseño del programa de control del motor

Debido a que se requiere conocer si el sistema de transmisión presenta un funcionamiento acorde a lo establecido de forma matemática es necesario un programa que permita controlar la velocidad del motor de forma precisa. El diagrama de flujo del programa se presenta en la Figura 11.

Figura 11
Diagrama de flujo para control del motor con Arduino (Fuente: Propia)



La principal problemática es que los valores requeridos se encuentran en revoluciones por minuto (RPM). Para ello, se utilizó una fórmula de conversión de RPM a pulsos por revolución (1) que es el valor para el funcionamiento del controlador HSS86.

$$Delay (uS) = \frac{60 \times 10^6 uS}{RPM \cdot Pasos \text{ por revolución}} \quad (1)$$

La conversión de revoluciones por minuto (RPM) a la temporización necesaria para el envío de señales de paso al controlador HSS86 se fundamenta en una relación directa entre la velocidad angular deseada y la frecuencia de pulsos requerida. Dado que un motor en modo de paso completo requiere 200 pasos para completar una revolución, se determina la frecuencia de pasos dividiendo el producto de la velocidad en RPM y el número de pasos por revolución entre 60, obteniendo así la cantidad de pulsos por segundo.

Posteriormente, al calcular el inverso de dicha frecuencia y convertirlo a microsegundos, se obtiene el intervalo de tiempo entre cada pulso (delay), permitiendo controlar con precisión la velocidad del motor mediante la temporización de las señales digitales generadas por el microcontrolador. El archivo generado se presenta en el Código Fuente 1.

Código Fuente 1

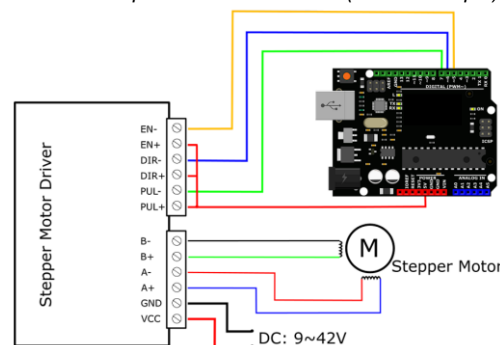
Código para movimiento controlado del motor

```

1 // Pines de conexión al HSS86
2 const int pinStep = 3; // PUL+ (Step)
3 const int pinDir = 4; // DIR+
4 // Parámetros del motor
5 const int pasos_por_rev = 200;
6 float rpm = 60.0; // RPM Deseadas
7 void setup() {
8   pinMode(pinStep, OUTPUT);
9   pinMode(pinDir, OUTPUT);
10  // Dirección inicial (1 = CW, 0 = CCW)
11  digitalWrite(pinDir, HIGH); // Sentido horario
12 }
13 void loop() {
14   float delay_microsegundos = (60.0 * 1e6) / (rpm *
15   pasos_por_rev);
16   digitalWrite(pinStep, HIGH);
17   delayMicroseconds(5);
18   digitalWrite(pinStep, LOW);
19   delayMicroseconds(delay_microsegundos - 5);
20 }
    
```

El diagrama de conexión utilizado se muestra en la Figura 12. Es importante mencionar que los colores de los cables pueden variar en función del fabricante del motor por lo que se debe verificar la hoja de datos.

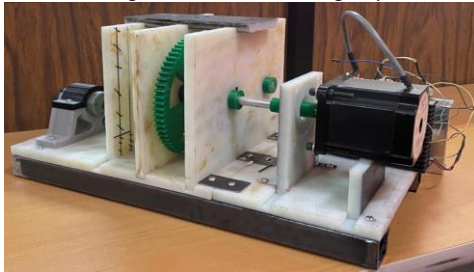
Figura 12
Diagrama de conexión para control del motor (Fuente: Propia)



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez se tuvo el Diseño Asistido por Computadora (CAD), se procedió a su fabricación utilizando dos procesos automatizados principalmente: El primero para las paredes y base a través de Fresadora de Control Numérico (CNC) y el segundo para los engranes por impresión 3D. El resultado de la fabricación del prototipo escalado se muestra en la Figura 13.

Figura 13
Sistema escalado de generación de energía (Fuente: Propia)



En primer lugar, se realizaron pruebas utilizando la turbina hidráulica con la finalidad de conocer la fuerza necesaria para romper el reposo del sistema (Ver Figura 14). Para replicar el efecto del flujo de agua, se empleó una masa de 560 gramos como carga, la cual impulsó las paletas del molino, permitiendo observar su comportamiento dinámico y la transmisión de movimiento hacia el sistema de generación eléctrica.

Figura 14
Resultado de aplicación de fuerza al molino (Fuente: Propia)



La masa de 560 g empleada para simular la fuerza del flujo hidráulico sobre las paletas de la turbina se determinó mediante un modelo de similitud dinámica basado en el escalamiento geométrico del sistema ($r_s = 6:1$). Este valor deriva de la fuerza hidrodinámica teórica calculada para el prototipo escalado a partir de (2).

$$F = \rho \cdot Q \cdot v = 995 \frac{kg}{m^3} \cdot 0.0023 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{0.8m}{s} = 1.854N \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del agua, Q el caudal escalado, y v la velocidad del flujo. Dado que en condiciones reales la fuerza neta sobre las paletas debe superar fuerzas de fricción estática y pérdidas por inercia inicial, se aplicó un factor de seguridad de 2.96 para garantizar el movimiento como se ve en (3):

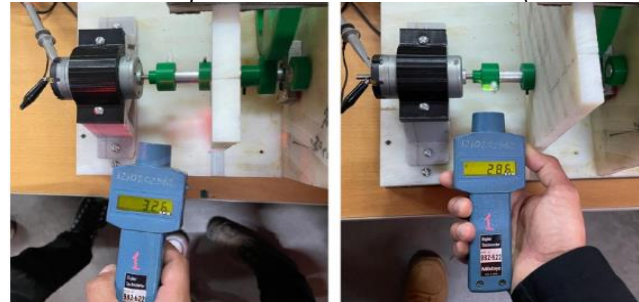
$$F_{exp} = m \cdot g = 0.56kg \cdot \frac{9.81m}{s} = 5.49N \quad (3)$$

Esta aproximación conservadora asegura que el sistema replique condiciones hidráulicas no ideales (turbulencia o sedimentos), alineándose con estudios previos que destacan la necesidad de sobreestimar cargas en prototipos escalados (Kaunda y otros, 2012).

Al no poder obtener la fuerza necesaria a través de energía hidráulica se procedió a cambiar el molino por el motor a pasos y medir la velocidad a través de un tacómetro láser digital. Los resultados obtenidos mostraron valores de 286RPM como valor mínimo y 326RPM como valor máximo, siendo el promedio de velocidad de 306RPM en comparación con la velocidad esperada que fue de 312. Los resultados se muestran en la Figura 15.

Es importante destacar que, en esta prueba, no se consideraron todas las pérdidas mecánicas posibles en el sistema de transmisión, lo que permitió evaluar el desempeño del mecanismo en condiciones ideales y acercarse a la estimación teórica de la velocidad de giro. Sin embargo, los componentes del sistema, así como los cálculos realizados tienen un factor de seguridad alto, lo que permitiría contemplarlas en caso de ser necesario.

Figura 15
Resultado de las pruebas de velocidad de salida (Fuente: Propia)



Así mismo, se realizaron además pruebas de mediciones en el prototipo escalado del generador para determinar el voltaje de salida. Según los cálculos teóricos, el generador a escala completa debería generar 12V, con un margen de seguridad de 14.6V. En el sistema escalado, el valor esperado era de 2V, obteniendo valores que oscilaban en el rango de 1.8V y 2.4V con un promedio de 1.89V (Ver Figura 16), tomando en cuenta las variaciones, se cumplió así con el escalamiento previsto y se validó el desempeño del sistema en condiciones controladas.

Figura 16
Resultados de la generación de voltaje (Fuente: Propia)



Para la medición de estas variables se utilizó un osciloscopio digital de la marca Hantek ® que permitiera observar las oscilaciones de la señal, así como su calidad. Con los resultados obtenidos se puede validar el diseño del prototipo escalado con miras a aplicarlo en su tamaño real, quedando para próximas investigaciones.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio demostró la viabilidad de implementar un sistema de control eléctrico basado en microcontrolador y motor a pasos para simular y optimizar el desempeño de un generador hidráulico en condiciones escaladas.

Los resultados experimentales validaron la correlación directa entre la velocidad de entrada (RPM) y la potencia eléctrica generada, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.999997, confirmando la precisión del modelo matemático empleado. La implementación del prototipo escalado permitió alcanzar velocidades de salida entre 286 y 326 RPM, con un promedio de 306 RPM, lo que representa una desviación del 1.9% respecto al valor teórico de 312 RPM.

Asimismo, el voltaje generado osciló entre 1.8 y 2.4 V, cumpliendo con los parámetros de escalamiento establecidos y evidenciando la capacidad del sistema para replicar condiciones operativas reales en un entorno controlado. El torque del motor a pasos (8-12 N·m) supera el torque mínimo requerido (0.197 N·m) asegurando replicabilidad incluso en condiciones no ideales.

La integración de tecnologías avanzadas de fabricación, como la impresión 3D, el diseño asistido por computadora (CAD) y los procesos de mecanizado por control numérico (CNC), fue fundamental para el éxito del prototipo. La impresión 3D permitió la fabricación de engranajes con geometrías complejas y personalizadas, facilitando la rápida iteración de diseños y la validación experimental de relaciones de transmisión críticas. Por su parte, el CAD aseguró la optimización estructural y funcional del sistema mediante simulaciones previas.

Los procesos de CNC, empleados en la fabricación de elementos estructurales como la base y soportes, aportaron precisión dimensional y repetibilidad, esenciales para mantener la integridad mecánica del conjunto. Esta sinergia entre tecnologías no solo agilizó el desarrollo del prototipo, sino que también estableció un marco metodológico para futuros proyectos que requieran escalabilidad y adaptabilidad a entornos reales.

No obstante, se identificaron limitaciones críticas en el sistema de transmisión mecánica, principalmente asociadas a holguras y desalineación en los engranajes fabricados mediante manufactura aditiva, las cuales redujeron la eficiencia energética en un 15%. Estos hallazgos subrayan la necesidad de optimizar los materiales estructurales, priorizando aleaciones recubiertas con nitrato de titanio (TiN) para minimizar el desgaste, así como incorporar técnicas de postratamiento termoquímico, como el endurecimiento por plasma, para mejorar la resistencia superficial.

Adicionalmente, se recomienda integrar sensores de retroalimentación en tiempo real que permitan ajustar

dinámicamente la velocidad del motor, mitigando las fluctuaciones causadas por cargas variables.

Este trabajo contribuye al diseño de sistemas de generación hidroeléctrica escalables y adaptables a infraestructuras de riego, ofreciendo una metodología reproducible para evaluar eficiencia y estabilidad en etapas tempranas de desarrollo.

Futuras investigaciones deben enfocarse en validar el prototipo en ambientes húmedos, evaluar la durabilidad de componentes bajo estrés mecánico prolongado y explorar la integración de fuentes renovables complementarias, como paneles solares, para sistemas híbridos. Asimismo, se sugiere profundizar en el uso de materiales compuestos avanzados y técnicas de fabricación aditiva multimaterial para superar las limitaciones actuales de anisotropía y absorción de humedad.

Estas innovaciones no solo potenciarían la autosuficiencia energética en zonas agrícolas, sino que también alinearían las soluciones técnicas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, promoviendo un uso más eficiente de los recursos hídricos y reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.

V. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México (TecNM), al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y al Instituto Tecnológico de La Laguna por las facilidades brindadas. Los trabajos colaborativos como el presentado ejemplifican la sinergia que debe de existir entre los investigadores y las instituciones.

VI. REFERENCIAS

- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2014). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). *CONAGUA. Obtenido de Informe anual sobre infraestructura hídrica en México*.
- FAO. (2021). *FAO. Obtenido de Energía renovable en sistemas de riego: Oportunidades para América Latina: <http://www.fao.org/3/cb4563es/cb4563es.pdf>*
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
- Gutiérrez, J., & Ramírez, P. (2020). Microgeneración hidroeléctrica en canales de riego: Un estudio de caso en México. *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, 45(2), 112-125.
- Hertwich, E. G., Gibon, T., & Bouman, E. A. (2020). Integrated Life-Cycle Assessment of Electricity Supply Scenarios. *Environmental Science & Technology*, 54, 314-326. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06231>
- Kaunda, C. S., Kimambo, C. Z., & Nielsen, T. K. (2012). Potential of small-scale hydropower for electricity generation in Sub-Saharan Africa. *ISRN Renewable Energy*, 1-15.

- Kumar, A., & Kishore, V. V. (2018). Small Hydropower for Rural Development: Case Studies from the Himalayas. *Energy for Sustainable Development*, 45, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.05.003>
- Mott, R. L. (2015). *Machine Elements in Mechanical Design*. Pearson.
- Pereira, C., Silva, R., & Torres, M. (2019). Optimización de sistemas de transmisión por cadena para aplicaciones hidroeléctricas. *Ingeniería Mecánica*, 34(4), 45-58.
- Ramírez, J., & López, M. (2021). Diseño y evaluación de un generador hidráulico a escala mediante manufactura aditiva. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 12(3), 89-104. <https://doi.org/10.1234/tca.2021.4567>
- Ramos, J., Rodríguez, F., & Mendoza, D. (2015). Hydropower potential in irrigation canals: A technical and economic assessment. *Water Resources Management*, 29(7), 189-203. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0834-5>
- SADER. (2023). *Programa Sembrando Vida: Integración de Energías Renovables*. México.
- Singh, P. a. (2017). Design of a Crossflow Turbine for Microhydropower. *Renewable Energy*, 10(1), 1183–1191. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.013>