



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Resiliencia operativa y gestión de activos críticos: estrategia de recuperación ágil ante fallas en el estator para garantizar la continuidad del negocio en la central hidroeléctrica Baba

Mauricio Boada Herrera
Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP
E-mail: mauricio.boada@celec.gob.ec
Guayaquil – Ecuador

Resumen

En el 2023, la central hidroeléctrica Baba enfrentó una interrupción crítica que redujo la capacidad de generación de la planta en un 50%.

Bajo la perspectiva de gestión de riesgos, este evento representaba una amenaza severa a la continuidad del negocio. Para abordar esta emergencia, la organización adoptó una estrategia de gestión de activos basada en principios ágiles, además, priorizando la entrega de valor y la adaptación al contexto técnico.

La falla del estator: escenario de pérdida del 50% de la capacidad de generación

La central Baba ubicada en la provincia de Los Ríos en el Ecuador, tiene dos unidades de generación de 21,5 MW c/u equipada con turbinas Kaplan y generadores síncronos. En octubre de 2023 se presentó una falla en el estator del generador nro. 1 (U1 en adelante), provocando su salida de servicio y una reducción del 50% en la capacidad de generación de la planta.

La única forma de reparar el estator es mediante la extracción del rotor, es decir requiere su desmontaje, actividad que “normalmente” se ejecuta una vez cada 10 años o después de un determinado número de horas de operación (que varían según el fabricante) y que es conocida como *overhaul* del generador. Además, suele preferirse que sea ejecutada por completo por el fabricante bajo la modalidad “llave en mano”.

Las inspecciones iniciales al estator de la U1 evidenciaron que el aislamiento de las bobinas estaba fuera de especificación, lo que requería una intervención inmediata. Los daños fueron: tres bobinas del estator con defectos en el aislamiento y fallas leves en el núcleo (Fig. 1).



Figura 1. Fallas en las bobinas 105 y 106 del estator (arriba), daños en el núcleo del estator (abajo) de la U1 de la central Baba

Evaluación del contexto: déficit energético nacional y necesidad de restauración inmediata

En el periodo comprendido entre el 2023-2024, el Ecuador fue afectado por la reducción drástica de la producción de energía eléctrica [1], para [2] “Ecuador enfrenta una crisis energética de gran magnitud desde octubre de 2023, con un déficit superior a los 1.000 MWh al momento.”.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Bajo el escenario de déficit, el "valor" de cada MWh generado por la hidroeléctrica se multiplica y aunque no es una central de gran porte, permanecer fuera de servicio por más tiempo, hubiera exacerbado los cortes de energía a nivel cantonal.

Resiliencia ante la disrupción (falla)

Según el PMI [3] los entornos de alta variabilidad, por definición, conllevan más incertidumbre y riesgo. Un nuevo diseño, la resolución de problemas y algo no realizado antes es trabajo exploratorio, lo cual requiere que expertos en la materia colaboren y resuelvan los problemas a fin de crear una solución.

Para abordar esto, los proyectos son gestionados bajo enfoques ágiles (adaptativos) que son tanto iterativos como incrementales a fin de refinar los elementos de trabajo y hacer entregas con frecuencia.

Desde la perspectiva de la ISO 55000:2024, uno de los resultados de un sistema de gestión de activos es la capacidad de la organización para adaptarse más rápidamente a los cambios en el contexto interno [4] (como una falla catastrófica).

Dado que un generador tiene el potencial de impactar significativamente los objetivos de la central y por lo tanto de la organización, se considera un activo crítico [4].

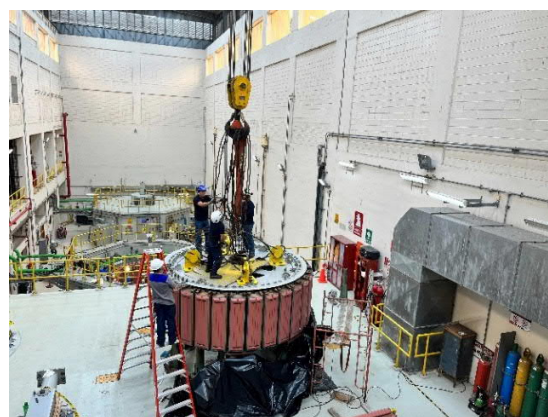
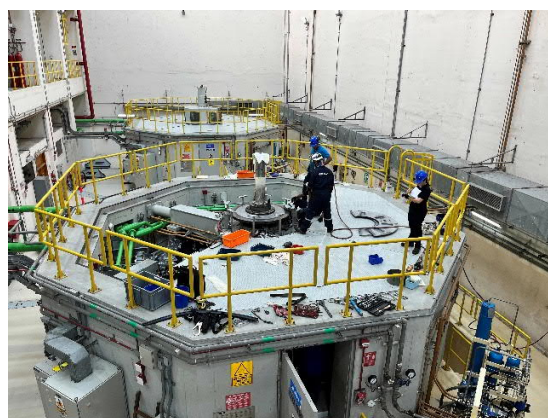
Para ISO 31000:2018, el proceso de reparación es una forma de tratamiento de riesgos [5] y de acuerdo con ISO 22301:2019, al acortar la reparación, se limita el impacto [6] (resultado de la disrupción sobre los objetivos); esto también reduce los costos directos e indirectos de la interrupción y protege la reputación y credibilidad de la organización.

Metodología ágil en la gestión de mantenimiento

Integración de principios adaptativos del PMI para la resolución de emergencias operativas

El desmontaje (Fig. 2) de la U1 se realizó en el periodo comprendido del 25 al 29 de octubre de 2023, algunas fotografías de este proceso constan a continuación.

De manera resumida, esta actividad contempla: desmontaje del cabezal Kaplan, cubierta y anillos colectores, frenos (incluido el disco), cojinete superior (incluye patines), intercambiadores de calor (radiadores), anillo guía superior, cruceta, tapas, soportes y finalmente extracción del rotor. Así también una parte esencial del desmontaje son los protocolos de mediciones mecánicas, que luego permiten que el montaje sea realizado manteniendo las tolerancias adecuadas.





XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia

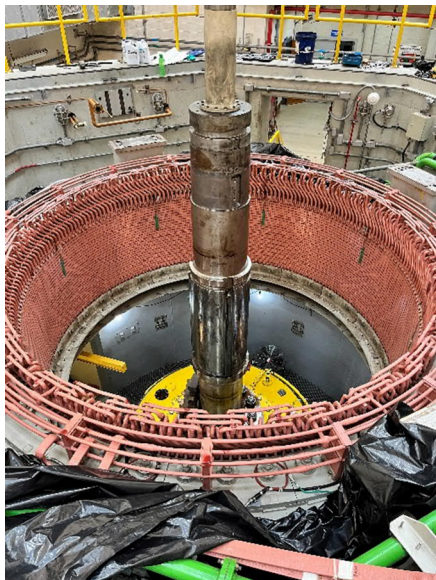


Figura 2. Parte de la secuencia de desmontaje del rotor

La actuación del equipo técnico se alineó de manera natural con varios de los principios de gestión de proyectos del PMI [7], tales como:

- Enfoque en la entrega de valor.
- Adaptación al contexto.
- Comunicación constante con partes interesadas.
- Trabajo colaborativo auto organizado.
- Evaluación iterativa del riesgo.

Se conformó rápidamente un equipo multidisciplinario, asignando roles nativamente con base en la experiencia y conocimiento específico, de esta forma, la organización minimizó los impactos negativos y maximizó los beneficios [4]. El equipo trabajó de forma cercana en campo, realizando sesiones breves de actualización para convenir estrategias de intervención basadas en la información (disponible). El plan de acción fue ajustado dinámicamente en función del análisis de datos y la evolución de la condición del equipo, esta flexibilidad fue clave para evitar pérdidas mayores.

Ingeniería de recuperación y gestión técnica

El estator tiene 216 bobinas en un bobinado de doble capa. Cada ranura del estator contiene dos pares de bobinas, una designada como bobina inferior montada radialmente en la parte inferior de la ranura y la otra designada como superior montada radialmente en la parte superior de la ranura.

Cada bobina individual (Fig. 3) está compuesta de cuatro vueltas con seis conductores en paralelo, los terminales de estas bobinas, después de ser insertados en las ranuras; se unen mediante soldadura individualmente entre sí, formando grupos en serie/paralelo de acuerdo con el esquema del bobinado.



Figura 3. Bobinas individuales

Las ranuras se cierran con cuñas aislantes y se insertan separadores también aislantes entre las capas inferior y superior de las bobinas. Las bobinas se fijan dentro de la ranura con pintura conductora, papel y bloques rígidos que llenan los espacios libres entre la bobina y la pared de la ranura.

Dada la naturaleza de la falla y debido a la zona donde ocurrió, para la reparación, el fabricante recomendó que se corten “bastones” correspondientes al bobinado superior. El corte fue realizado centímetros después de la parte curva (arriba y abajo) de la bobina superior (Fig. 4), de manera tal que la soldadura y posterior aislamiento de cada “hilo” de bobina tuviera el espacio suficiente para conservar la capacidad de aislamiento y la distancia mínima requerida entre



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



fases, especialmente para aquellas de diferente fase.

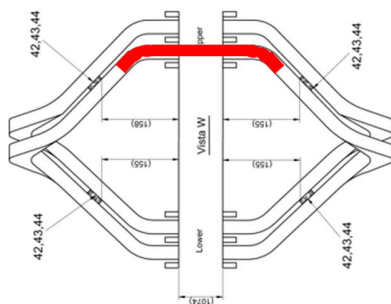


Figura 4. “Bastones” (color rojo) cortados de la bobina superior

La decisión de reemplazar únicamente los “bastones” se tomó por cuanto y de acuerdo con el fabricante, el procedimiento de cambiar las bobinas completas tomaría aproximadamente de 150 a 180 días solamente para su reemplazo, porque involucraba además de desoldar los puentes y las uniones, el desmontaje de aproximadamente 43 bobinas por ser un bobinado de doble capa. A ese tiempo habría que agregarle el de fabricación de las bobinas, tiempo que puede ser un año o año y medio y que depende además de la materialización de un contrato, y de la disponibilidad en la fábrica para su elaboración.

El PMI resalta que los métodos ágiles dedican menos tiempo a intentar definir y acordar el alcance en la etapa inicial del proyecto y más tiempo a establecer el proceso para su descubrimiento y refinamiento continuos [7]. Estos enfoques promueven la participación de los miembros del equipo como expertos de dominio locales en la gestión de la integración.

Reparación especializada de bobinas y núcleo: el enfoque de "fallar rápido y aprender rápido" en el Surge Test

Detallar la reparación, no es el objetivo principal de este artículo, sin embargo, es importante

destacar que los materiales necesarios como: cinta de mica, cinta de fibra de vidrio y papel conductor fueron provistos por el fabricante con mucha rapidez (agilidad), la reparación de las bobinas tomó aproximadamente 26 días, incluso una de ellas tuvo que volver a repararse porque no pasó la prueba de *Surge Test* a la cual fue sometida.

Nota: La prueba de SURGE (que podría traducirse como IMPULSO), es la única prueba existente hoy en día para determinar de manera predictiva y con alta efectividad, la condición del aislamiento entre espiras.

Para Hadida & Troilo [8], la metodología ágil promueve un trabajo colaborativo, decisiones rápidas y autonomía, valorando el error para aprender y mejorar. Fomenta la flexibilidad y adaptación mediante el “fallar rápido, aprender rápido”.

Entre las pruebas ejecutadas previo al montaje del rotor, se pueden mencionar: ELCID, presión de las cuñas, resistencia de aislamiento e índice de polarización, Surge Test y alto potencial (Hi-Pot). Según el PMI, para manejar los cambios, los métodos ágiles incorporan pasos frecuentes de calidad y revisión a lo largo de todo el proyecto, en lugar de al final [7].

La reparación de las bobinas se puede apreciar en la figura 5.





XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Figura 5. Bobinas reparadas, lado superior (arriba) y lado inferior (abajo)

Impacto de la respuesta resiliente

Para la *Prudential Regulation Authority* [9] la resiliencia operativa se define como la capacidad de seguir prestando "importantes servicios de negocios", lo que va de la mano con ISO 55000 que busca que la gestión de activos se enfoque en restaurar la capacidad de realizar valor lo antes posible.

De forma simplificada, en la tabla 1 consta la hoja de ruta de la reparación ágil.

El montaje del rotor sigue una secuencia prácticamente inversa al desmontaje, y fue un trabajo que se realizó en seis días (ver anexo).

Finalizado el montaje del rotor, realizadas las inspecciones visuales y la ratificación de condiciones operativas, aproximadamente a las 19:00 del 30 de diciembre de 2023, la U1 comienza a girar en vacío, esto por una hora, tiempo en el cual se verifica: que no existan fugas de aceite o agua, que los flujos de agua o aceite sean los adecuados, que las temperaturas en los cojinetes se estabilicen, que las vibraciones en los cojinetes estén en los rangos adecuados, etc. Es decir que la U1 presente condiciones favorables para sincronizar y tomar carga.

La reparación del estator fue ejecutada en 40 días efectivos, el periodo de aproximadamente un mes, esto es del 23 de noviembre al 19 de diciembre (ver anexo), los trabajos se suspendieron por cuanto Voith no disponía de manera inmediata del equipo para la prueba de *Surge*.

De acuerdo con el PMI, en proyectos iterativos, adaptativos y ágiles, el trabajo se prioriza para abordar primero los elementos de mayor valor para el negocio y considera un cierre anticipado no un fracaso, sino como: realización temprana de beneficios, minimización de riesgos, o una oportunidad para capitalizar lo entregado y tomar decisiones basadas en valor real, no en planes teóricos [3].

Tabla 1. Hoja de ruta: recuperación ágil del generador U1

FASE	ACCIÓN ESTRATÉGICA	HITOS DE GESTIÓN
1. Alerta	Impacto en el negocio	Se detecta falla en aislamiento. Se identifican daños en bobinas.
2. Decisión	Decisión ágil	Se descarta el proceso tradicional (6 meses). Se forma un <i>scrum team</i> multidisciplinario (Hidronación + Voith).
3. Ejecución	<i>Sprint</i> de desmontaje y hallazgo	Extracción del rotor. Inspección continua, no al final.
4. Calidad	Validación iterativa	Prueba de <i>Surge Test</i> : si falla, se corrige en el acto. No esperar a armar la máquina para probar.
5. Retorno	Sincronización y valor	40 días después: el activo genera 17.04 MW. Éxito en la continuidad del negocio.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Análisis y discusión

¿Fue la agilidad un golpe de suerte?

La evidencia presentada sugiere que no, por el contrario, fue el resultado de una cultura organizacional que confió en su equipo multidisciplinario. Este caso valida que la gestión de activos no es solo mantenerlos, sino dirigir personas, procesos y gestionar riesgos.

El evento de falla en el estator representó una interrupción crítica, bajo la estimación inicial de seis meses de indisponibilidad, el lucro cesante resultaba muy significativo, pero sobre todo de alto impacto para la resiliencia del Sistema Nacional Interconectado. De acuerdo con ISO 22301 el modo de actuación cumplió con el RTO, es decir, el plazo de tiempo priorizado establecido por la organización para reanudar una actividad interrumpida [6].

La decisión de extraer el rotor, actividad propia de un *overhaul* decenal, fue el resultado de una evaluación iterativa, donde el enfoque ágil permitió "inspeccionar y adaptar" la estrategia a medida que aparecían nuevos hallazgos. El incidente con la bobina que falló en la prueba de *Surge Test* es el mejor ejemplo de agilidad, en lugar de ser un retraso, se gestionó bajo la premisa de "fallar rápido para aprender rápido", evitando que la U1 se pusiera en servicio con un vicio oculto que habría provocado una falla catastrófica posterior con un costo de cierto modo incalculable.

Conclusiones

Al utilizar personal propio de CELEC EP Hidronación con supervisión externa de Voith, se optimizó el MTTR. Se obtuvo una reducción del tiempo de indisponibilidad del 78% respecto a la proyección inicial (de 180 días a 40 días). Bajo la óptica de ISO 22301, este logro sugiere que la organización tenía una estructura de respuesta y planes de continuidad efectivos que permitieron

una comunicación y coordinación rápidas entre los equipos.

La combinación de experiencia técnica, un entorno de confianza y colaboración, y una gestión flexible centrada en el valor permitió una respuesta efectiva, propia de una cultura de trabajo ágil integrada de forma natural para la toma de decisiones en situaciones críticas.

El proceso de reparación constituye una medida de tratamiento del riesgo [5]. En este escenario, el equipo de mantenimiento que intervino para mitigar las consecuencias derivadas del evento de falla demostró un alto nivel de eficiencia y también que posee una madurez operativa alta, donde el conocimiento técnico (*know-how*) redujo notablemente el tiempo de restitución del equipo, lo cual a su vez disminuyó significativamente el impacto adverso sobre los objetivos de la organización.

La gestión de activos busca mejorar la resiliencia del servicio [4]. La rapidez de la reparación es una medida de esa resiliencia, asegurando que la falla no se convierta en una interrupción prolongada, considerando que la U1 es un activo crítico por que tiene el potencial de impactar significativamente en el logro de los objetivos de la organización.

Bibliografía

- [1] Universidad Central del Ecuador. (s. f.). *Crisis energética: Sistema eléctrico en el Ecuador* [Documento institucional]. Repositorio Institucional UCE.
- [2] Universidad San Francisco de Quito. (2024, septiembre). La crisis del sector eléctrico: Vino para quedarse. *Koyuntura*, (108).
- [3] PMI, P. M. (2017). *Guía práctica de ágil*. Project Management Institute.



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



- [4] International Organization for Standardization. (2024). *Asset management - Management systems - Requirements (ISO 55001:2024)*. ISO. +593 985 980 240
- [5] International Organization for Standardization. (2018). *Risk management — Guidelines (ISO 31000:2018)*. ISO.
- [6] International Organization for Standardization. (2019). *Security and resilience — Business continuity management systems — Requirements (ISO 22301:2019)*. ISO.
- [7] PMI, P. M. (2017). *La guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK)* (6ta ed.). Project Management Institute.
- [8] Hadida, S., & Troilo, F. (2020). La agilidad en las organizaciones: trabajo comparativo entre metodologías ágiles y de cascada en un contexto de ambigüedad y transformación digital. *CEMA Working Papers: Serie Documentos de Trabajo*. 756, Universidad del CEMA.
- [9] Prudential Regulation Authority. (2019). *Building operational resilience: Impact tolerances for important business services* (Consultation Paper CP29/19). Bank of England.

Mauricio Boada Herrera, recibió su título de ingeniero en Electricidad de la Escuela Superior Politécnica del Litoral en 2006. Cuenta también con una maestría en Economía y Dirección de Empresas y está culminando sus estudios de maestría en Electrónica y Automatización. Trabaja como jefe de ingeniería de mantenimiento y producción, además ha desempeñado cargos como gerente, subgerente de producción, jefe de central, jefe de operación en CELEC EP; sus áreas de estudio están relacionadas con: los mercados eléctricos, la eficiencia energética, la integración energética regional, las energías renovables y la gestión de O&M de centrales de generación.

Mauricio Boada Herrera
Carchi 702 y Av. 9 de Octubre
Guayaquil – Ecuador



XXVIII CONGRESO INTERNACIONAL DE MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS

22 AL 24 DE ABRIL DE 2026. Bogotá - Colombia



Anexo 1 Cronograma de reparación de la U1

	2023																																									
	Octubre							Noviembre														Diciembre																				
	19	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
ACTIVIDAD																																										
Inspección Aseguradora																																										
Desmontaje																																										
Inspección VOITH																																										
Reparación bobinas (105, 106 y 109)																																										
Pruebas eléctricas (bobinas)																																										
Reparación bobina (109)																																										
Pruebas eléctricas (bobinas)																																										
Montaje																																										
Puesta en Servicio																																										