



ROBÓTICA AUTÓNOMA APLICADA AL MANTENIMIENTO SUBACUÁTICO Y CONTROL DE CALIDAD DEL AGUA EN SISTEMAS ACUÍCOLAS

José Victoriano Chávez Aguilar

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, unidad Azcapotzalco

jchaveza@ipn.mx

ORCID: 0009-0001-0861-9276

Marimarg Castillo Vieyra

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, unidad Azcapotzalco

mcastillov@ipn.mx

ORCID: 0009-0003-8441-8542

Alfredo Iván Villa Santos

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, unidad Azcapotzalco

avillas2100@alumno.ipn.mx

ORCID: 0009-0002-7429-952X

Resumen

*La acumulación de materia orgánica en estanques acuícolas compromete severamente la calidad del agua y la salud de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*). Para abordar esta problemática, el presente artículo describe el diseño mecatrónico de un sistema robótico autónomo sumergible, destinado a la remoción de sedimentos en estanques de 80,000 litros en criaderos de San José de las Manzanas, Estado de México. La metodología abarcó el diseño mecánico utilizando acero inoxidable AISI 316L y polietileno de alta densidad (HDPE) con estanqueidad grado IP68, así como la implementación de una arquitectura de control basada en un microcontrolador ESP32. Para garantizar una navegación precisa, se integró una red de sensores y un sistema de control de lazo cerrado (PID) con compensación anti-windup. Los resultados teóricos y de simulación demuestran que el vehículo alcanza una velocidad nominal de 0.4 m/s, logrando procesar un estanque en menos de 20 minutos con una autonomía energética aproximada de cuatro horas. Se concluye que el sistema optimiza significativamente las labores de mantenimiento, proyectando una reducción del 20% en contaminantes nitrogenados y promoviendo la sustentabilidad operativa en el sector acuícola.*

Palabras clave: Acuicultura, Robótica autónoma, Control PID, Calidad del agua, Remoción de sedimentos.



El cultivo de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) representa una actividad de suma importancia para el sector alimentario. No obstante, el éxito productivo de esta especie depende estrictamente de mantener parámetros fisicoquímicos estables, requiriendo aguas limpias y con concentraciones de oxígeno disuelto superiores a 5 mg/L (FAO, 1995). Para optimizar su desarrollo, el rango idóneo de oxígeno oscila en 8.5 ppm a una temperatura de 15 °C, considerando que el incremento térmico disminuye la solubilidad del oxígeno (Boyd y Tucker, 1998); asimismo, el pH debe conservarse en un rango de 6.5 a 8.5 (NOM-060-SAG/PESC-2016). Desviaciones menores a 5 ppm de oxígeno inducen estrés y pueden resultar letales para los especímenes (SENASICA, 2003).

Un desafío operativo y biológico crítico en estos sistemas es la acumulación constante de materia orgánica en el fondo de los estanques, compuesta por restos de microorganismos, heces y alimento no consumido (Boyd y Tucker, 1998). Si estos sedimentos no son removidos con una periodicidad semanal, sufren procesos de descomposición que generan compuestos tóxicos como amoníaco y nitritos, alterando severamente el equilibrio del ecosistema acuático (FAO, 1995). Estas condiciones deficientes de higiene no solo incrementan los costos de mantenimiento, sino que propician la propagación de patologías graves como la Necrosis Pancreática Infecciosa (IPNV) o la enfermedad bacteriana del riñón (BKD) (SENASICA, 2003).

En el caso de estudio abordado, las instalaciones del criadero cuentan con 22 estanques construidos en concreto, cuya infraestructura de conducción hídrica opera por gravedad para minimizar costos operativos (Hernández Alba et al., 2025). El sistema se divide según la etapa de desarrollo (alevines, juveniles y adultos de engorda). Los estanques de engorda, que presentan la mayor tasa de

sedimentación, poseen dimensiones aproximadas de 25 m de largo y 3 m de ancho, con un tirante de agua que alberga un volumen nominal de 80,000 litros.

Actualmente, la remoción de sedimentos se realiza de manera manual, lo cual exige que dos operarios dediquen hasta tres jornadas laborales completas para el mantenimiento total del sistema, requiriendo entre 40 y 60 minutos por estanque (Hernández Alba et al., 2025). Dicha labor resulta ineficiente, representa un esfuerzo físico considerable y constituye una perturbación constante que compromete el bienestar animal. Ante esta problemática, resulta imperativa la implementación de soluciones tecnológicas automatizadas.

Metodología y Análisis de Requerimientos

El desarrollo del sistema robótico se rigió por un esquema metodológico de diseño de ingeniería estructurado en cuatro fases fundamentales: análisis de la calidad del agua, diseño de la movilidad subacuática, cálculo del sistema hidráulico e integración de la arquitectura de control. A continuación, se detallan las etapas de evaluación del entorno y la selección conceptual del dispositivo.

Evaluación de Parámetros Fisicoquímicos

Para establecer los requerimientos operativos del robot, se llevó a cabo una fase de monitoreo *in situ* durante siete días consecutivos en los estanques de cultivo. Con el objetivo de conformar una base de datos preliminar sobre las condiciones del entorno, se realizaron dos mediciones diarias empleando sensores portátiles y tiras reactivas multiparamétricas. El procedimiento analítico se ejecutó siguiendo las especificaciones del fabricante (Lomas®, 2025).

Este monitoreo permitió obtener un perfil temporal de los parámetros críticos para la

viabilidad de la trucha arcoíris, focalizándose en el potencial de hidrógeno (pH), oxígeno disuelto, nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-). En las figuras 1 y 2 se ilustra el proceso de contrastación colorimétrica utilizado durante la evaluación inicial.



Figura 1. Ejemplo de tira reactiva comparada con la escala de colores impresa (elaboración propia).

Este proceso se hizo durante la evaluación inicial en los estanques de truchas con el fin de identificar los parámetros básicos pH GH KH. Las fotografías fueron tomadas con luz natural, asegurando una correcta interpretación del color.

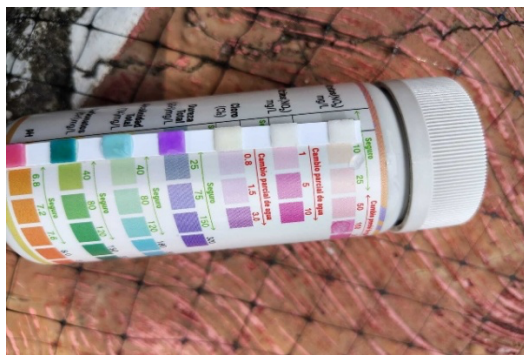


Figura 2. Tira reactiva comparando nitratos NO_2^- y NO_3^- . (elaboración propia).

Los resultados obtenidos (resumidos en la tabla 1) sirvieron como referencia diagnóstica fundamental. Al comparar el rango observado con los valores normativos recomendados por la FAO (1995) y la NOM-060-SAG/PESC-2016,

se validó la necesidad de implementar un sistema de limpieza sumergible que mitigue la acumulación de compuestos nitrogenados sin alterar el balance hidráulico y ambiental del estanque.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos preliminares.

Parameter	Measured Value (Observed Range)	Recommended Value (Regulatory Range)	Reference Source
pH	7.6 – 8.0	6.8 – 8.0	FAO (1995); NOM-060-SAG/PESC-2016
GH (mg/L CaCO_3)	120 – 180	80 – 200	Boyd & Tucker (1998)
KH / TA (mg/L CaCO_3)	80 – 120	50 – 150	SENASICA (2003)
Cl_2 (mg/L)	0	0	NOM-060-SAG/PESC-2016
NO_2^- (mg/L)	0 – 0.5	< 0.5	SENASICA (2003)
NO_3^- (mg/L)	25 – 50	< 50	FAO (1995)

Nota: Medidos en estanques de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) comparados con los valores de referencia recomendados por las normas de acuicultura (FAO, 1995); (NOM-060-SAG/PESC, 2016).

Selección del Concepto de Diseño

Para traducir las necesidades de los acuicultores en especificaciones técnicas de ingeniería, se implementó la metodología de Despliegue de la Función de Calidad (QFD, por sus siglas en inglés). El análisis de la "Casa de la Calidad" determinó que los requerimientos con mayor ponderación por parte de los usuarios finales fueron una operabilidad intuitiva (fácil manipulación) y una alta robustez mecánica (durabilidad) frente a las condiciones sumergidas.

Con base en estos requerimientos, se plantearon tres alternativas conceptuales de diseño:

1. Un vehículo sumergible de tracción con comunicación Bluetooth y sistema de bombeo interno.
2. Un sistema de aspiración móvil con recirculación externa.
3. Un sistema autónomo instrumentado con sensores de navegación.

Estas alternativas fueron evaluadas exhaustivamente mediante una Matriz de Pugh. El análisis arrojó como resultado óptimo la selección del vehículo autónomo de tracción por orugas controlado a distancia. Este concepto demostró la mejor viabilidad técnica al ofrecer un equilibrio superior entre la eficiencia de remoción de sedimentos, la autonomía operativa y la viabilidad de manufactura con materiales de grado alimenticio.

Desarrollo de Ingeniería (Diseño del Sistema)

El diseño integral del sistema de limpieza subacuática requirió la convergencia de la ingeniería mecánica, hidráulica y electrónica. El objetivo central consistió en desarrollar un dispositivo capaz de aspirar sedimentos de hasta 1000 μm sin causar turbidez en el agua ni comprometer la integridad física de las truchas.

Ingeniería Mecánica e Hidráulica

El diseño integral del sistema requirió la convergencia de la ingeniería mecánica e hidráulica con el objetivo central de desarrollar un dispositivo capaz de aspirar sedimentos no mayores a 1000 μm , evitando causar turbidez en el agua o comprometer la integridad física de las truchas.

Para garantizar la durabilidad operativa en el entorno sumergido, el chasis y los componentes estructurales (boquilla de succión, prefiltros y línea de descarga) fueron diseñados utilizando polietileno de alta densidad (HDPE) y acero

inoxidable AISI 316L. La selección de estos materiales cumple con las normativas internacionales para aplicaciones acuícolas (ISO 14159 y ASTM A240). Asimismo, se incorporaron conectores eléctricos herméticos para asegurar un grado de protección IP68, validado bajo el estándar IEC 60529. El modelado tridimensional preliminar de esta estructura mecánica, desarrollado para operar a profundidades de hasta 2 metros utilizando software CAD (Autodesk Inventor Professional), se presenta en la figura 3.

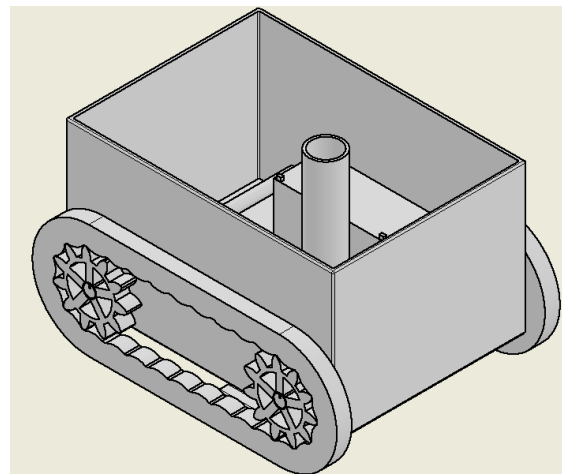


Figura 3. Ejemplo del diseño preliminar del robot de limpieza, hecho por Autodesk Inventor Professional 2025, Autodesk® 2026 (elaboración propia)

Para asegurar la tracción efectiva de las orugas en el fondo del estanque, se calculó una flotabilidad negativa controlada. El sistema presenta un peso en el aire de 186.4 N frente a una fuerza de empuje hidrostático de 72.2 N, resultando en una masa sumergida efectiva que maximiza la estabilidad dinámica del vehículo.

En cuanto al sistema de succión, impulsado por una bomba centrífuga, se estableció como restricción de diseño una velocidad máxima en la boquilla (V_b) inferior o igual a 0.5 m/s para prevenir la succión accidental de peces. Considerando una geometría de boquilla



rectangular de 40 mm x 28.5 mm, el caudal teórico requerido se fijó en 27.4 L/min.

Mediante la aplicación de la ecuación de Darcy-Weisbach, se calcularon las pérdidas de carga a lo largo de 10.5 metros de tubería flexible, determinando una carga total del sistema (H_{sys}) en un rango operativo de 1.0 a 1.5 metros. El resumen de estos parámetros operativos y normativos se detalla en la tabla 2, la cual consolida el diseño hidráulico del sistema de limpieza sumergible.

Tabla 2. Resumen del diseño hidráulico del sistema de limpieza sumergible para estanques de cultivo de truchas.

Parameter	Symbol	Value / Range	Unit
Nozzle velocity	v_b	0.4	$m \cdot s^{-1}$
Nozzle area	A_b	0.00114	m^2
Total flow rate	Q	27.4	$L \cdot min^{-1}$
Hose length	L	10.5	m
Internal diameter	D	0.0381	m
Total head losses	$h_f + h_m$	≈ 0.07	m
Total system head	H_{sys}	1.0–1.5	m
Hydraulic power	P_h	4.5	W
Pump shaft power	P_e	9	W
Structural materials	—	HDPE / AISI 316L / EPDM / PVC	—
Applicable standards	—	ISO 14159, IEC 60529, ASTM A240, NOM-060-SAG/PESC	—

Arquitectura Electrónica y Sistema de Control

La unidad central de procesamiento se basó en un microcontrolador ESP32, seleccionado por su alta eficiencia energética y múltiples interfaces de comunicación. Este procesador coordina de manera armónica el módulo de movilidad y el sistema hidráulico, integrándose *Ejemplar 34. Enero-junio de 2026.*

a una red de instrumentación bajo el protocolo I2C.

Para la percepción del entorno, el sistema cuenta con sensores de temperatura y presión sumergibles que monitorean las condiciones del estanque. La navegación segura se garantiza mediante la fusión de datos de sensores ultrasónicos para la evasión de obstáculos (paredes y peces) y finales de carrera mecánicos que delimitan los rangos físicos de operación. En paralelo, sensores de efecto Hall e INA219 proporcionan protección contra sobrecorrientes y permiten el monitoreo de la potencia eléctrica instantánea, proyectando la telemetría en tiempo real a través de una pantalla LCD de 20x4.

La cinemática diferencial del vehículo es gobernada por un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) digital. Este algoritmo minimiza el error (ϵ_k) entre la velocidad de referencia (V_{ref}) y la velocidad medida en las orugas (V_k). La ley de control discreta implementada se describe mediante la siguiente ecuación:

$$u(k) = K_p e_k + K_i \sum e_k \Delta t + K_d \frac{e_k - e_{k-1}}{\Delta t}$$

Para asegurar la estabilidad del lazo cerrado, se incorporó un esquema anti-windup que satura la acumulación del término integral, acoplado a un filtro en la acción derivativa para atenuar el ruido de alta frecuencia proveniente de los sensores de velocidad (modelo F249). Adicionalmente, se programaron rampas de aceleración en las referencias de velocidad para mitigar los picos de corriente transitorios durante el arranque de los motores.

Gestión Energética y Autonomía



El suministro de potencia recae en un banco de baterías de Litio-Ferfosfato (LiFePO_4) de 12V y 7Ah (84 Wh). Esta configuración energiza el sistema de control y dos motorreductores de 12V con un consumo nominal de 2A cada uno. Las pruebas teóricas indican que este arreglo, especialmente al configurarse en paralelo, proporciona una autonomía operativa continua aproximada de 4 horas, satisfaciendo holgadamente los requerimientos de las jornadas de mantenimiento.

Resultados Projectados

La validación teórica y las estimaciones cinemáticas indican que el sistema robótico es capaz de procesar la superficie total operativa de un estanque de engorda estándar (75m^2 , correspondiente a un volumen nominal de retención de 80,000 litros) en un tiempo inferior a 20 minutos. Al contrastar esta métrica con los registros del mantenimiento manual, se proyecta una optimización del 60% en el tiempo de operación. Esta automatización no solo representa una mejora sustancial en la eficiencia laboral, sino que minimiza el tiempo de perturbación física en el cuerpo de agua, reduciendo el estrés inducido en los peces durante las labores de limpieza.

Desde una perspectiva fisicoquímica y biológica, se estima que la implementación programada y continua de este sistema de succión reducirá la concentración de contaminantes nitrogenados (específicamente amoníaco y nitritos) en un 20%. Al mitigar la demanda bioquímica de oxígeno generada por la descomposición de la materia orgánica, se proyecta un incremento proporcional en la disponibilidad de oxígeno disuelto.

En conjunto, la consolidación de este entorno acuático estable y saludable propiciará una aceleración en las tasas de crecimiento de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) y

Ejemplar 34. Enero-junio de 2026.

reducirá de manera significativa los índices de mortalidad y las pérdidas económicas asociadas a patologías.

Conclusiones

El diseño y desarrollo mecatrónico de este sistema robótico sumergible representa un avance tecnológico sustancial para la modernización de la acuicultura mexicana. La integración exitosa de una arquitectura de control PID, el modelado mecánico con estanqueidad avanzada IP68 y la implementación de una red robusta de sensores, demuestra la viabilidad de automatizar una labor que tradicionalmente ha sido físicamente agotadora y biológicamente ineficiente.

Los resultados proyectados indican que la remoción autónoma de sedimentos optimizará los tiempos de operación hasta en un 60% frente al método manual, garantizando la cobertura total del estanque en periodos inferiores a 20 minutos. Si bien, el diseño mecatrónico y la simulación demuestran la viabilidad teórica, el *trabajo futuro* contempla la manufactura del prototipo y su validación experimental *in situ* para corroborar la reducción empírica del 20% en contaminantes.

Asimismo, la capacidad del sistema para reducir significativamente la acumulación de compuestos nitrogenados no solo optimiza la productividad del criadero mediante la prevención de patologías, sino que promueve prácticas de producción responsable, alineando la tecnología nacional con los estándares internacionales de sustentabilidad y bienestar animal.

Referencias.

Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (1998). Pond Aquaculture Water Quality Management. Springer.



Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2005). *Modern Control Systems* (10.^a ed.). Pearson.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (1995). *Manual práctico para el cultivo de la trucha arcoíris*. Roma, Italia.

NOM-060-SAG/PESC-2016. (2016). *Producción acuícola en aguas continentales – Especificaciones sanitarias*. Diario Oficial de la Federación (DOF), México.

Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5.^a ed.). Prentice Hall.

SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria). (2003). *Manual de buenas prácticas de producción acuícola de la trucha*. México.

Nota: Si las figuras (fotos, gráficas, diagramas) y las tablas no son de elaboración propia, debe consignarse la fuente de las mismas después de su título. Tomada de: