

Gestión de Megaproyectos Hidroeléctricos en Entornos de Alta Incertidumbre: Un Marco Híbrido de Governance, Riesgos y Gestión Ágil

Ing. Paulo Solis González

Resumen—Los megaproyectos hidroeléctricos combinan alta inversión de capital, largos horizontes de ejecución, múltiples actores, restricciones regulatorias y una exposición significativa a cambios que no pueden conocerse completamente durante la planificación inicial. La literatura revisada muestra que algunos de los principales impulsores del riesgo de cronograma no se encuentran exclusivamente en la ejecución técnica de la obra civil, sino en actividades como permisos, coordinación de interesados y respuesta a condiciones regulatorias y ambientales [1]. Este escenario plantea un problema de gestión de proyectos: los mecanismos tradicionales de planificación y control ofrecen ventajas cuando el alcance y los requisitos son relativamente estables, pero pueden presentar limitaciones en actividades donde predominan la incertidumbre, el aprendizaje progresivo y la necesidad de decisiones frecuentes.

Este trabajo analiza estas condiciones desde seis dimensiones de gestión: governance, gestión de riesgos, gestión de interesados, comunicación y coordinación, planificación y gestión del cambio, y medición del desempeño. A partir de diez fuentes provenientes de construcción, industrias reguladas, gestión de portafolios y digitalización de Project Management, se evalúa cómo prácticas de Agile Project Management (APM) y Scrum pueden incorporarse selectivamente dentro de un modelo híbrido sin reemplazar los controles predictivos necesarios para la protección del capital.

La literatura muestra evidencia de mejoras asociadas con APM en capacidad de respuesta, innovación, calidad y satisfacción del cliente [2]; demuestra que Agile puede escalarse en industrias altamente reguladas mediante mecanismos adicionales de compliance y trazabilidad [3]; y respalda modelos de governance adaptados al contexto de diferentes componentes del portafolio [4]. Con base en esta evidencia se propone un Adaptive Project Governance Framework donde la PMO integra una vía predictiva para actividades de alta dependencia física y financiera con una vía adaptativa para aquellas dominadas por incertidumbre, coordinación y aprendizaje. Finalmente, se propone un marco de métricas para evaluar empíricamente el efecto del modelo sobre riesgos, decisiones, stakeholders, delivery y desempeño del proyecto.

Index Terms—project management, project governance, risk management, Agile Project Management, Scrum, PMO, hydro-electric megaprojects, stakeholder management, hybrid project management

I. INTRODUCCIÓN

I-A. El Problema de Gestión

Los megaproyectos hidroeléctricos presentan una combinación particularmente compleja de dependencias técnicas, regulatorias, ambientales, financieras y sociales. Aunque intuitivamente los retrasos pueden asociarse principalmente con la construcción física, Kishore et al. [1] identifican los procesos de permisos y la coordinación de interesados como impulsores importantes del riesgo de cronograma en proyectos hidroeléctricos.

Este hallazgo modifica la naturaleza del problema desde la perspectiva de Project Management. Si una parte importante del riesgo se encuentra en actividades donde las condiciones evolucionan durante el proyecto, el desempeño depende no solamente de la calidad de la planificación inicial, sino también de la capacidad del sistema de gestión para: detectar cambios; comunicar información relevante; evaluar riesgos; asignar ownership; tomar decisiones; ejecutar acciones correctivas; incorporar feedback de interesados; mantener trazabilidad; y adaptar la planificación.

Por tanto, la pregunta relevante no es simplemente si Agile es superior a Waterfall, sino **qué mecanismos de gestión son más apropiados para diferentes tipos de incertidumbre dentro del mismo megaproyecto.**

I-B. Predictibilidad versus Adaptabilidad

Los modelos predictivos proporcionan estructura, documentación, control presupuestario, hitos y mecanismos formales de aprobación. Estas características son particularmente importantes en proyectos intensivos en capital.

Sin embargo, la literatura revisada muestra que Agile Project Management tiene fortalezas diferentes. Badran y Abdallah [2], en un estudio con 392 gerentes de proyecto del sector construcción, encuentran efectos positivos de APM sobre innovación, capacidad de respuesta, calidad y satisfacción del cliente.

La diferencia central no debe plantearse entonces como *Agile vs. Waterfall*, sino como *predictibilidad donde existe estabilidad más adaptabilidad donde existe incertidumbre*. Este principio constituye la base del modelo propuesto en este trabajo.

I-C. Brecha de Investigación

La revisión realizada no identificó estudios empíricos directamente enfocados en la implementación de Agile o Scrum en megaproyectos hidroeléctricos. La evidencia disponible proviene principalmente de construcción, industrias críticas para la seguridad, gestión de portafolios, sector público y digitalización de Project Management.

Por tanto, este trabajo no pretende afirmar que los resultados observados en esos dominios se reproducirán automáticamente en proyectos hidroeléctricos. Su contribución consiste en construir un marco conceptual fundamentado en literatura transferible y proponer posteriormente su validación empírica en el sector.

Preguntas de Investigación

RQ1: ¿Cuáles son los principales desafíos de gestión identificados en la literatura aplicable a proyectos hidroeléctricos, particularmente en governance, riesgos, stakeholders, comunicación y capacidad de respuesta?

RQ2: ¿Qué limitaciones pueden presentar los modelos predominantemente predictivos en actividades caracterizadas por incertidumbre, requisitos cambiantes y dependencia de múltiples stakeholders?

RQ3: ¿Qué prácticas Agile/Scrum pueden incorporarse dentro de un modelo híbrido para mejorar capacidad de respuesta, visibilidad y toma de decisiones sin comprometer los controles regulatorios, financieros y de capital?

RQ4: ¿Qué métricas pueden utilizarse para evaluar empíricamente el desempeño de este modelo?

II. DESAFÍOS DE PROJECT MANAGEMENT EN MEGAPROYECTOS HIDROELÉCTRICOS

La literatura revisada permite organizar el problema alrededor de seis dimensiones de gestión.

II-A. Governance y Toma de Decisiones

Los megaproyectos requieren estructuras formales de aprobación, reporting y accountability. Sin embargo, diferentes componentes de un mismo programa pueden presentar condiciones de gestión distintas. Martinsuo y Geraldi [4] sostienen desde la teoría de gestión de portafolios que los mecanismos de governance deben adaptarse al contexto del portafolio, lo cual cuestiona la utilización de un único modelo operativo para todas las actividades del megaproyecto.

Una estructura adecuada puede mantener controles formales de PMO y stage-gates para decisiones financieras críticas mientras introduce ciclos más frecuentes de decisión para actividades sujetas a incertidumbre. El problema central no es necesariamente la existencia de governance formal, sino el posible **desacoplamiento entre la velocidad con que aparece nueva información y la velocidad con que la estructura de governance puede convertirla en decisiones y acciones.**

II-B. Gestión de Riesgos

Kishore et al. [1] destacan permisos y coordinación de stakeholders entre los principales factores asociados al riesgo de cronograma. Estos riesgos presentan una característica importante: evolucionan. Una observación regulatoria, preocupación comunitaria o cambio ambiental puede generar nuevas actividades, modificaciones de diseño, negociaciones y decisiones. El proceso puede representarse como:

Listing 1. Ciclo de gestión de riesgos

```
Risk Identification -> Assessment -> Ownership
-> Mitigation
-> Monitoring ->
Escalation -> Closure
```

Cuando estos ciclos ocurren con baja frecuencia, existe la posibilidad de que un riesgo permanezca abierto durante períodos prolongados antes de convertirse en una acción concreta. Una gestión adaptativa puede complementar los registros tradicionales de riesgos mediante ciclos de revisión más frecuentes y mecanismos de priorización dinámica.

II-C. Stakeholder Management

Los proyectos hidroeléctricos requieren interacción continua con reguladores, comunidades, contratistas, proveedores, especialistas, patrocinadores y otras partes interesadas. El hallazgo de Kishore et al. [1] acerca de permisos y coordinación convierte el stakeholder management en una variable directamente relacionada con el desempeño del cronograma. Al mismo tiempo, Badran y Abdallah [2] encuentran que APM está positivamente asociado con capacidad de respuesta y satisfacción del cliente. Esto sugiere que incorporar ciclos más frecuentes de feedback puede ser particularmente relevante en actividades donde los requisitos y expectativas de stakeholders evolucionan durante la ejecución.

II-D. Comunicación y Coordinación

En un megaproyecto, la comunicación atraviesa múltiples niveles:

Listing 2. Niveles de comunicación

```
Sponsor -> PMO -> Project Manager ->
Engineering
-> Contractors -> Regulators ->
Stakeholders
```

La existencia de reuniones y reportes no garantiza por sí misma comunicación efectiva. Desde una perspectiva operativa, una dimensión relevante es cuánto tiempo transcurre entre:

Listing 3. Ciclo de información a acción

```
Information -> Communication -> Decision ->
Action -> Feedback
```

La digitalización de Project Management estudiada en [5] muestra el potencial de herramientas digitales para proporcionar visibilidad integrada sobre diferentes flujos de trabajo. Por ello, el problema de comunicación debe analizarse no solamente por volumen de información, sino también por **visibilidad, trazabilidad, frecuencia y capacidad de convertir información en acciones de gestión.**

II-E. Planning y Change Management

Los modelos predictivos funcionan especialmente bien cuando existe suficiente estabilidad para establecer una secuencia de actividades, presupuesto y cronograma. Sin embargo, algunas fases hidroeléctricas presentan aprendizaje progresivo. Durante estudios ambientales, permisos, diseño e integración, nueva información puede modificar supuestos anteriores. Agile trata este aprendizaje como parte recurrente del proceso de gestión mediante backlogs priorizados, ciclos iterativos y feedback frecuente.

Albuquerque et al. [6] encuentran además un puente conceptual entre Lean Construction y Agile Project Management, lo cual proporciona una base para su incorporación en construcción sin asumir que Agile debe reemplazar las prácticas existentes.

II-F. Performance Management

Los megaproyectos tradicionalmente utilizan indicadores relacionados con costo, cronograma y milestones. Estos indicadores continúan siendo fundamentales. Sin embargo, muchos representan **lagging indicators**: muestran el efecto una vez que un problema ya se ha materializado. Un modelo adaptativo puede complementarlos con indicadores operativos que permitan observar tempranamente comportamientos asociados con riesgos, decisiones, backlog, stakeholders y acciones pendientes.

III. LIMITACIONES DE UN MODELO PREDOMINANTEMENTE PREDICTIVO

La principal limitación no es Waterfall como metodología, sino utilizar el mismo mecanismo de gestión independientemente del nivel de incertidumbre. En actividades estables, la planificación predictiva ofrece ventajas importantes. En actividades donde la información emerge progresivamente pueden aparecer cuatro desafíos:

1. **Feedback tardío.** Los requisitos o preocupaciones de stakeholders pueden identificarse después de haberse realizado trabajo significativo.
2. **Decision latency.** La información puede existir, pero requerir varios niveles de reporting y aprobación antes de convertirse en una decisión.
3. **Gestión reactiva del riesgo.** Los riesgos pueden ser registrados correctamente, pero las acciones de mitigación pueden no ejecutarse con la misma velocidad con que evoluciona el contexto.
4. **Replanificación y retrabajo.** Una decisión tardía puede afectar diseños o actividades ya ejecutadas.

Estos mecanismos proporcionan una explicación conceptual de por qué **responsiveness** resulta especialmente relevante en proyectos caracterizados por incertidumbre.

IV. EVIDENCIA DE AGILE PROJECT MANAGEMENT

IV-A. Capacidad de Respuesta

Badran y Abdallah [2] compararon Lean Project Management y Agile Project Management utilizando datos de 392 profesionales de construcción. APM mostró efectos positivos

sobre innovación, responsiveness, calidad y satisfacción del cliente. Para proyectos hidroeléctricos, responsiveness puede ser especialmente importante en procesos de permisos, diseño, stakeholder engagement y commissioning.

IV-B. Aplicación en Industrias Reguladas

Hüllmann et al. [3] estudiaron Agile a escala en industrias críticas para la seguridad. Su trabajo muestra que la adopción requiere adaptar Agile mediante mecanismos adicionales de compliance y trazabilidad. Esto resulta especialmente relevante para proyectos hidroeléctricos porque demuestra que adaptabilidad y control regulatorio no necesariamente son incompatibles.

IV-C. Governance Contextual

Martinsuo y Gernaldi [4] proporcionan el fundamento para una estructura de governance contingente. Diferentes componentes del portafolio pueden requerir diferentes mecanismos de gestión. Esto permite superar la falsa dicotomía entre Agile y Waterfall.

IV-D. Modelos Híbridos

El estudio [7] propone un modelo híbrido Waterfall+Agile para entornos públicos burocráticos y regulados, orientado explícitamente a mantener control mientras se incrementa adaptabilidad. Adicionalmente, [8] identifica diferencias en la receptividad de distintas fases de megaproyectos a prácticas ágiles y digitales, con mayor receptividad en diseño y commissioning que en construcción civil pesada. Estos resultados respaldan una implementación selectiva.

V. ADAPTIVE PROJECT GOVERNANCE FRAMEWORK

A partir de la literatura se propone un modelo de governance de tres capas.

V-A. Capa 1 — Strategic & Capital Governance

Responsable de: presupuesto; contratos; milestones principales; compliance; aprobaciones; cambios de capital; exposición financiera. Opera predominantemente mediante mecanismos predictivos y stage-gates.

V-B. Capa 2 — Adaptive Delivery Governance

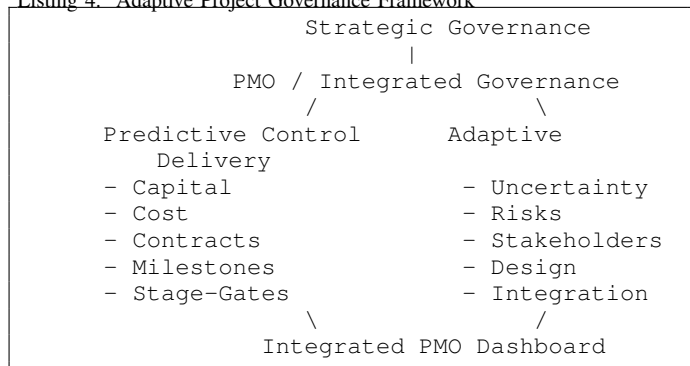
Responsable de actividades caracterizadas por mayor incertidumbre: permisos; estudios; stakeholder engagement; diseño; integración; SCADA/automatización; commissioning. Utiliza prácticas Agile/Scrum adaptadas.

V-C. Capa 3 — PMO Integration

La PMO conecta ambos sistemas. Su responsabilidad no es imponer una metodología única, sino proporcionar: **Visibility + Governance + Risk Management + Metrics + Traceability + Escalation.**

El modelo puede representarse como:

Listing 4. Adaptive Project Governance Framework



VI. SCRUM COMO MECANISMO OPERATIVO

Scrum no sustituye el Project Management del megaproyecto. Funciona como un mecanismo operativo dentro de las áreas donde existen altos niveles de incertidumbre y necesidad frecuente de coordinación.

VI-A. Backlog

El backlog puede contener: entregables; acciones regulatorias; observaciones; riesgos; decisiones pendientes; acciones de stakeholders; diseño; integración. La priorización proporciona visibilidad sobre qué requiere atención inmediata.

VI-B. Sprint Planning

Permite convertir prioridades en compromisos de corto plazo. En ambientes regulados puede incorporar checkpoints de compliance, siguiendo la adaptación estudiada por Hüllmann et al. [3].

VI-C. Daily Coordination

Los standups permiten detectar: blockers; dependencias; nuevos riesgos; decisiones necesarias; problemas de coordinación.

VI-D. Sprint Review

Permite incorporar feedback de stakeholders antes de continuar con ciclos posteriores.

VI-E. Retrospective

Introduce un mecanismo sistemático de mejora continua sobre el proceso de gestión.

VI-F. Backlog Refinement

Mantiene actualizadas prioridades, dependencias y nueva información. En entornos regulados puede incorporar trazabilidad adicional, como propone el patrón identificado en [3].

Cuadro I
MARCO DE MÉTRICAS PROPUESTO

Dimensión	Métrica
Schedule	Schedule Variance
Cost	Cost Variance
Milestones	Milestone Predictability
Risk	Number of High/Critical Risks
Risk	Risk Mitigation Lead Time
Governance	Decision Lead Time
Governance	Aging of Pending Decisions
Stakeholders	Stakeholder Issue Resolution Time
Communication	Action Item Closure Rate
Delivery	Work Item Cycle Time
Delivery	Backlog Aging
Delivery	Sprint Predictability
Change	Change Request Lead Time
Quality	Rework Rate
Quality	Defects / Non-Conformities

VII. INTEGRACIÓN DE RISK MANAGEMENT

En el modelo propuesto, el Risk Register tradicional continúa existiendo. La diferencia consiste en conectar riesgos prioritarios con el sistema operativo de delivery.

Listing 5. Integración de risk management con delivery

```

Risk Register -> Risk Prioritization ->
Backlog / Mitigation Actions
-> Owner -> Sprint Execution ->
Review
-> Risk Status Update
  
```

Esto busca reducir la distancia entre identificar un riesgo y ejecutar su mitigación. Los riesgos críticos continúan sujetos a los mecanismos formales de escalación definidos por la PMO.

VIII. COMMUNICATION & STAKEHOLDER GOVERNANCE

El modelo propone ciclos de comunicación diferenciados: **Operativo** (daily / coordinación frecuente); **Táctico** (sprint review / revisión periódica de resultados, riesgos y dependencias); **PMO Governance** (revisión consolidada de desempeño, decisiones, riesgos y escalaciones); y **Strategic Governance** (steering committee y decisiones relacionadas con capital, contratos y milestones estratégicos).

El objetivo no es incrementar el número de reuniones, sino lograr que cada nivel tenga **información, ownership y decision rights claramente definidos**.

IX. PROJECT PERFORMANCE MEASUREMENT FRAMEWORK

La literatura revisada respalda la necesidad de medición y proporciona instrumentos como los Critical Success Factors estudiados por Kineber et al. [9]. Como extensión conceptual de esa literatura, este trabajo propone complementar las métricas tradicionales con indicadores operativos (Tabla I).

Estas métricas propuestas **no deben interpretarse como métricas directamente validadas por las diez fuentes revisadas**, sino como variables candidatas para posterior validación empírica.

El valor del framework no reside en sustituir costo y cronograma, sino en conectar **leading indicators** con los resultados tradicionales del proyecto. Por ejemplo:

Cuadro II
MODELO PREDOMINANTE POR FASE DEL PROYECTO

Fase	Modelo	Justificación
Factibilidad	Agile/Hybrid	Alta incertidumbre
Estudios ambientales	Agile/Hybrid	Feedback y aprendizaje
Permisos	Agile/Hybrid	Alto riesgo regulatorio
Stakeholder engagement	Agile	Alta interacción
Diseño	Agile/Hybrid	Iteración y cambios
Obra civil	Predictive	Capital y dependencias
Electromec./SCADA	Hybrid	Integración
Commissioning	Agile/Hybrid	Alta iteración
Transferencia O&M	Hybrid	Optimización continua

Listing 6. Cadena causal propuesta de leading indicators

```
Decision Aging (up) -> Risk Exposure (up)
                        -> Rework (up) ->
                                Schedule Variance (up)
                                )
```

Esto permitiría a la PMO detectar señales antes de que el problema aparezca únicamente como desviación de cronograma.

X. APLICACIÓN POR FASE DEL PROYECTO

La literatura revisada sugiere que el valor de la adaptabilidad no es uniforme durante todo el ciclo de vida (Tabla II).

Esto mantiene el hallazgo original del paper: la adopción no debe realizarse uniformemente. La obra civil permanece predominantemente predictiva, mientras las prácticas adaptativas se concentran donde existe mayor incertidumbre y necesidad de coordinación.

XI. DISCUSIÓN

La evidencia revisada no justifica reemplazar completamente los modelos predictivos en megaproyectos hidroeléctricos. Por el contrario, sugiere una conclusión más específica.

Los proyectos hidroeléctricos contienen simultáneamente actividades de **alta predictibilidad** y **alta incertidumbre**. La obra civil, los compromisos de capital y determinados contratos requieren mecanismos robustos de planificación y control. En contraste, permisos, stakeholder engagement, diseño e integración contienen niveles mayores de aprendizaje y cambio.

El problema aparece cuando ambos tipos de trabajo son administrados mediante un único ritmo de planificación, governance y decisión. El modelo híbrido propuesto busca resolver esta diferencia mediante una PMO que mantenga los controles tradicionales mientras habilita ciclos adaptativos donde el contexto lo requiere.

XII. IMPLICACIONES PARA LA PMO

La PMO adquiere un papel central. Deja de funcionar únicamente como estructura de reporting y control para convertirse también en un **integrador del sistema de gestión**. Sus responsabilidades incluyen:

1. determinar qué actividades requieren control predictivo y cuáles requieren gestión adaptativa;
2. establecer decision rights;

3. mantener governance y compliance;
4. integrar riesgos con delivery;
5. asegurar trazabilidad;
6. consolidar información;
7. medir leading y lagging indicators;
8. gestionar escalaciones;
9. proporcionar visibilidad ejecutiva;
10. evaluar continuamente la efectividad del modelo.

El objetivo final no es lograr que la organización “sea Agile”. El objetivo es **mejorar el desempeño del proyecto utilizando el mecanismo de gestión más apropiado para cada contexto**.

XIII. CONCLUSIÓN

El desafío de gestión en megaproyectos hidroeléctricos no puede reducirse a una comparación entre Agile y Waterfall.

La literatura revisada muestra que riesgos relevantes del proyecto pueden concentrarse en permisos y coordinación de interesados [1], mientras que Agile Project Management presenta resultados positivos en dimensiones como capacidad de respuesta, innovación, calidad y satisfacción del cliente dentro del sector construcción [2].

La evidencia proveniente de industrias críticas para la seguridad demuestra además que prácticas ágiles pueden coexistir con mecanismos formales de compliance y trazabilidad [3], mientras que la teoría de gestión de portafolios respalda modelos de governance adaptados al contexto [4].

REFERENCIAS

- [1] T. S. Kishore *et al.*, “A comprehensive study on the recent progress and trends in development of small hydropower projects,” *Energies*, vol. 14, no. 10, p. 2882, 2021, hydropower project lifecycle; permitting and stakeholder-coordination identified as dominant schedule-risk drivers.
- [2] S. S. Badran and A. B. Abdallah, “Lean vs agile project management in construction: Impacts on project performance outcomes,” *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 32, no. 5, pp. 2844–2869, 2024, 20 citations. n=392 PMs, Jordan. APM improves innovation/responsiveness/quality/client satisfaction; degrades cost performance. Central empirical anchor of this paper.
- [3] J. A. Hüllmann, K. Kimathi, and P. Weritz, “Large-scale agile project management in safety-critical industries: A case study on challenges and solutions,” *Information Systems Management*, vol. 42, no. 2, pp. 138–160, 2024, 18 citations. Closest domain proxy to hydroelectric context. Compliance-checkpoint-augmented Scrum for safety-critical, regulated industries.
- [4] M. Martinsuo and J. Gerdal, “Management of project portfolios: Relationships of project portfolios with their contexts,” *International Journal of Project Management*, vol. 38, no. 7, pp. 441–453, 2020, 149 citations, top 1 % percentile. Contingency-based portfolio/PMO governance theory.
- [5] “Digitalization of project management: Opportunities in research and practice,” *Project Leadership and Society*, 2022, 74 citations. Digital PMO tooling as enabler of hybrid agile/waterfall coordination; identifies capital-intensive infrastructure as under-researched.
- [6] F. Albuquerque, A. S. Torres, and F. T. Berssaneti, “Lean product development and agile project management in the construction industry,” *Revista de Gestão*, vol. 27, no. 2, pp. 135–151, 2020, 39 citations, top 10 % percentile. Theoretical bridge between Lean Construction and Agile Project Management.
- [7] “Hybrid project management methods in the public sector: Synthesis of waterfall and agile,” *Publishing House Pegas*, 2025, adaptive hybrid Waterfall+Agile framework for bureaucratic, regulated public-sector environments; targets budget-overrun risk reduction.
- [8] “Are megaprojects ready for the fourth industrial revolution?” in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Management, Procurement and Law*, 2020, 13 citations. Megaproject digital/agile readiness uneven across lifecycle; design and commissioning phases most receptive.

- [9] A. F. Kineber, A. E. Oke, N. Elshaboury, Z. Abunada, M. Elseknidy, A. Zamil, M. Alhusban, and S. A. Ilori, "Agile project management for sustainable residential construction: A study of critical success factors," *Frontiers in Built Environment*, vol. 10, 2024, 10 citations. n=120, Nigeria. CSF/PLS-SEM survey design; two CSF categories: dynamic project optimization, agile project foundations. Proposed replication target for hydroelectric sector.