Proceedings of the
Latin-American Geothermal Congress 2025
LGC 2025
San Salvador, El Salvador
22–26 Sept. 2025

Integración de geotermia de baja entalpía en la acuicultura sostenible: Un modelo de economía circular aplicado en la industria hotelera de Costa Rica

Víctor D. Soto González*[1], Saúl Corrales Rojas*[2], Pedro Casanova Treto[3]

[1, 2] Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

(E-mail: victor.sotogonzalez@ucr.ac.cr, saul.corrales@ucr.ac.cr)

[3] Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII), Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

(E-mail: pedro.casanova@ucr.ac.cr)

Palabras clave: acuicultura sostenible, energía geotérmica, economía circular, baja entalpía

Resumen: Costa Rica posee un vasto recurso geotérmico subutilizado, principalmente explotado en balneología y generación eléctrica. Este estudio presenta una solución innovadora para la acuicultura sostenible mediante el aprovechamiento eficiente de aguas termales en la región de San Carlos, Costa Rica. Se diseñó un sistema hidráulico optimizado que maximiza la transferencia de calor y minimiza el consumo energético, alineándose con los principios de economía circular y el uso de energías renovables. Para garantizar la eficiencia térmica y energética, se realizaron cálculos avanzados para determinar el flujo óptimo y el área de intercambio de calor necesaria que permiten la cría de camarones de agua dulce bajo sus requerimientos de crecimiento. Como resultado, se logró disminuir la dependencia de terceros brindando la posibilidad de garantizar el confort térmico adecuado mediante geotermia de baja entalpía para la cría y comercialización de camarones en ambiente controlado. Este enfoque no solo promueve una producción acuícola más sostenible, sino que también establece un modelo replicable para integrar tecnologías renovables en la producción de alimentos. Desde una perspectiva social, el sistema beneficia a comunidades locales al generar empleo y mejorar la seguridad alimentaria, mientras reduce la huella ambiental del sector turístico e industrial. Los hallazgos demuestran que la geotermia de baja entalpía es una estrategia viable para impulsar la sostenibilidad en la acuicultura. Este estudio sienta un precedente para futuras aplicaciones en la industria y contribuye a la transición hacia sistemas autosuficientes y regenerativos.

1. Introducción

La producción de camarones es una actividad del sector primario con relevancia en la economía costarricense, principalmente orientada al mercado nacional y vinculada al sector alimentario y comercial [1], [2]. En los últimos años, la acuicultura ha adquirido mayor protagonismo como alternativa sostenible frente a la pesca tradicional, lo que refuerza el interés en optimizar sus procesos. Este proyecto propone un sistema innovador de cultivo de camarones de agua dulce que aprovecha recursos geotérmicos de baja entalpía disponibles en la región de San Carlos, integrando principios de economía circular y sostenibilidad mediante el uso eficiente de la energía.

2. Metodología

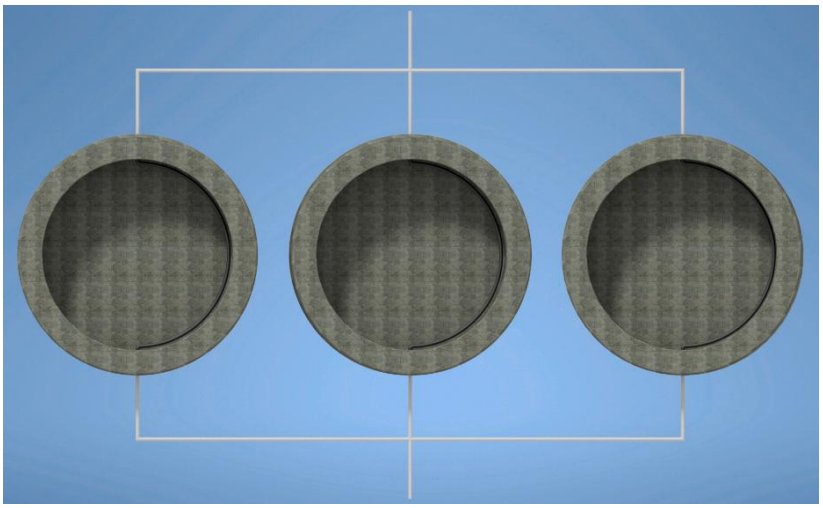
El sistema diseñado fue evaluado a partir de los parámetros térmicos e hidráulicos bajo condiciones simuladas, representativas de la región de San Carlos, Costa Rica. El flujo de agua geotérmica proveniente del pozo (temperatura de entrada: 42 °C) permite alimentar el intercambiador de calor semicircular instalado en las tres piletas propuestas. La transferencia térmica se modeló utilizando el método de resistencias térmicas y la diferencia logarítmica media de temperatura (ΔT_{lm}), lo cual permitió dimensionar adecuadamente la superficie de intercambio para garantizar un balance térmico favorable.

Se incorporó un protocolo de análisis de calidad del agua (pH, conductividad/TDS, amonio, nitritos, nitratos, sílice y metales trazas) para evaluar la idoneidad de las aguas geotérmicas y de efluentes reutilizables [3].

3. Resultados

Se diseñó un sistema en el que agua a 42 °C proveniente de un pozo geotérmico circula a través de tuberías de 2 pulgadas de PVC y un intercambiador semicircular de HDPE insertado en tres piletas circulares de concreto (3 m de diámetro, 1,2 m de altura, y paredes de 0,4 m) dentro de un invernadero (Figura 1). Para el análisis térmico se emplearon redes de resistencias térmicas y el cálculo de la diferencia logarítmica media de temperatura (ΔT_{lm}) [4], [5]. En la etapa hidráulica, se aplicó la ecuación de energía general y el cálculo de NPSH disponible para determinar la selección óptima de bomba (40 L/min, 1,3 m de cabeza), garantizando condiciones de operación sin cavitación [6].

Figura 1. Vista superior de las tres piletas.



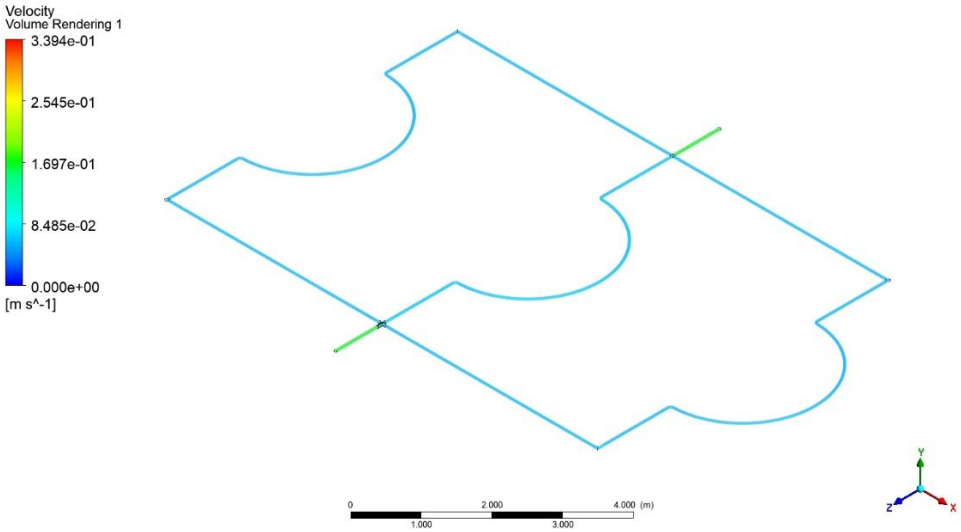
Las pérdidas térmicas promedio por pileta se estimaron en 444 W, debidas principalmente a convección natural, conducción a través de las paredes y radiación hacia un ambiente a 22 °C. El intercambiador semicircular entrega 546 W por unidad, superando las pérdidas y manteniendo la temperatura del agua en un rango óptimo de 29–30 °C, ideal para el cultivo de camarón de agua dulce. La eficiencia térmica del intercambiador, de aproximadamente 81%, refleja un buen aprovechamiento energético, utilizando materiales

de bajo costo como HDPE y sin necesidad de convección forzada, con un flujo de agua geotérmica ajustado para evitar sobrecalentamiento o desperdicio térmico.

4. Discusión

El intercambiador térmico, con una eficiencia del 81%, optimiza la energía geotérmica usando HDPE de bajo costo y flujo ajustado para evitar sobrecalentamiento, mientras que una bomba centrífuga de 40 L/min (0,67 L/s) y NPSH disponible de 7,9 m asegura operación sin cavitación. Simulaciones CFD confirmaron una circulación uniforme sin zonas muertas, logrando estabilización térmica en 90 minutos (Figura 2). La eficiencia varía un 5% con fluctuaciones de ±2 °C en el fluido geotérmico, pero no se detectaron fugas ni deterioro, validando la viabilidad del sistema para aplicaciones rurales o turísticas. Los resultados obtenidos confirman que el sistema propuesto es técnicamente viable para el cultivo de camarones con energía geotérmica de baja entalpía, al lograr mantener las condiciones térmicas requeridas y reducir los costos energéticos.

Figura 2. Simulación del flujo en el sistema de tuberías del intercambiador de calor.



Sin embargo, aún existen desafíos técnicos por abordar. La posible variabilidad estacional en el flujo y temperatura del recurso geotérmico podría afectar el rendimiento térmico del sistema. Adicionalmente, fenómenos como la incrustación del intercambiador térmico deben monitorearse y prevenirse mediante rutinas de mantenimiento preventivo [7]. También será fundamental evaluar la calidad del agua residual y su posible reutilización o tratamiento, en línea con modelos de economía circular hídrica.

Finalmente, este tipo de integración tecnológica puede servir como plataforma demostrativa para políticas públicas que promuevan el uso de energías renovables en actividades productivas. En Costa Rica, el Plan Nacional de Descarbonización (2018–2050) promueve la transición hacia sistemas energéticos limpios, y el presente modelo podría alinearse con los ejes de producción sostenible definidos en dicho plan [8].

5. Conclusiones

La configuración modular de las piletas, junto con el uso de materiales duraderos y estéticos, facilita el mantenimiento, permite futuras ampliaciones y favorece su integración en entornos hoteleros y turísticos, mientras que la validación mediante cálculos y simulaciones destaca la necesidad de pruebas en condiciones reales para ajustar parámetros operativos y evaluar factores como obstrucciones del intercambiador o variaciones estacionales en la fuente geotérmica. La integración de geotermia de baja entalpía en la acuicultura de camarones demuestra viabilidad técnica, eficiencia energética y sostenibilidad, reduciendo costos operativos y ofreciendo un modelo replicable para la industria hotelera y áreas rurales, que promueve un ciclo económico circular y fortalece la seguridad alimentaria.

Referencias

[1] L. Flores, “Perfil Producto: Camarón”. PROCOMER e INCOPESCA, 2005.

[2] Presidencia de la República de Costa Rica, “Instalación de granjas de cultivo de camarón de Coopeacuicultores R.L.”, 2020.

[3] A. F. Solano-Arguedas, I. Vargas-Azofeifa, K. Barrantes-Jiménez, *et al.*, “Exploring low enthalpy geothermal energy in Costa Rica: A pilot project to improve tourism energy matrix efficiency,” *European Geologist*, no. 54, 2022, doi: 10.5281/zenodo.7882879.

[4] Y. A. Çengel, Transferencia de Calor y Masa, 4ª ed., Prentice Hall, 2013.

[5] F. P. Incropera, Fundamentos de Transferencia de Calor, 4ª ed., Prentice Hall, 1999.

[6] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, Mecánica de Fluidos, 4ª ed., McGraw-Hill, 2018.

[7] R. DiPippo, Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact (4th ed.). Butterworth-Heinemann, 2016.

[8] Gobierno de Costa Rica. Plan Nacional de Descarbonización 2018–2050. Ministerio de Ambiente y Energía. https://cambioclimatico.minae.go.cr/plan-nacional-de-descarbonizacion/ ,(2019).