



## ESTRATEGIA FORMATIVA BASADA EN UN MODELO METODOLÓGICO DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA INTELIGENTE PARA SISTEMAS AUTOMATIZADOS EN PISCICULTURA SOSTENIBLE

Gilma Paola Andrade Trujillo<sup>1</sup>  
ORCID: 0000-0001-8676-3612

Hakna Ferro Azcona<sup>2</sup>  
ORCID: 0000-0002-8934-1404

Victoria Eugenia Gutiérrez Cuevas<sup>3</sup>  
ORCID: 0009-0006-0597-4113

<sup>1</sup> Doctoranda en Proyectos, Universidad Americana de Europa (UNADE). Correo: paolatrujillo79@gmail.com

<sup>2</sup> Profesora-investigadora, Universidad Americana de Europa (UNADE). Correo: hakna.ferro@aulagrupo.es

<sup>3</sup> Doctoranda en Proyectos, Universidad Americana de Europa (UNADE). Correo: micaneiva@gmail.com

Revista de Investigación Multidisciplinaria Iberoamericana, RIMI © 2023 by Elizabeth Sánchez Vázquez is licensed under

## RESUMEN

La transición energética plantea retos concretos para los sectores agroindustriales y para los procesos de formación que los acompañan. En la piscicultura del departamento del Huila, esta situación se hace visible en los sistemas automatizados de oxigenación, cuyo funcionamiento depende en gran medida de fuentes convencionales de energía. Esta dependencia incrementa los costos de operación y limita la sostenibilidad ambiental de las unidades productivas. A ello se suma una brecha metodológica: todavía son escasas las propuestas que articulan energías renovables, automatización, inteligencia artificial y análisis de ciclo de vida en experiencias formativas vinculadas con problemas reales del sector. Frente a esta realidad, el estudio propone desarrollar un modelo metodológico de transición energética inteligente que funcione, al mismo tiempo, como estrategia formativa para sistemas automatizados de piscicultura sostenible. La propuesta integrará energías renovables, automatización, inteligencia artificial y análisis de ciclo de vida dentro de una misma ruta de trabajo. La investigación seguirá un enfoque mixto, con alcance descriptivo y proyectivo. Se combinarán la revisión documental, las entrevistas semiestructuradas y la simulación computacional mediante herramientas como MATLAB/Simulink, PVsyst y Proteus. El proceso se organizará en cinco momentos: fundamentación teórica, caracterización del contexto energético y operativo, diseño del modelo, simulación y validación, y evaluación de su pertinencia formativa y capacidad de transferencia. El producto central será un marco metodológico de transición energética inteligente, acompañado de un tablero interactivo para consultar variables energéticas, operativas y ambientales. También se modelarán escenarios que permitan valorar la sostenibilidad y el desempeño del sistema antes de una implementación física. Más allá del componente tecnológico, la propuesta busca fortalecer competencias interdisciplinarias y favorecer una apropiación crítica de las tecnologías aplicadas a la piscicultura y a otros entornos agroindustriales.

**Palabras clave:** Análisis de Ciclo de Vida; Automatización; Inteligencia Artificial; Piscicultura Sostenible; Transición Energética.

## ABSTRACT

Energy transition poses practical challenges for agro-industrial production and for the educational processes that support it. In fish farming systems in the department of Huila, Colombia, these challenges are evident in automated aeration equipment that still relies heavily on conventional energy sources. Such dependence increases operating costs and constrains the environmental sustainability of production units. A methodological gap also remains: few educational proposals connect renewable energy, automation, artificial intelligence, and life cycle assessment with real problems faced by the sector. This study therefore aims to develop a smart energy-transition methodological model that can also serve as a learning strategy for automated sustainable fish farming. The proposal brings renewable energy, automation, artificial intelligence, and life cycle assessment together within a single working framework. A mixed-methods design with descriptive and project-oriented components will be used. Documentary review, semi-structured interviews, and computational simulation in MATLAB/Simulink, PVsyst, and Proteus will be combined. The study is organized into five stages: theoretical grounding, characterization of the energy and operational context, model design, simulation and validation, and assessment of educational relevance and transferability. The main expected outcome is a smart energy-transition framework supported by an interactive dashboard for examining energy, operational, and environmental variables. Simulation scenarios will also be developed to assess sustainability and system performance before physical implementation. In addition to its technical contribution, the model is intended to strengthen interdisciplinary competencies and encourage the critical appropriation of technologies in fish farming and comparable agro-industrial settings.

**Keywords:** Artificial Intelligence; Automation; Energy Transition; Life Cycle Assessment; Sustainable Fish Farming.

## INTRODUCCIÓN

La transición energética ya no puede entenderse únicamente como el cambio de una fuente convencional por una renovable. En los sectores agroindustriales implica revisar cómo se diseñan, operan y enseñan los sistemas productivos. Esto exige combinar conocimiento técnico, criterios ambientales y herramientas digitales capaces de responder a situaciones concretas. Desde esa mirada, la automatización, la inteligencia artificial, las energías renovables y el análisis de ciclo de vida dejan de ser componentes aislados y pasan a formar parte de una misma estrategia de transformación.

La piscicultura permite observar con claridad esta necesidad. La calidad del agua y el bienestar de los peces dependen, entre otros factores, de un monitoreo constante y de sistemas de oxigenación que consumen energía durante amplios periodos. En el Huila, uno de los territorios con mayor actividad piscícola del país, esta demanda energética se enfrenta a costos de operación elevados y, en algunas zonas rurales, a condiciones de suministro que pueden afectar la continuidad del proceso productivo.

Durante los últimos años se han desarrollado soluciones de automatización y sistemas alimentados con energías renovables. Sin embargo, con frecuencia se diseñan como respuestas independientes: se instala un sistema fotovoltaico, se incorpora un sensor o se automatiza una tarea, pero no siempre se analiza la relación entre el desempeño técnico, el impacto ambiental, la toma de decisiones y la formación de quienes operarán la tecnología. Esta fragmentación dificulta la apropiación del conocimiento y limita la evaluación integral del sistema desde sus primeras etapas de diseño.

El problema también tiene una dimensión educativa. La formación en ingeniería requiere escenarios en los que el estudiante pueda relacionar conceptos de energía, control, sostenibilidad y simulación con necesidades reconocibles del entorno. Trabajar sobre un sistema piscícola real o representativo permite pasar de la explicación teórica a la comprensión de decisiones concretas: cuánto consume un equipo, qué fuente energética resulta viable, cómo se comporta el sistema ante cambios operativos y qué impactos ambientales genera a lo largo de su ciclo de vida.

Con base en esta necesidad, el objetivo general es desarrollar un modelo metodológico de transición energética inteligente, concebido como estrategia formativa para sistemas automatizados de piscicultura sostenible. El modelo integrará energías renovables, automatización, inteligencia artificial y análisis de ciclo de vida con el fin de mejorar la comprensión y la gestión de los componentes energéticos, operativos y ambientales de la oxigenación automatizada.

Para cumplir este propósito se plantean cinco objetivos específicos: caracterizar las variables energéticas, operativas, ambientales y formativas de los sistemas automatizados de oxigenación; diseñar una arquitectura metodológica que conecte tecnologías inteligentes con criterios de sostenibilidad; establecer mecanismos de evaluación técnica, energética y ambiental apoyados en simulación y análisis de ciclo de vida; desarrollar un esquema de optimización para la gestión energética y operativa; y examinar la aplicabilidad del modelo en otros contextos agroindustriales.

La pregunta que orienta el estudio es la siguiente: ¿cómo desarrollar un modelo metodológico de transición energética inteligente que integre sostenibilidad, automatización, inteligencia artificial y análisis de ciclo de vida como estrategia formativa para sistemas automatizados de piscicultura sostenible? Se parte de la hipótesis de que esta integración permitirá abordar el sistema de manera más completa y fortalecerá, de forma conjunta, su sostenibilidad energética y ambiental, su desempeño operativo y su valor formativo.

## ESTADO DEL ARTE

La literatura revisada evidencia que la transición energética en sistemas productivos ha evolucionado desde enfoques centrados principalmente en la sustitución de fuentes convencionales hacia

propuestas que incorporan generación renovable, automatización, adquisición de datos y gestión inteligente. En el ámbito agroindustrial, esta evolución responde a la necesidad de mejorar el desempeño energético sin trasladar los impactos ambientales hacia otras etapas del sistema. Sin embargo, los antecedentes analizados muestran que estos componentes no siempre se abordan de manera integrada, situación que resulta particularmente relevante en sistemas piscícolas automatizados, donde la disponibilidad energética, el control de variables ambientales y la continuidad de la oxigenación se encuentran estrechamente relacionados.

En el ámbito de la piscicultura, existe una primera convergencia entre los estudios revisados: la necesidad de disponer de sistemas de monitoreo y oxigenación capaces de responder a las condiciones variables del agua. Boyd y Tucker (2012) y Timmons y Ebeling (2010) destacan la importancia del oxígeno disuelto para el funcionamiento de los sistemas piscícolas, mientras que los desarrollos posteriores trasladan esta necesidad hacia soluciones automatizadas y energéticamente sostenibles. En este sentido, los antecedentes permiten reconocer que la eficiencia energética no puede analizarse de manera independiente del comportamiento operativo del sistema, dado que una reducción del consumo no sería pertinente si compromete las condiciones necesarias para la producción.

Desde la perspectiva energética, Gunkel et al. (2015) y Liu et al. (2019) presentan una convergencia clara al considerar la energía solar como alternativa para reducir la dependencia de fuentes convencionales en sistemas acuícolas. No obstante, sus aproximaciones se diferencian en el énfasis de la solución: mientras Gunkel et al. (2015) se orientan hacia el empleo de sistemas fotovoltaicos para apoyar la gestión de la calidad del agua en estanques de una región semiárida de Brasil, Liu et al. (2019) incorporan además el control inteligente y el seguimiento de las condiciones operativas. Esta diferencia es relevante porque muestra una transición desde una perspectiva predominantemente energética hacia otra que incorpora la relación entre generación, operación y control. Sin embargo, ambos antecedentes se concentran en demostrar la viabilidad o el desempeño de soluciones tecnológicas concretas y no plantean, dentro de lo revisado, una ruta metodológica que articule simultáneamente las dimensiones tecnológica, ambiental y formativa.

Los antecedentes latinoamericanos y colombianos refuerzan esta tendencia, aunque evidencian también una importante dispersión de las soluciones. Ríos y Ramírez (2017) desarrollaron un sistema automático de oxigenación alimentado con energía solar para una unidad piscícola rural, mientras que Valderrama et al. (2019) estudiaron el uso de energía solar en procesos de recirculación piscícola. Ambos trabajos convergen en demostrar la viabilidad de incorporar fuentes solares en actividades piscícolas y en su potencial para disminuir la dependencia energética convencional. La diferencia radica en el proceso productivo abordado: el primero se concentra en la oxigenación automática y el segundo en la recirculación. Esta especialización constituye un aporte importante para resolver necesidades particulares, pero también revela una limitación para la presente investigación: los antecedentes se encuentran asociados a funciones o componentes específicos del sistema y no a una estructura metodológica que permita relacionar, bajo criterios comunes, generación energética, automatización, gestión de datos, sostenibilidad ambiental y formación.

Desde el campo de la automatización, Bishop (2017) y Groover (2016) aportan elementos para comprender la importancia del monitoreo, la retroalimentación, el control y la comunicación en sistemas productivos. Existe una coincidencia entre estos enfoques y los antecedentes piscícolas en cuanto a la necesidad de medir variables críticas y generar respuestas oportunas. Sin embargo, la automatización por sí misma no resuelve el problema de la transición energética. Su principal limitación, frente al problema planteado en esta investigación, es que el control del proceso puede optimizar la operación sin incorporar necesariamente criterios relacionados con el origen de la energía utilizada, los impactos ambientales asociados a los componentes tecnológicos o el valor formativo de las decisiones adoptadas. En

consecuencia, la automatización constituye una dimensión necesaria del modelo, pero no suficiente para explicar una transición energética inteligente.

Una situación similar se identifica al considerar la inteligencia artificial. Russell y Norvig (2021) establecen que los sistemas inteligentes pueden utilizar datos para clasificar, predecir y seleccionar acciones, capacidades que, trasladadas al contexto piscícola, podrían apoyar la predicción de cambios en el oxígeno disuelto, la identificación de consumos atípicos o la programación del mantenimiento. No obstante, en el conjunto de antecedentes revisados se observa una menor articulación entre estas capacidades de inteligencia artificial y las decisiones energéticas, ambientales y formativas propias del sistema piscícola. Además, su utilización depende de la disponibilidad y calidad de los datos y de criterios que permitan interpretar adecuadamente las recomendaciones generadas. Por tanto, la inteligencia artificial representa un mecanismo potencial de apoyo a la toma de decisiones, pero requiere integrarse dentro de una arquitectura metodológica más amplia para evitar que se convierta en un componente tecnológico aislado.

La dimensión ambiental introduce otra diferencia importante frente a los estudios centrados en desempeño energético u operación. Zhou et al. (2020) advierten que una solución basada en energías renovables no puede considerarse automáticamente sostenible si la evaluación se limita a la etapa de funcionamiento. Desde esta perspectiva, el análisis de ciclo de vida permite ampliar la valoración hacia la fabricación, transporte, operación, mantenimiento, reposición y disposición de los componentes. Esta aproximación complementa los estudios orientados al ahorro energético, porque introduce una evaluación de los impactos que pueden permanecer ocultos cuando solamente se consideran indicadores de consumo o generación. Las normas ISO 14040 e ISO 14044 proporcionan, en este sentido, una estructura para definir el objetivo y alcance, establecer el inventario, evaluar impactos e interpretar los resultados (International Organization for Standardization [ISO], 2006a, 2006b). La principal aportación de esta perspectiva para la investigación consiste en permitir que la sostenibilidad sea valorada de manera integral y no únicamente a partir de la cantidad de energía renovable incorporada.

Las herramientas de simulación constituyen otro elemento de convergencia entre las dimensiones técnica y formativa. MATLAB/Simulink permite representar dinámicas y estrategias de control; PVsyst facilita el análisis de sistemas fotovoltaicos; y Proteus permite probar circuitos y dispositivos de automatización. Su utilización complementaria permite comparar escenarios, identificar posibles problemas de diseño y estimar el comportamiento de alternativas antes de una implementación física. No obstante, la revisión muestra que estas herramientas suelen estar asociadas al análisis de componentes específicos. El vacío que interesa abordar no se encuentra, por tanto, en la existencia de herramientas de simulación, sino en la posibilidad de utilizarlas dentro de una secuencia metodológica común que conecte caracterización, diseño, simulación, evaluación ambiental, toma de decisiones y formación.

En conjunto, los antecedentes presentan importantes convergencias: reconocen la necesidad de mejorar la eficiencia energética, muestran la viabilidad de incorporar energía solar en sistemas piscícolas, destacan el valor de la automatización y el monitoreo, reconocen el potencial de los sistemas inteligentes para apoyar decisiones y evidencian la necesidad de incorporar criterios ambientales mediante el análisis de ciclo de vida. Sin embargo, también presentan diferencias de enfoque: algunos estudios se concentran en la generación fotovoltaica, otros en la oxigenación o recirculación, otros en el control y la automatización, mientras que el ACV introduce una perspectiva ambiental que no necesariamente se encuentra vinculada con las decisiones operativas y formativas.

Esta dispersión permite identificar tres limitaciones principales en el conocimiento revisado. Primero, existe una fragmentación tecnológica, debido a que energía renovable, automatización, inteligencia artificial y simulación suelen abordarse como soluciones asociadas a problemas específicos. Segundo, se observa una fragmentación evaluativa, porque el desempeño energético y operativo no siempre se analiza conjuntamente con los impactos ambientales de todo el ciclo de vida. Tercero, existe una fragmentación

formativa, dado que son menos frecuentes las propuestas que convierten el diseño y la gestión de estos sistemas tecnológicos en una ruta estructurada de aprendizaje interdisciplinario. En consecuencia, el vacío identificado no corresponde a la ausencia de tecnologías o conocimientos individuales, sino a la insuficiente articulación metodológica entre ellos.

A partir de esta comparación crítica, se establece como vacío específico la ausencia de un marco metodológico que integre, dentro de una misma secuencia de decisiones, la generación renovable, la automatización de la oxigenación, el uso de inteligencia artificial para apoyar la gestión, el análisis de ciclo de vida, la simulación computacional y la dimensión formativa. Este vacío adquiere especial relevancia en contextos piscícolas rurales como el del departamento del Huila, donde las decisiones tecnológicas deben considerar simultáneamente las condiciones energéticas, operativas, ambientales y las capacidades de apropiación y mantenimiento de los sistemas.

## MARCO TEÓRICO

La transición energética inteligente puede entenderse como la transformación coordinada de la fuente de energía, la infraestructura de control y la forma en que se gestiona la información. Su propósito no se limita a reducir el uso de combustibles fósiles; también busca que el sistema responda con mayor eficiencia a cambios en la demanda, las condiciones ambientales y la disponibilidad de recursos. En esta perspectiva, las energías renovables se articulan con automatización, datos e inteligencia artificial para mejorar el desempeño y disminuir impactos (International Energy Agency [IEA], 2021).

En la agroindustria, esta transformación está vinculada con tres desafíos que suelen presentarse de manera simultánea: consumo energético, seguridad alimentaria e impacto ambiental. La energía solar fotovoltaica resulta especialmente atractiva para instalaciones rurales por su modularidad, su posibilidad de generación distribuida y su adaptación a distintas escalas de producción (Duffie & Beckman, 2013). No obstante, su incorporación requiere analizar perfiles de demanda, almacenamiento, continuidad del servicio y necesidades reales de los equipos automatizados.

En los sistemas piscícolas, la oxigenación es una de esas necesidades críticas. El oxígeno disuelto, la temperatura y el pH influyen en el crecimiento y la supervivencia de las especies, y sus variaciones pueden exigir respuestas rápidas (Boyd & Tucker, 2012). Un sistema automatizado puede medir estas condiciones y activar la aireación cuando sea necesario, lo que evita operar de forma permanente sin criterio. Esta capacidad de ajuste permite usar mejor la energía, reducir riesgos y mantener condiciones más estables para la producción.

La automatización industrial reúne tecnologías de medición, control y comunicación para ejecutar tareas y ajustar procesos con menor intervención manual (Groover, 2016). En el caso estudiado, los sensores capturan información del agua y del sistema energético; el controlador interpreta esas señales; y los actuadores responden según reglas o modelos previamente definidos. La incorporación de Internet de las Cosas (IoT) amplía esta arquitectura al permitir almacenamiento, consulta remota y análisis histórico de los datos.

La inteligencia artificial añade una capacidad distinta: aprender patrones y apoyar decisiones cuando la relación entre variables no es sencilla. De acuerdo con Russell y Norvig (2021), los sistemas inteligentes pueden emplear datos para clasificar, predecir y seleccionar acciones. En una unidad piscícola, estas funciones podrían utilizarse para anticipar cambios en el oxígeno disuelto, ajustar tiempos de aireación, reconocer consumos atípicos o programar mantenimiento. Su utilidad dependerá, sin embargo, de la calidad de los datos y de criterios claros para interpretar las recomendaciones.

El análisis de ciclo de vida incorpora la dimensión ambiental que no siempre es visible durante la operación. Según la ISO 14040, este método examina las entradas, salidas e impactos potenciales desde la obtención de materias primas hasta el fin de vida del producto o sistema (ISO, 2006a). En una solución

fotovoltaica automatizada, esto supone considerar paneles, baterías, dispositivos electrónicos, reposiciones, consumo auxiliar y disposición final. Así se evita valorar la sostenibilidad únicamente a partir de la energía ahorrada durante el uso.

La sostenibilidad energética, por su parte, busca asegurar un suministro suficiente y confiable sin comprometer las condiciones ambientales y sociales de largo plazo. Este enfoque se relaciona con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7, que promueve el acceso a energía asequible, segura, sostenible y moderna (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015). Para la piscicultura rural, el reto consiste en traducir ese principio general en decisiones viables sobre inversión, operación, mantenimiento y apropiación tecnológica.

La dimensión formativa se apoya en el aprendizaje interdisciplinario. La educación STEM favorece la resolución de problemas en los que es necesario combinar conceptos, procedimientos y decisiones de varios campos (Bybee, 2013). La simulación computacional fortalece este enfoque porque permite ensayar alternativas, observar consecuencias y discutir los supuestos del modelo. Así, el estudiante no se limita a usar una herramienta: aprende a explicar por qué una configuración es más eficiente, sostenible o adecuada que otra.

En esta investigación, el marco metodológico se concibe como una estructura de orientación y no como una receta rígida. Estará compuesto por fases, dimensiones, variables, criterios de evaluación y relaciones entre componentes. Su función será organizar el recorrido desde la caracterización del problema hasta la simulación, la valoración ambiental y la interpretación formativa. Para que sea transferible, deberá distinguir los elementos esenciales de aquellos que pueden ajustarse según el territorio o el proceso productivo.

La relación entre estos conceptos sustenta la propuesta: la energía renovable aporta una alternativa de suministro; la automatización permite medir y actuar; la inteligencia artificial apoya la predicción y la optimización; el ACV amplía la evaluación ambiental; y la estrategia formativa convierte el proceso de diseño en una experiencia de aprendizaje. El modelo buscará articular estos componentes en una secuencia comprensible, evaluable y adaptable a diferentes escenarios agroindustriales.

## **METODOLOGÍA**

### **Enfoque y diseño de la investigación**

Se adoptará un enfoque mixto porque el problema exige interpretar experiencias y criterios de los actores, pero también modelar variables cuantificables del sistema. El componente descriptivo permitirá reconocer las condiciones energéticas, operativas, ambientales y formativas del contexto; el componente proyectivo orientará el diseño del marco metodológico y de sus productos asociados. Esta combinación es coherente con la integración de información cualitativa y cuantitativa propuesta para los diseños mixtos (Creswell & Creswell, 2018).

El diseño será no experimental. No se manipularán variables en una instalación piscícola en funcionamiento; en cambio, se construirán y compararán escenarios mediante modelación y simulación. Esta decisión permite explorar configuraciones energéticas y estrategias de control sin comprometer la operación de una unidad productiva. Los resultados deberán interpretarse como validación metodológica y computacional, no como prueba definitiva del desempeño en campo.

### **Análisis de la información, integración y validación**

La información cualitativa obtenida mediante las entrevistas semiestructuradas será analizada mediante categorización temática, a partir de cinco categorías previamente definidas: transición energética sostenible, desempeño operativo del sistema de oxigenación; sostenibilidad ambiental mediante ACV; inteligencia artificial y optimización; y aplicabilidad, transferibilidad y componente formativo. Estas categorías se operacionalizarán mediante dimensiones e indicadores relacionados con demanda y eficiencia

energética, condiciones de operación (oxígeno disuelto), impactos ambientales y ciclo de vida, capacidades predictivas y de optimización, e integración tecnológica y necesidades formativas.

Las entrevistas serán sistematizadas mediante una matriz de categorías y posteriormente codificadas para identificar coincidencias, diferencias y aspectos emergentes entre los participantes. Los hallazgos cualitativos se contrastarán con los resultados de la caracterización técnica y energética y con los escenarios obtenidos mediante simulación. La integración se realizará mediante una matriz de triangulación, relacionando las percepciones y requerimientos identificados por los actores con indicadores cuantitativos de demanda, generación fotovoltaica, eficiencia, autonomía, continuidad operativa y desempeño ambiental. De esta forma, los resultados cualitativos contribuirán a interpretar los resultados de simulación y a ajustar los componentes, variables y criterios del framework metodológico. Esta integración responde al diseño mixto planteado, en el cual los datos de simulación se complementan con las percepciones de expertos y productores acuícolas.

La validación del framework se realizará en dos niveles. En el primero, la validez de contenido de los instrumentos y de los componentes del modelo será valorada mediante juicio de expertos, considerando pertinencia, claridad y coherencia, con participación de especialistas en energía fotovoltaica, acuicultura y análisis de ciclo de vida; el grado de acuerdo se estimará mediante el índice V de Aiken. En el segundo, la aplicabilidad y transferibilidad del framework serán valoradas considerando los criterios de pertinencia, integración tecnológica, escalabilidad, replicabilidad, requerimientos de implementación, condiciones energéticas y productivas y pertinencia formativa.

La confiabilidad se fortalecerá mediante prueba piloto de la entrevista, estandarización del procedimiento de aplicación, trazabilidad de la codificación y replicabilidad de los escenarios de simulación bajo condiciones equivalentes. En los apartados de la entrevista que incorporen escalas de valoración se podrá estimar la consistencia interna mediante Alfa de Cronbach. Para la simulación se emplearán registros estructurados que permitan comparar los escenarios bajo condiciones reproducibles. Finalmente, la convergencia entre evidencia cualitativa, resultados de simulación, ACV y valoración de expertos permitirá fortalecer la triangulación metodológica y sustentar la validez del framework antes de valorar su transferencia a otros contextos agroindustriales.

### **Población y muestra**

El estudio tendrá dos unidades de análisis relacionadas. La primera estará conformada por sistemas automatizados de oxigenación utilizados o proyectados para la piscicultura en el Huila. La segunda incluirá a piscicultores y especialistas con experiencia en energía, automatización, sostenibilidad o gestión de unidades productivas. Esta distinción permitirá analizar tanto las características técnicas del sistema como el conocimiento práctico de quienes lo diseñan, operan o mantienen.

La selección será no probabilística e intencional. Se elegirán personal del sector que puedan aportar experiencia verificable y escenarios piscícolas representativos de las condiciones que se desean modelar. El criterio de inclusión no será la cantidad de participantes, sino la pertinencia de su experiencia para contrastar variables, validar la estructura del modelo e identificar restricciones de aplicación.

### **Área de estudio**

El área de referencia será el departamento del Huila, Colombia. La elección responde a la importancia de la piscicultura en la economía regional y al interés de evaluar alternativas solares en instalaciones rurales y agroindustriales. Las características energéticas y operativas del territorio se utilizarán para construir los escenarios de simulación, sin asumir que todas las unidades productivas presentan las mismas condiciones.

El trabajo se organizará en cinco fases conectadas entre sí:

- **Fase 1. Revisión documental y fundamentación teórica**

La primera fase reunirá y examinará antecedentes científicos, normas y desarrollos tecnológicos sobre transición energética, energías renovables, automatización, inteligencia artificial, ACV y piscicultura. La revisión no se limitará a describir fuentes, se compararán enfoques, variables, métodos y limitaciones. Este análisis permitirá definir el vocabulario del estudio, reconocer vacíos y establecer los criterios iniciales del modelo.

- **Fase 2. Caracterización del contexto energético, operativo y formativo**

En la segunda fase se construirá un diagnóstico del sistema y de su entorno. Se identificarán perfiles de consumo, condiciones de operación, variables de calidad del agua, restricciones de mantenimiento, impactos ambientales y necesidades de formación. La revisión documental se contrastará con entrevistas a expertos y actores del sector, de modo que la caracterización refleje tanto la información técnica como la experiencia del territorio.

- **Fase 3. Diseño del modelo metodológico de transición energética inteligente (framework metodológico)**

Con los resultados del diagnóstico se diseñará el framework metodológico. Se definirán sus dimensiones, fases, entradas, actividades, productos, indicadores y relaciones. Las energías renovables, la automatización, la inteligencia artificial y el ACV se integrarán como componentes de una ruta común, evitando tratarlos como módulos independientes. El diseño también señalará qué decisiones requieren datos, qué criterios deben evaluarse y qué aprendizajes se esperan en cada etapa.

- **Fase 4. Simulación y validación del modelo metodológico**

La cuarta fase estará dedicada a la modelación y a la validación computacional. Se construirán escenarios de demanda, generación, almacenamiento, aireación y control para examinar el comportamiento técnico y energético de la propuesta. Los resultados se contrastarán mediante indicadores de eficiencia, continuidad operativa y desempeño ambiental. Cuando la información lo permita, se realizarán análisis de sensibilidad para reconocer qué variables modifican con mayor fuerza los resultados.

- **Fase 5. Evaluación de transferibilidad y estrategia formativa**

En la fase final se estudiará la posibilidad de aplicar el modelo en otros procesos agroindustriales con demandas energéticas y de automatización comparables. La evaluación considerará qué componentes pueden mantenerse, cuáles requieren adaptación y qué capacidades técnicas necesita cada contexto. También se revisará el valor formativo del modelo a partir de las competencias que moviliza: análisis sistémico, interpretación de datos, diseño sostenible, automatización y toma de decisiones.

## **RESULTADOS PROYECTADOS**

Se proyecta obtener un modelo metodológico de transición energética inteligente que integre energías renovables, automatización, inteligencia artificial y análisis de ciclo de vida para apoyar la gestión energética y operativa de sistemas automatizados de oxigenación en piscicultura sostenible. La evaluación de su efectividad no se limitará a la obtención de los productos previstos, sino que se determinará mediante indicadores técnicos, energéticos, ambientales, formativos y de transferibilidad, comparando el comportamiento de escenarios de referencia con las alternativas configuradas mediante el framework.

En la dimensión de sostenibilidad energética, el éxito del modelo se determinará mediante la comparación de indicadores de demanda y consumo energético, generación fotovoltaica, balance energético, eficiencia, autonomía, disponibilidad y continuidad del suministro. Se considerará favorable aquella configuración que evidencie un mejor desempeño energético respecto al escenario de referencia, particularmente mediante reducción del consumo y/o mayor participación de generación renovable, sin comprometer la continuidad del sistema. La dimensión ambiental se complementará mediante indicadores

de Análisis de Ciclo de Vida, tales como emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, consumo de energía, uso de materiales, residuos e impactos ambientales.

En la dimensión de desempeño operativo, se evaluará que las alternativas energéticas y de optimización mantengan o mejoren las condiciones requeridas para la operación del sistema de oxigenación. Para ello se analizarán oxígeno disuelto, potencia utilizada, tiempo y frecuencia de operación, condiciones de activación, continuidad y eficiencia operativa. El modelo será considerado favorable cuando las mejoras en eficiencia energética no impliquen deterioro de las condiciones de operación del sistema. Asimismo, los modelos de inteligencia artificial serán valorados mediante indicadores de precisión, error, desempeño del algoritmo y capacidad de optimización de variables energéticas y operativas.

En la dimensión formativa, se proyecta determinar la pertinencia del framework como estrategia de apropiación tecnológica e integración interdisciplinaria. Para ello se valorarán indicadores relacionados con apropiación tecnológica, interdisciplinariedad, sostenibilidad, competencias digitales y transferencia de conocimiento, complementados con la percepción de pertinencia de los actores y expertos participantes.

La capacidad de transferencia se determinará mediante la valoración de la pertinencia, aplicabilidad, integración tecnológica, escalabilidad, replicabilidad, requerimientos de implementación y condiciones energéticas y productivas necesarias para adaptar el modelo a otros sistemas piscícolas o contextos agroindustriales similares. La transferencia será considerada viable cuando se identifiquen condiciones y criterios explícitos de adaptación sin alterar los componentes esenciales del framework.

**Tabla 1**

*Indicadores para evaluar el éxito proyectado del modelo metodológico*

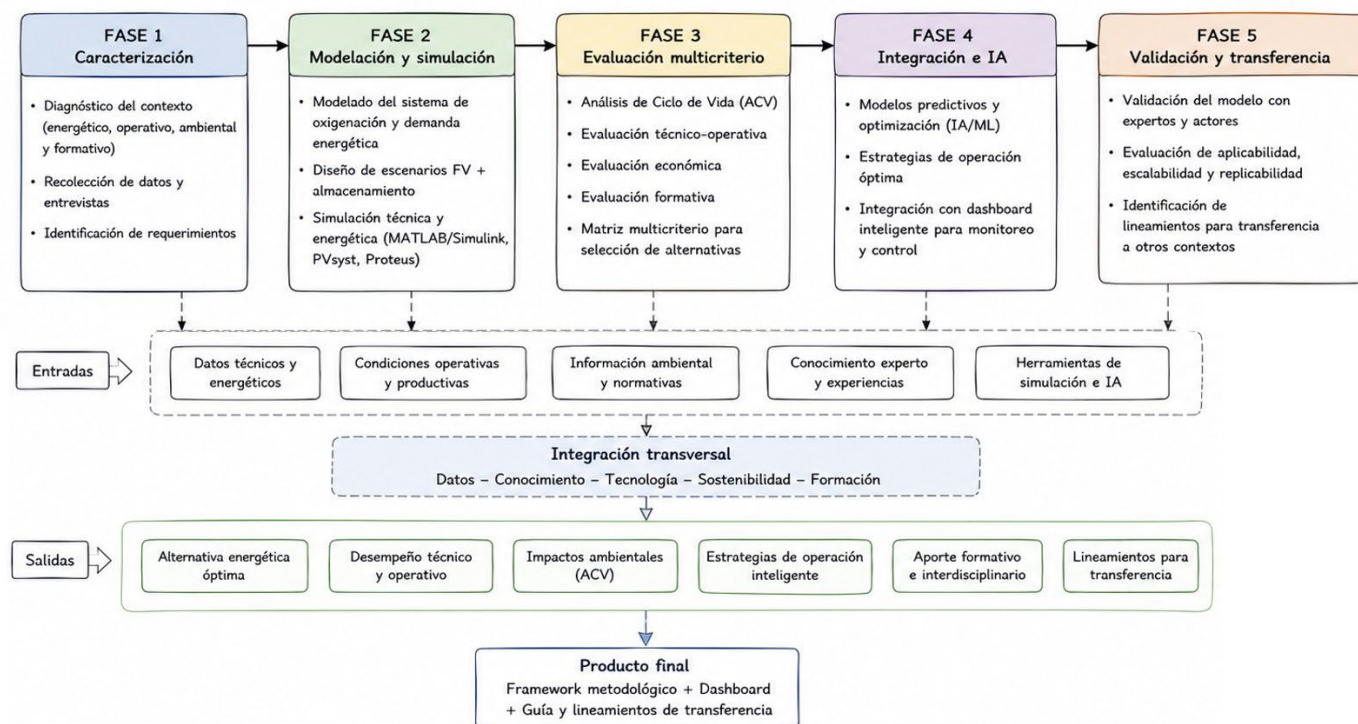
| Dimensión de evaluación                | Indicadores principales                                                                                                                                                           | Criterio de valoración del éxito                                                                                                                                  |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sostenibilidad energética y ambiental  | Consumo energético; demanda; generación FV; eficiencia; balance energético; autonomía; disponibilidad; continuidad; CO <sub>2</sub> eq.; consumo de energía; materiales; residuos | Mejor desempeño frente al escenario de referencia, con mayor eficiencia y/o participación renovable, manteniendo la continuidad y reduciendo impactos ambientales |
| Desempeño operativo                    | Oxígeno disuelto; potencia; tiempo de operación; frecuencia de activación; condiciones de operación; continuidad; eficiencia operativa                                            | Mantener o mejorar las condiciones de oxigenación y continuidad, mientras se optimiza el uso energético                                                           |
| Inteligencia artificial y optimización | Precisión; error; consumo estimado; variables optimizadas; desempeño del algoritmo                                                                                                | Capacidad predictiva y de optimización suficiente para apoyar decisiones energéticas y operativas                                                                 |
| Dimensión formativa                    | Apropiación tecnológica; interdisciplinariedad; sostenibilidad; competencias digitales; transferencia de conocimiento; pertinencia                                                | Valoración favorable de la pertinencia formativa y evidencia de integración de competencias tecnológicas y de sostenibilidad                                      |
| Aplicabilidad y transferibilidad       | Pertinencia; aplicabilidad; integración tecnológica; escalabilidad; replicabilidad; requerimientos; condiciones energéticas y productivas                                         | Identificación de condiciones y criterios que permitan adaptar y replicar el framework en otros contextos agroindustriales                                        |

La efectividad del framework se establecerá mediante comparación multicriterio entre el escenario de referencia y los escenarios resultantes de su aplicación. Se considerará evidencia favorable cuando las

alternativas seleccionadas presenten un mejor desempeño energético y ambiental sin deteriorar las condiciones operativas de oxigenación, y cuando obtengan valoración favorable en pertinencia formativa, aplicabilidad, escalabilidad y replicabilidad. De esta manera, los resultados proyectados serán verificables mediante indicadores cuantitativos derivados de la simulación y el ACV, e indicadores cualitativos obtenidos mediante la valoración de expertos y actores del sector.

**Figura1**

*Framework metodológico para la transición energética inteligente.*



## DISCUSIÓN

Los resultados esperados guardan relación con antecedentes que muestran la viabilidad de combinar energía solar y automatización en sistemas acuícolas. Los trabajos de Gunkel et al. (2015) y Liu et al. (2019) sugieren que la generación fotovoltaica y el control inteligente pueden disminuir la dependencia de fuentes convencionales y mejorar el seguimiento operativo. La presente investigación retoma esos aportes, pero desplaza la atención desde un dispositivo particular hacia una ruta metodológica que permita analizar el sistema completo.

Esa diferencia es relevante. Una solución técnicamente funcional puede tener dificultades de mantenimiento, generar impactos no considerados o resultar poco comprensible para quienes deben adoptarla. Por ello, el modelo propuesto incorpora el ACV, la participación de actores y una dimensión formativa junto con la simulación y la optimización. La integración busca que las decisiones sobre energía y automatización puedan justificarse no solo por su rendimiento, sino también por su pertinencia ambiental y su posibilidad de apropiación.

El aporte más importante sería disponer de una arquitectura transferible para ordenar variables que suelen analizarse por separado. El tablero interactivo facilitará la lectura conjunta de consumo, generación,

operación e indicadores ambientales, mientras que los escenarios de simulación permitirán comparar alternativas antes de una inversión física. En el plano educativo, estos productos pueden convertir datos técnicos en insumos para formular preguntas, argumentar decisiones y comprender las relaciones entre tecnología y sostenibilidad.

El alcance de la investigación es metodológico y computacional, orientado al diseño y evaluación de un framework para la transición energética inteligente en sistemas automatizados de oxigenación piscícola. La validación mediante simulación permitirá comparar escenarios energéticos y operativos, evaluar alternativas de generación renovable, analizar indicadores de desempeño y sostenibilidad ambiental y explorar estrategias de predicción y optimización, sin intervenir directamente sobre una unidad productiva en funcionamiento. En consecuencia, los resultados permitirán establecer la viabilidad técnica y metodológica de las alternativas modeladas, pero no constituyen evidencia definitiva de su desempeño bajo condiciones reales de operación.

Una primera limitación se relaciona con la generalización de los resultados. El comportamiento de los sistemas de oxigenación puede variar según la escala de producción, demanda energética, condiciones ambientales, disponibilidad del recurso solar, características de los equipos y capacidades de operación y mantenimiento. Por ello, la transferencia del framework a otros sistemas piscícolas o agroindustriales no se asumirá como automática, sino que estará condicionada a la identificación de sus componentes esenciales y al ajuste de variables dependientes del contexto, como perfiles de demanda, recursos disponibles y condiciones productivas.

Una segunda limitación corresponde a los supuestos y datos utilizados en la modelación. Los escenarios de simulación dependerán de la calidad, disponibilidad y representatividad de los datos de demanda, generación, operación, condiciones ambientales y características de los equipos. Cuando no se disponga de mediciones directas o información suficiente, será necesario establecer supuestos explícitos y documentar sus fuentes y condiciones de aplicación. En consecuencia, la sensibilidad de los resultados frente a variaciones en los parámetros de entrada deberá ser considerada para identificar escenarios robustos y evitar que las conclusiones dependan de un único conjunto de condiciones. Esta consideración es especialmente relevante para los modelos predictivos de inteligencia artificial, cuyo desempeño será evaluado mediante indicadores de precisión y error.

En definitiva, la principal proyección de la investigación corresponde a una validación experimental posterior. Los resultados de simulación deberán contrastarse mediante pruebas piloto en unidades piscícolas reales, utilizando mediciones de consumo y generación energética, oxígeno disuelto, tiempos y condiciones de operación, desempeño de los sistemas de automatización e indicadores ambientales. Esta etapa permitiría verificar los supuestos del modelo, ajustar sus parámetros, evaluar su comportamiento ante condiciones no previstas y determinar con mayor precisión su efectividad, escalabilidad y transferibilidad. Por tanto, la investigación no plantea la simulación como sustituto de la validación en campo, sino como una etapa previa para reducir incertidumbres, comparar alternativas y orientar futuras implementaciones experimentales.

## CONCLUSIONES

La investigación propone un framework metodológico de transición energética inteligente para sistemas automatizados de oxigenación piscícola, cuyo principal aporte consiste en integrar, dentro de una misma ruta metodológica, la generación de energía renovable, la automatización, la inteligencia artificial, el análisis de ciclo de vida y la dimensión formativa. Esta articulación permite superar el tratamiento aislado de estos componentes y establecer relaciones entre variables energéticas, operativas, ambientales y formativas para orientar la caracterización, evaluación y selección de alternativas de transición energética.

La innovación metodológica propuesta no radica en el desarrollo independiente de una nueva tecnología, sino en la integración estructurada de tecnologías y métodos existentes mediante fases, criterios, indicadores y puntos de decisión que permiten pasar de la caracterización del contexto a la simulación, evaluación multicriterio, optimización inteligente y valoración de aplicabilidad y transferencia. En este sentido, el framework busca que las decisiones sobre transición energética sean valoradas no únicamente por su desempeño energético, sino también por sus implicaciones ambientales, operativas y formativas.

El potencial de replicabilidad y transferencia constituye otro aporte del modelo. La propuesta diferencia los componentes esenciales del framework de aquellas variables que deben adaptarse a las condiciones particulares de cada sistema productivo. Por tanto, su aplicación en otros sistemas piscícolas o contextos agroindustriales requerirá ajustar perfiles de demanda, disponibilidad de recursos, condiciones ambientales, características de los equipos y capacidades de operación y mantenimiento, conservando la lógica metodológica de caracterización, modelación, evaluación, optimización y validación.

En este sentido, el framework tiene potencial para constituirse en una referencia metodológica para futuras investigaciones sobre transición energética en sistemas agroindustriales, al proporcionar una estructura que puede orientar la identificación de variables, construcción de escenarios, selección de indicadores, integración de herramientas de simulación y evaluación de alternativas. Su utilidad futura dependerá de su contraste mediante estudios piloto y aplicaciones en diferentes contextos, que permitan ajustar los parámetros del modelo, verificar sus supuestos y establecer condiciones de transferencia con mayor evidencia empírica.

Debido a que la presente investigación corresponde a una propuesta de carácter metodológico y computacional, las conclusiones sobre su efectividad deben entenderse como resultados proyectados y no como evidencia definitiva de desempeño en campo. La validación experimental posterior permitirá determinar el comportamiento real de las alternativas, fortalecer la generalización de los resultados y consolidar el framework como una herramienta aplicable para apoyar procesos de transición energética sostenible, innovación tecnológica y formación interdisciplinaria en otros sistemas agroindustriales.

## REFERENCIAS

- Bishop, R. H. (2017). *Learning with LabVIEW* (8th ed.). Pearson Education.
- Boyd, C. E., & Tucker, C. S. (2012). *Pond aquaculture water quality management*. Springer.
- Bybee, R. W. (2013). *The case for STEM education: Challenges and opportunities*. NSTA Press.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley.
- Groover, M. P. (2016). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (4th ed.). Pearson.
- Gunkel, G., Silva, C. F., Sobral, M. C., & Calado, S. J. (2015). Use of photovoltaic systems for water quality management in fish farming ponds in the semiarid region of Brazil. *Renewable Energy*, 77, 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.069>
- International Energy Agency. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA.
- International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.
- International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044: Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines*.
- Liu, Y., Li, Y., Wang, Q., Zhang, Y., & Chen, Z. (2019). Energy performance of a solar-powered aquaculture system with intelligent control. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1004–1015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.312>

- Organización de las Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. ONU.
- Ríos, C. A., & Ramírez, D. (2017). Diseño e implementación de un sistema de oxigenación automático alimentado con energía solar en una unidad piscícola rural del Tolima. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 25(2), 33–42.
- Russell, S., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.
- Timmons, M. B., & Ebeling, J. M. (2010). *Recirculating aquaculture* (2nd ed.). Cayuga Aqua Ventures.
- Valderrama, L., García, R., & Pérez, S. (2019). Evaluación del uso de energía solar en procesos de recirculación para piscicultura en el Valle del Cauca. *Ingeniería y Región*, 17(2), 45–54. <https://doi.org/10.21897/23460466.1456>
- Zhou, X., Zhang, J., & Lin, H. (2020). Life cycle assessment of photovoltaic–aquaculture systems: Environmental impact and eco-efficiency analysis. *Science of the Total Environment*, 728, 138808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138808>