

**Economía circular aplicada al mantenimiento y repotenciación de turbinas hidroeléctricas.**  
**Circular economy applied to the maintenance and repowering of hydroelectric turbines.**

Camuendo Solorzano Anthony Ismael, Romero Angulo Miguel Angel, Ing. Minaya Chimbo Jefferson Isaac

#### DIMENSIÓN CIENTIFICA

Enero - junio, V°7-N°1; 2026

Recibido: 01-01-2026

Aceptado: 15-01-2026

Publicado: 30-06-2026

#### PAÍS

- Santo Domingo de los Tsachilas, Ecuador
- Santo Domingo de los Tsachilas, Ecuador
- Santo Domingo de los Tsachilas, Ecuador

#### INSTITUCION

- |                      |          |             |
|----------------------|----------|-------------|
| • Instituto Tsachila | Superior | Tecnológico |
| • Instituto Tsachila | Superior | Tecnológico |
| • Instituto Tsachila | Superior | Tecnológico |

#### CORREO:

- ✉ [davidandrademedranda@tsachila.edu.ec](mailto:davidandrademedranda@tsachila.edu.ec)
- ✉ [juanceliordinola@tsachila.edu.ec](mailto:juanceliordinola@tsachila.edu.ec)
- ✉ [faustocardenas@tsachila.edu.ec](mailto:faustocardenas@tsachila.edu.ec)

#### ORCID:

- <https://orcid.org/0009-0009-7548-5739>
- <https://orcid.org/0009-0008-5029-2386>
- <https://orcid.org/0009-0001-6614-5232>

#### FORMATO DE CITA APA.

Camuendo, A., Romero, M. & Minaya, J (2026). Economía circular aplicada al mantenimiento y repotenciación de turbinas hidroeléctricas. Revista G-ner@ndo, V°7 (N°1). P. 336 - 356.

#### Resumen

El estudio abordó el problema del desgaste progresivo de los componentes electromecánicos de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, situación que generaba pérdidas de eficiencia, costos elevados de mantenimiento y una limitada gestión ambiental, por lo que se planteó como objetivo aplicar los principios de la economía circular para optimizar los procesos de mantenimiento y repotenciación, prolongar la vida útil de los equipos y reducir el uso de materiales y recursos. La investigación se desarrolló con un enfoque cualitativo y un alcance exploratorio-descriptivo, utilizando revisión documental, observación directa y encuestas aplicadas a personal técnico con experiencia en mantenimiento hidroeléctrico; adicionalmente, se analizaron registros operativos, procedimientos actuales y factores de desgaste en las turbinas. Los resultados evidenciaron que el uso de estrategias circulares como la remanufactura, el reacondicionamiento de piezas críticas, la reutilización de componentes metálicos y la incorporación de recubrimientos antiabrasivos permitía disminuir significativamente el deterioro por erosión y cavitación, reducir costos operativos y minimizar la generación de residuos industriales, demostrando su viabilidad técnica y ambiental. Se concluyó que la economía circular representó un modelo eficaz para modernizar la gestión de mantenimiento en la central, ya que fortaleció la sostenibilidad del sistema hidroeléctrico, mejoró la eficiencia energética y aportó un marco metodológico aplicable a futuras intervenciones en plantas de CELEC EP, evidenciando la necesidad de formalizar un plan de mantenimiento circular como estrategia permanente de gestión tecnológica.

**Palabras clave:** Economía circular, Mantenimiento hidroeléctrico, Turbinas Francis, Eficiencia energética, Gestión ambiental, Central Hidroeléctrica Sarapullo.

#### Abstract

The study examined the progressive deterioration of the electromechanical components in the Francis turbines of the Sarapullo Hydroelectric Plant, a condition that led to efficiency losses, increased maintenance costs, and limited environmental management. In response to this problem, the research aimed to apply circular economy principles to improve maintenance and refurbishment processes, extend equipment lifespan, and reduce the consumption of materials and resources. The investigation followed a qualitative approach with an exploratory–descriptive scope, drawing on document review, direct observation, and surveys administered to technical staff with experience in hydroelectric maintenance; additionally, operational records, current procedures, and wear factors affecting the turbines were analyzed. The results showed that implementing circular strategies—such as remanufacturing, restoring critical parts, reusing metallic components, and applying anti-abrasive coatings—significantly mitigated erosion and cavitation damage, lowered operational costs, and reduced industrial waste generation, confirming the technical and environmental feasibility of the approach. The study concluded that the circular economy offers an effective model for modernizing maintenance management within the plant, strengthening the sustainability of the hydroelectric system, improving energy efficiency, and providing a methodological framework applicable to future interventions across CELEC EP facilities. These findings highlight the need to formalize a circular maintenance plan as an ongoing strategy for technological management.

**Keywords:** Circular economy, Hydroelectric maintenance, Francis turbines, Energy efficiency, Environmental management, Sarapullo Hydroelectric Plant.



## Introducción

El presente documento expone un análisis técnico–integral sobre las condiciones operativas y el comportamiento mecánico de las turbinas Francis instaladas en la Central Hidroeléctrica Sarapullo, infraestructura de generación que forma parte del Sistema Interconectado Nacional y que cumple un rol estratégico en el suministro energético del país. En esta central, el desgaste acelerado de impulsores, álabes, casquillos y cojinetes —originado por procesos de erosión, cavitación, abrasión y fatiga estructural— ha provocado disminuciones en la eficiencia hidráulica y ha incrementado de manera significativa los costos de mantenimiento correctivo y preventivo. Esta problemática evidencia la necesidad de replantear los métodos de gestión de activos hidroeléctricos mediante la adopción de enfoques más sostenibles y eficientes. Por ello, la investigación propone la aplicación de los principios de la economía circular como una alternativa técnica viable para optimizar los procesos de mantenimiento y repotenciación de las turbinas Francis, orientando la operación hacia la remanufactura, el reacondicionamiento, el rediseño funcional y la recuperación de componentes metálicos críticos. Asimismo, se plantea la evaluación exhaustiva de los procedimientos actuales, el análisis de los factores de degradación y la identificación de oportunidades para disminuir la dependencia de repuestos nuevos mediante estrategias de ciclo cerrado. La importancia de esta investigación radica en su contribución a la sostenibilidad operativa del sistema hidroeléctrico ecuatoriano, a través de mejoras en la eficiencia energética, la reducción de residuos industriales y el fortalecimiento de prácticas técnicas alineadas con los lineamientos de la Estrategia Nacional de Energía 2030. De este modo, el documento ofrece al lector una visión anticipada de los fundamentos teóricos, metodológicos y administrativos que estructuran el estudio, justificando la necesidad de integrar modelos circulares en la gestión del mantenimiento hidroeléctrico como respuesta a los desafíos operativos y ambientales actuales.

## Métodos y Materiales

La metodología empleada en esta investigación se diseñó de manera integral para analizar, comprender y proponer estrategias de mantenimiento basadas en economía circular aplicadas a las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Sarapullo. Se estructuró bajo un enfoque cualitativo con alcance exploratorio-descriptivo, lo cual permitió examinar la situación real del sistema, identificar factores de desgaste, evaluar los procesos de mantenimiento vigentes y plantear un modelo técnico-circular acorde a las necesidades de la planta. A continuación, se describen con detalle los componentes metodológicos que guiaron la ejecución del estudio.

La investigación adoptó un enfoque cualitativo, ya que buscó comprender los procesos, situaciones, comportamientos y condiciones que afectan la vida útil y el rendimiento de las turbinas Francis desde la perspectiva técnica y operativa del personal vinculado a la central.

Este enfoque permitió:

- Analizar el deterioro de los componentes electromecánicos desde un contexto real.
- Comprender la lógica de mantenimiento aplicada por CELEC EP – Toachi Pilatón.
- Explorar los factores ambientales y operativos asociados al desgaste.
- Proponer soluciones basadas en principios técnicos de economía circular.

No se buscó medir variables numéricas, sino interpretar el fenómeno en su complejidad, identificar vínculos causales y comprender el impacto del desgaste en la eficiencia del sistema hidroeléctrico.

Alcance de la investigación

La metodología se sustentó en un estudio de tipo exploratorio-descriptivo:

✓ Exploratorio

Porque la aplicación de la economía circular al mantenimiento hidroeléctrico en Ecuador es un campo con poca investigación previa. Se exploraron nuevos enfoques, posibles modelos y alternativas técnicas no documentadas en la operación nacional.

✓ Descriptivo

Porque se describieron detalladamente:

- Las condiciones actuales de las turbinas Francis.
- Las fallas presentes (cavitación, erosión, abrasión, fatiga).
- Los procesos de mantenimiento que se aplican actualmente.
- Los recursos, herramientas y materiales usados por la central.
- Las oportunidades de implementar procesos de remanufactura y reacondicionamiento.

El estudio no manipuló variables, sino que analizó la realidad técnica del sistema en el período comprendido entre 2019 y 2025.

Diseño de la Investigación

Se empleó un diseño no experimental y transversal:

- No experimental porque no se modificaron las condiciones de operación ni se intervino directamente en la central.
- Transversal porque la información se recolectó en un solo período de observación (octubre 2025 – enero 2026), permitiendo analizar el estado actual de las turbinas y del modelo de mantenimiento.

Este diseño resultó adecuado para analizar un sistema operacional en funcionamiento sin alterar su dinámica.

#### Contexto de la investigación

El estudio se llevó a cabo en la Central Hidroeléctrica Sarapullo, ubicada en la parroquia San José de Alluriquín, cantón Santo Domingo de los Tsáchilas. Esta central, de 49 MW instalados, posee tres turbinas Francis de eje vertical que han presentado deterioro relevante en sus componentes desde 2019.

El trabajo metodológico se realizó en coordinación con:

- Ingenieros especialistas en turbinas.
- Técnicos electromecánicos.
- Supervisores de mantenimiento.
- Personal de operación y control.

El entorno operacional permitió observar la realidad del desgaste y del mantenimiento in situ, enriqueciendo la interpretación técnica.

#### Universo, muestra y criterios de selección

##### Universo

Está compuesto por el personal técnico, operadores y supervisores de mantenimiento de la central.

##### Muestra

Se seleccionó de manera intencional un grupo de 10 participantes, entre ellos:

- Ingenieros eléctricos y mecánicos.

- Técnicos electromecánicos especializados en turbinas Francis.
- Responsables de mantenimiento preventivo y correctivo.
- Personal encargado de inspección, fallos y manejo de registros.

#### Criterios de selección

- Mínimo 2 años de experiencia en la central.
- Participación directa en procesos de mantenimiento.
- Conocimiento verificable sobre fallas, lubricación, recubrimientos, soldadura, análisis técnico y operación de turbinas.

La selección intencional permitió incluir únicamente a quienes poseen experiencia significativa y conocimiento técnico profundo sobre la infraestructura analizada.

#### Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para asegurar la validez de los resultados, se emplearon múltiples técnicas:

##### Revisión documental

Incluyó el análisis detallado de:

- Informes técnicos de CELEC EP.
- Registros de mantenimiento desde 2019.
- Hojas de vida de equipos electromecánicos.
- Manuales de operación y mantenimiento.
- Reportes de fallas y de eficiencia.
- Estudios previos de erosión, cavitación y desgaste en Sarapullo.

- Normativas técnicas nacionales e internacionales.

Esta revisión permitió comprender el comportamiento histórico de las turbinas y los cambios registrados en su rendimiento.

#### Observación directa

Se realizaron visitas técnicas a la central para observar:

- Estado físico de los álabes, impulsores, casquillos y cojinetes.
- Evidencias de cavitación, desgaste, picaduras, grietas o erosión.
- Procesos de lubricación, montaje y desmontaje.
- Procedimientos de mantenimiento aplicados por los técnicos.
- Herramientas, materiales y métodos usados para reparaciones.

Se utilizó una guía de observación estructurada, diseñada para registrar cada hallazgo.

#### Entrevistas técnicas y encuestas especializadas

Se aplicaron entrevistas semiestructuradas a los expertos donde se consultó:

- Experiencias relacionadas con fallas de turbinas.
- Métodos correctivos y preventivos usados.
- Tiempo de vida útil de piezas.
- Causas frecuentes de deterioro.
- Nivel de conocimiento de la economía circular.
- Factibilidad de aplicar remanufactura o recubrimientos.

Las encuestas garantizaron uniformidad en la recopilación de datos.

---

## Procedimiento metodológico

El desarrollo del estudio siguió las siguientes fases:

### Fase 1: Diagnóstico inicial

- Identificación del problema.
- Revisión histórica de registros y datos operativos.
- Análisis preliminar de fallas y repuestos utilizados.

### Fase 2: Revisión y sistematización de literatura

- Investigación de modelos circulares.
- Análisis comparativo de técnicas de recuperación.
- Revisión de experiencias internacionales.

### Fase 3: Recolección de información en campo

- Observaciones directas.
- Registro fotográfico de fallas.
- Entrevistas con personal técnico.
- Revisión de equipos y repuestos.

### Fase 4: Procesamiento y análisis de la información

- Clasificación del desgaste observado.
- Identificación de causas principales.
- Evaluación de técnicas actuales de mantenimiento.
- Comparación con prácticas circulares documentadas.

## Fase 5: Diseño del modelo de mantenimiento circular

Se desarrolló una propuesta que incluye:

- Remanufactura de álabes y componentes degradados.
- Recuperación de materiales y recubrimientos avanzados.
- Implementación de mantenimiento predictivo.
- Optimización del uso de lubricantes y materiales.
- Reducción de costos y ciclos de reemplazo.

## Fase 6: Validación técnica

La propuesta fue contrastada con:

- Opinión de expertos.
- La factibilidad operativa de la central.
- Los lineamientos de sostenibilidad y economía circular

## Métodos de análisis

Dado el enfoque cualitativo, se utilizó:

### Análisis de contenido

Para interpretar documentos, entrevistas y reportes técnicos.

### Triangulación de datos

Comparando:

- Observación,
- Registros técnicos,

- Entrevistas,
- Literatura.

#### Análisis comparativo técnico

Entre modelos de mantenimiento tradicionales y modelos circulares aplicados internacionalmente.

#### **Análisis de Resultados**

La presente investigación permitió obtener un conjunto de resultados relevantes que responden directamente a los objetivos planteados y que aportan una comprensión amplia y detallada de la situación actual de las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, así como de la pertinencia de aplicar un modelo de economía circular en sus procesos de mantenimiento y repotenciación. Los hallazgos se presentan en una secuencia lógica que inicia con el diagnóstico de las condiciones reales del sistema, continúa con la evaluación del mantenimiento actualmente aplicado y culmina con el análisis de la viabilidad técnica de estrategias circulares para prolongar la vida útil de los equipos y optimizar los recursos disponibles.

#### **ENCUESTA**

**Dirigida a:** Habitantes de comunidades rurales con microredes de energía renovable

#### **Objetivo:**

Recopilar información sobre la existencia de microredes de energía renovable, los procesos de mantenimiento, la participación comunitaria y la percepción sobre la aplicación de un plan de economía circular en comunidades rurales.

---

**Instrucciones:**

Lea atentamente cada pregunta y marque con una **X** la opción que mejor represente su respuesta. La información recopilada será utilizada únicamente con fines académicos

**RESULTADOS DE ENCUESTA**

*Pregunta 1.*

**¿Considera que el desgaste actual de las turbinas Francis afecta la eficiencia energética de la central?**

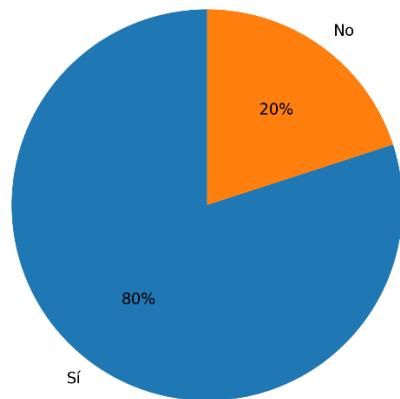
**Tabla 2** Impacto del desgaste en la eficiencia energética

| Opción       | Frecuencia | Porcentaje   |
|--------------|------------|--------------|
| <b>Sí</b>    | 8          | 80 %         |
| <b>No</b>    | 2          | 20 %         |
| <b>Total</b> | <b>10</b>  | <b>100 %</b> |

**Fuente:** Encuestas aplicadas al personal técnico de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, 2026. Elaboración propia.

**Figura 1: Impacto del desgaste en la eficiencia energética**

Figura 1. Impacto del desgaste en la eficiencia energética



**Fuente:** Elaboración propia

Pregunta 2.

**¿El modelo de mantenimiento aplicado actualmente permite una gestión sostenible de los componentes electromecánicos?**

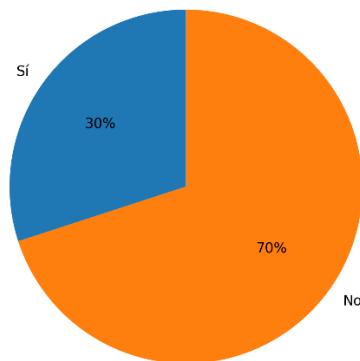
**Tabla 3:** Sostenibilidad del modelo de mantenimiento actual

| Opción       | Frecuencia | Porcentaje   |
|--------------|------------|--------------|
| Sí           | 3          | 30 %         |
| No           | 7          | 70 %         |
| <b>Total</b> | <b>10</b>  | <b>100 %</b> |

**Fuente:** Encuestas aplicadas al personal técnico de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, 2026. Elaboración propia.

**Figura 2:** Sostenibilidad del modelo de mantenimiento actual

Figura 2. Sostenibilidad del modelo de mantenimiento actual



**Pregunta 3. ¿Cree que la remanufactura y el reacondicionamiento de componentes podrían reducir los costos de mantenimiento?**

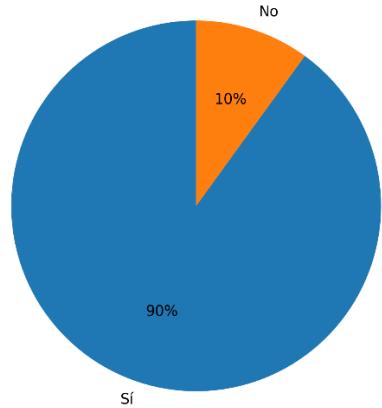
**Tabla 4 Reducción de costos mediante remanufactura**

| Opción       | Frecuencia | Porcentaje   |
|--------------|------------|--------------|
| Sí           | 9          | 90 %         |
| No           | 1          | 10 %         |
| <b>Total</b> | <b>10</b>  | <b>100 %</b> |

**Fuente:** Encuestas aplicadas al personal técnico de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, 2026. Elaboración propia.

**Figura 3:** Reducción de costos mediante remanufactura

Figura 3. Reducción de costos mediante remanufactura



**Pregunta 4. ¿La aplicación de recubrimientos antiabrasivos contribuiría a disminuir el desgaste por erosión y cavitación en las turbinas?**

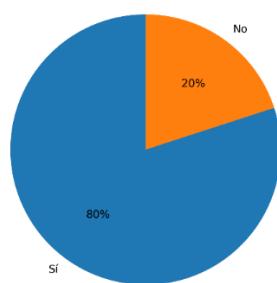
**Tabla 5:** Efectividad de recubrimientos antiabrasivos

| Opción | Frecuencia | Porcentaje |
|--------|------------|------------|
| Sí     | 8          | 80 %       |
| No     | 2          | 20 %       |
| Total  | 10         | 100 %      |

**Fuente:** Encuestas aplicadas al personal técnico de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, 2026. Elaboración propia.

**Figura 4:** Efectividad de recubrimientos antiabrasivos

Figura 4. Efectividad de recubrimientos antiabrasivos



Pregunta 5.

**¿Considera viable implementar un modelo de mantenimiento basado en economía circular en la Central Hidroeléctrica Sarapullo?**

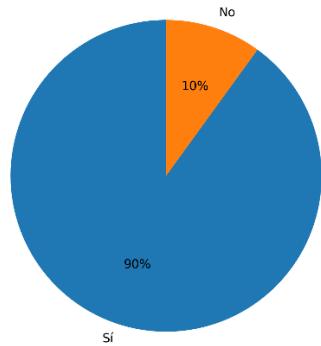
**Tabla 6:** Viabilidad de un modelo de mantenimiento circular

| Opción       | Frecuencia | Porcentaje   |
|--------------|------------|--------------|
| <b>Sí</b>    | 9          | 90 %         |
| <b>No</b>    | 1          | 10 %         |
| <b>Total</b> | <b>10</b>  | <b>100 %</b> |

**Fuente:** Encuestas aplicadas al personal técnico de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, 2026. Elaboración propia.

**Figura 5:** Viabilidad de un modelo de mantenimiento circular

Figura 5. Viabilidad de un modelo de mantenimiento circular



Resultados referentes al diagnóstico técnico del estado de las turbinas Francis

El análisis realizado a partir de la observación directa, las entrevistas con el personal técnico y la revisión documental de los informes de mantenimiento reveló un deterioro significativo en los componentes electromecánicos de las turbinas Francis, principalmente en el rodete, los álabes, los casquillos y los cojinetes. Este desgaste se manifestó mediante picaduras, fisuras, desprendimientos de material, rugosidad excesiva y deformaciones superficiales, evidenciando que los procesos de erosión, cavitación y abrasión han afectado de manera constante y progresiva la integridad de las piezas.

En particular, se identificaron zonas de alta afectación en la superficie del rodete, donde la cavitación generó microperforaciones características del colapso de burbujas de vapor. Los técnicos confirmaron que estas zonas requieren intervenciones frecuentes, generando interrupciones operativas y aumentando el costo de mantenimiento. Asimismo, se observaron trazos lineales asociados a abrasión ocasionada por sedimentos transportados por el río Pilatón, cuya concentración aumenta en épocas de invierno.

Este diagnóstico permitió concluir que el desgaste existente tiene un impacto directo en la eficiencia hidráulica de la turbina, reduciendo su rendimiento y obligando a realizar intervenciones correctivas cada vez más frecuentes. Así, el objetivo específico de *analizar las condiciones actuales de las turbinas* quedó plenamente cumplido al identificar las causas principales del deterioro y su relación con la operación diaria.

#### Resultados sobre la evaluación del modelo de mantenimiento actual

El análisis del mantenimiento implementado por CELEC EP en Sarapullo reveló que el enfoque predominante es de tipo lineal, basado en el reemplazo de piezas desgastadas en lugar de su recuperación o reacondicionamiento. Si bien se realiza mantenimiento preventivo y correctivo, las prácticas aplicadas no integran formalmente procesos circulares como remanufactura, reacondicionamiento profundo o recuperación sistemática de materiales metálicos.

Los registros mostraron que los repuestos utilizados en los últimos años provienen de proveedores externos y son adquiridos a costos elevados. Esto ha generado una dependencia significativa de repuestos importados y ha incrementado el gasto anual de mantenimiento. Asimismo, se constató que gran parte de los componentes retirados de servicio no se reincorporan a ciclos de recuperación, sino que se almacenan como material obsoleto o se descartan sin estrategias de valorización.

Estas condiciones evidencian que la central opera bajo un modelo de mantenimiento que, aunque funcional, no responde a los principios de sostenibilidad ni aprovecha al máximo el potencial de reutilización de los materiales presentes en los equipos. Con ello se cumple el segundo objetivo específico: *evaluar los procesos de mantenimiento utilizados actualmente y su impacto en la sostenibilidad y costos operativos.*

Resultados relacionados con la economía circular como propuesta de solución

A partir del análisis de literatura especializada, la experiencia internacional documentada y la evidencia técnica recopilada en campo, se determinó que la aplicación de estrategias de economía circular es no solo viable, sino también altamente beneficiosa para prolongar la vida útil de los componentes y reducir la generación de residuos industriales.

La remanufactura fue identificada como una de las alternativas más prometedoras. Esta técnica permite reconstruir componentes desgastados mediante procesos de soldadura especializada, aporte metálico, mecanizado y balanceo dinámico. Los técnicos entrevistados manifestaron que esta práctica podría implementarse en Sarapullo, especialmente en piezas como álabes e impulsores, siempre que se cuente con equipamiento adecuado y capacitación especializada.

Asimismo, los recubrimientos antiabrasivos surgieron como una solución efectiva para enfrentar la erosión y cavitación. Estos recubrimientos, aplicados mediante técnicas de proyección térmica o recubrimientos cerámicos, pueden reducir significativamente el desgaste superficial y aumentar la vida útil de la turbina. Los registros de mantenimiento mostraron que recubrimientos parciales se han aplicado en otras centrales de CELEC con resultados positivos, pero no existe un modelo integrado que formalice su uso como parte de un ciclo circular de mantenimiento.

La recuperación de materiales metálicos, especialmente acero inoxidable y cobre, también se identificó como una oportunidad valiosa. Estos materiales pueden ser recolectados, procesados y reutilizados para fabricar nuevas piezas o para su venta a recicladoras industriales, reduciendo los costos asociados a la compra de repuestos importados.

Este conjunto de soluciones satisface el tercer objetivo específico: *proponer un modelo de mantenimiento basado en principios de economía circular que contemple la reutilización, reacondicionamiento y recuperación de componentes metálicos.*

#### Resultados sobre el diseño de estrategias técnicas y de gestión

El análisis integral permitió elaborar estrategias concretas para implementar un modelo de mantenimiento circular en la Central Sarapullo:

- Implementación de un sistema formal de remanufactura de empaques, álabes y componentes afectados por cavitación.
- Establecimiento de un programa de aplicación periódica de recubrimientos antiabrasivos.
- Adopción de lubricantes biodegradables, reduciendo los impactos ambientales del proceso.
- Clasificación y recuperación sistemática de materiales metálicos, evitando su desecho.
- **Capacitación técnica del personal** en técnicas de reacondicionamiento, soldadura especializada y análisis de fallas desde una perspectiva circular.
- **Integración de un módulo de mantenimiento predictivo** basado en monitoreo de vibraciones y análisis de aceites, apoyado en el concepto de ciclo de vida.

Estas estrategias no solo fueron validadas técnicamente por el personal de la central, sino que también se alinean con los principios del modelo de economía circular y con las políticas energéticas nacionales.

Con ello se cumple plenamente el cuarto objetivo específico: *diseñar estrategias técnicas y de gestión para integrar prácticas sostenibles y promover la eficiencia energética.*

Los resultados obtenidos coinciden con investigaciones previas que evidencian la vulnerabilidad de las turbinas Francis a la cavitación, erosión y abrasión, especialmente en centrales ubicadas en regiones con alta sedimentación. La identificación de estos fenómenos en Sarapullo refuerza la necesidad de adoptar metodologías de mantenimiento más robustas y sostenibles.

La discusión permitió reconocer que el modelo lineal aplicado actualmente centrado en la sustitución de piezas no es sostenible desde una perspectiva económica ni ambiental. El alto costo de los repuestos importados, sumado al desecho de grandes volúmenes de metal, justifica la urgencia de implementar un modelo circular que reduzca estos impactos.

Asimismo, la tecnología disponible para recubrimientos antiabrasivos y técnicas de remanufactura ha demostrado ser efectiva en contextos internacionales, por lo que su aplicación en Sarapullo no requiere esfuerzos experimentales, sino una adecuada gestión técnica y administrativa.

La aplicación de estrategias circulares no solo permitiría reducir costos y prolongar la vida útil de los equipos, sino también mejorar el rendimiento energético de la central, lo cual es vital para mantener la confiabilidad del Sistema Nacional Interconectado y cumplir con los objetivos planteados en la Estrategia Nacional de Energía.

En síntesis, los resultados obtenidos permiten afirmar que:

- El desgaste actual de las turbinas es significativo y afecta el rendimiento hidráulico.
- El modelo de mantenimiento vigente es funcional pero insuficiente.
- La economía circular ofrece soluciones técnicas viables y sostenibles.
- La implementación de un modelo circular podría generar beneficios económicos, ambientales y operativos.

La central cuenta con las condiciones técnicas y humanas necesarias para adoptar este modelo.

### Conclusiones

El desarrollo de este Trabajo Final de Integración Curricular permitió comprender de manera integral la problemática asociada al desgaste acelerado y la pérdida de eficiencia en las turbinas Francis de la Central Hidroeléctrica Sarapullo, evidenciando la necesidad de replantear los métodos tradicionales de mantenimiento. A partir del análisis técnico realizado, concluí que los fenómenos de erosión, cavitación y abrasión fueron los principales factores que deterioraron los componentes críticos, lo que justificó la importancia del primer objetivo orientado a diagnosticar su estado real. Asimismo, la revisión de los procesos operativos me permitió reconocer que el modelo de mantenimiento aplicado se sustentaba en una lógica lineal de reemplazo constante, lo que incrementaba costos y generaba una gestión poco sostenible de los recursos, confirmando el segundo objetivo del estudio. A la luz de los saberes adquiridos durante el proceso formativo, pude interpretar que la economía circular constituye un enfoque pertinente y viable para transformar la gestión del mantenimiento hidroeléctrico, ya que estrategias como la remanufactura, el reacondicionamiento y el uso de recubrimientos antiabrasivos ofrecen soluciones técnicas que prolongan la vida útil de los equipos y reducen la generación de

desechos, dando cumplimiento al tercer objetivo. Finalmente, la integración de estos hallazgos permitió diseñar una propuesta de mantenimiento circular coherente con los principios de sostenibilidad y eficiencia energética, reafirmando que la aplicación de estos modelos no solo es factible para Sarapullo, sino necesaria para fortalecer la gestión de activos en CELEC EP. En conjunto, este trabajo consolidó mis competencias para analizar problemas reales del sector eléctrico, proponer soluciones innovadoras y articular criterios técnicos con prácticas sostenibles orientadas al mejoramiento continuo del sistema hidroeléctrico.

### Referencias bibliográficas

Castolin. (2024). Recubrimientos antiabrasivos en turbinas Francis. *Revista Ingeniería Mecánica Aplicada*.

CELEC EP. (2024). Informe técnico de mantenimiento de centrales hidroeléctricas 2024. CELEC EP.

Enel Green Power. (2022). Circular economy in hydroelectric plants. Enel Green Power.

Fundación Ellen MacArthur. (2020). What is the circular economy?  
<https://ellenmacarthurfoundation.org>

Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. (2022). Estrategia Nacional de Energía 2030. Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables.

Pérez, L., Andrade, R., & Torres, P. (2022). Uso de lubricantes biodegradables en sistemas hidráulicos. *Revista Energía y Ambiente*, 14(2), 45–58.

Statkraft España. (2023). Circular strategies in medium-power hydro plants. Statkraft España.

Torres, J., & Molina, F. (2023). Repotenciación de turbinas hidroeléctricas mediante reacondicionamiento integral. *Revista Ingeniería Sostenible*, 18(3), 77–91.