

Ésta es una traducción del documento en inglés preparado por el Panel de Asesores Independientes de BID Invest. En caso de discrepancia entre esta versión y la original, prevalecerá lo sostenido en el documento original.

**Panel Asesor Independiente para BID Invest
Informe del IAP n.º 4, junio de 2020
Proyecto Hidroeléctrico Ituango,
Colombia**



Federico Ciampitti

Hydraulic, Mechanical & Electric Equipment

Via L Tolstoi 72, 20146 Milan Italy

Tel. +39 335 1007517

Federico.ciampitti@gmail.com

Pavlos Marinos

Engineering Geology and Geotechnical

23A, Penetoliou str. 11741, Athens, Greece

Tel. +30 694 4301993

marinos@central.ntua.gr

Alessandro Palmieri

Dam Engineering and Safety (Chair)

Via Massimi 25, 00136 Rome, Italy

Tel. + 39 063 5400737

Arp.palmieri@gmail.com

ÍNDICE

ACRÓNIMOS

RESUMEN EJECUTIVO Y RECOMENDACIONES

1	SITUACIÓN ACTUAL DEL PROYECTO.....	7
1.1	General	7
1.2	Comparación con octubre de 2019	7
1.3	Opciones para lafinalización del proyecto	8
1.4	Registro de riesgos del proyecto y plan de preparación para emergencias.....	8
1.5	Taponamiento permanente de TD2 y GAD	9
1.6	Nivel de peligro corriente abajo	10
1.7	Evaluación de seguridad	11
2	EVALUACIÓN GEOTÉCNICA.....	12
2.1	Pozos de presión 1 a 4 (lado Norte).....	12
2.2	Pozos de presión 5 a 8 (lado Sur).....	12
2.3	Complejo de cavernas de la sala de máquinas	14
2.4	Galería de descarga intermedia (IDG).....	17
2.5	Represa	17
2.6	Piscina de aliviadero	19
2.7	Estabilidad de la pendiente del estribo derecho	19
2.8	La pendiente más corriente arriba al sur de Romerito	21
2.9	Otras características de estabilidad de la pendiente	22
3	EQUIPOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS	24
3.1	Equipos instalados en el complejo de cavernas	24
3.2	Resumen del proceso de evaluación	27
3.3	Actualización sobre el patio de maniobras de GIS de 500 kV.....	28
3.4	Equipo hidromecánico	28
3.4.1	Compuertas de entrada de alimentación	28
3.4.2	Revestimiento de acero a pozos verticales.....	29
3.4.3	Compuertas del GAD	29
3.4.4	Aliviadero y compuertas de la IDG	30
4	FINALIZACIÓN DEL PROYECTO- CALENDARIO E IMPLICACIONES DE COSTOS.....	31
4.1	Cronograma de finalización del proyecto.....	31
4.2	Logro de la operación comercial.....	31
4.3	Implicaciones de costes del cronograma de finalización	32
5	RIESGO RESIDUAL DURANTE LA OPERACIÓN.....	34

5.1	Equipos de generación e hidromecánicos.....	34
5.2	Operación de turbinas en condiciones de "velocidadsin carga"	34
5.3	Control del embalse durante la operación del proyecto.....	35
5.4	El taller de PFMA	35
5.5	La posibilidad de operar las unidades por debajo de 390 msnm.....	36
6	ANEXO A: LISTADO DE DOCUMENTOS PUESTOS A DISPOSICIÓN DEL IAP.....	40
7	ANEXO B: TALLER DE MODOS DE FALLOS POTENCIALES el 21 de mayo	40
7.1	Justificación.....	40
7.2	Objetivos del taller de PFMA.....	40
7.3	Introducción al PFMA.....	40
7.4	Proceso de PFMA.....	41
7.4.1	PFM SB: Aliviadero bloqueado por desprendimiento	41
7.4.2	PFM ED: Reducción del embalse de emergencia	42
7.5	Inventario.....	43
8	ANEXO C: Taller de la PFMA- Listado de participantes.....	45
9	ANEXO D: Modo de falla potencial- Básico.....	46
10	ANEXO E: PFM SB: Aliviadero bloqueado por desprendimiento	48
11	ANEXO F: PFM ED: Reducción del embalse de emergencia	48

ACRÓNIMOS

ADT	Túnel de desvío auxiliar
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CAP	Capacidad del embalse
EPM	Empresas Públicas de Medellín
FEM	Análisis de elementos finitos
IAP	Panel Asesor Independiente de BID Invest
IDG	Galería de descarga intermedia
MAF	Flujo medio anual
MAS	Producción media anual de sedimentos
MLO	Salida de nivel medio
ANLA	Autoridad Nacional de Licencias Ambientales
PH	Sala de máquinas
PF	Probabilidad de falla
PFMA	Análisis de modos de fallo potenciales
TD2	Túnel de desvío 2 (derecho)
EBIA	Junta de Asesores Independientes de EPM
msnm	Metros sobre el nivel del mar
SNL	Velocidad sin carga
PFMA	Análisis de modos de fallo potenciales

RESUMEN EJECUTIVO Y RECOMENDACIONES

A pesar de los eventos sin precedentes que impactaron el proyecto, las medidas implementadas permiten expresar una evaluación satisfactoria de la seguridad de las obras tanto de superficie como subterráneas.

El taponamiento en el DT2 ha sufrido retrasos y sigue siendo la actividad más urgente. Su planificación es plenamente satisfactoria y las medidas tecnológicas que se están adoptando son las adecuadas. También se cuenta con una planificación de contingencia satisfactoria para superar acontecimientos imprevistos. Una vez que el taponamiento se complete con éxito, las condiciones de seguridad para la población corriente abajo volverán a la normalidad.

Se llevó a cabo un taller de PFMA para abordar el tema del control efectivo del embalse durante la operación. Para ello, se identificaron dos medidas clave:

- Hacer funcionar las turbinas a alturas inferiores a 390 msnm.
- Adición de una salida de nivel medio (MLO).

La primera medida parece técnicamente factible; la opinión del proveedor es esencial, incluídala información sobre la eficiencia de las garantías.

La decisión de construir una MLO debe estar informada sobre el riesgo, es decir, se debe repetir el taller de PFMA, con estimaciones de probabilidad más detalladas, y el nivel de riesgo en comparación con el asociado con la construcción de una MLO.

El comportamiento de la represa es satisfactorio. El efecto positivo de la pared del diafragma en la parte superior de la represa es evidente. Dado el rendimiento observado, esa área debe considerarse "relleno definitivo".

Los trabajos de tratamiento en las pendientes de la orilla derecha por encima de los trabajos de entrada avanzan satisfactoriamente. El IAP renueva su recomendación de extender los tratamientos necesarios a las pendientes más corriente arriba, donde se produjeron movimientos masivos en 2018.

El rendimiento de la piscina de inmersión del aliviadero es satisfactorio hasta la fecha. Cuando, con la operación de la turbina, sea posible el acceso, se deberá realizar una evaluación exhaustiva y evaluar la oportunidad de excavar previamente parte de la piscina.

A pesar de la disipación de energía extremadamente alta e incontrolada que se produjo bajo tierra, durante mucho tiempo, el comportamiento general del macizo rocoso es satisfactorio. Sorprendentemente, no se ha observado ninguna falla progresiva debido a la redistribución de tensiones.

Los conductos de presión y las aberturas subterráneas en el lado Norte del complejo eléctrico se encuentran en fase avanzada de rehabilitación y los trabajos de reparación restantes están sustancialmente definidos. El IAP recomienda considerar la adopción de pozos de drenaje a través del relleno planificado de Almenara 1.

En el lado Sur, el macizo rocoso aparece de menor calidad. El IAP recomienda preparar una clasificación por zonas del macizo rocoso, teniendo debidamente en cuenta la fiabilidad de los núcleos. El diseño de los trabajos de rehabilitación debe basarse en los defectos reales del macizo rocoso (juntas abiertas, zonas de corte, roca suelta, cavidades, etc.) y los posibles mecanismos de falla asociados.

En el lado Sur, el complejo subterráneo presenta un laberinto de galerías temporales y permanentes, algunas de las cuales pueden inducir gradientes hidráulicos hacia aberturas permanentes. Un plan de taponamiento, que secuencie cuidadosamente los trabajos de taponamiento, revestimiento y lechada, es necesario para gestionar los riesgos de fracturación hidráulica, taponamiento de drenaje, daños a los revestimientos permanentes, etc.

Se están estudiando varias opciones para permitir que la IDG libere flujo ecológico. El IAP apoya la opción 5, que incluye un pozo y un túnel adicionales. Dicha opción permite activar el canal de agua sin abrir la entrada a 260 m bajo el agua. El IAP señala que, durante la vida del proyecto, podría ser valioso lavar los sedimentos por debajo de las entradas y prolongar la vida del proyecto. A tal efecto, podrá reconsiderarse la necesidad de abrir la entrada de la IDG a 260 m, durante la vida del Proyecto. La planificación debe basarse en estudios batimétricos. Antes de su próxima visita, el IAP desea revisar los estudios realizados hasta la fecha.

La decisión de reemplazo total de la Unidad 3 y la Unidad 4, incluyendo hormigón de primera y segunda fase y partes embebidas, básicamente completó la evaluación de los equipos electromecánicos y permitió la colocación de todos los pedidos necesarios para reconstituir todo el suministro electromecánico de Ituango.

El cronogramade EPM del 30 de marzo de 2020 incluye los siguientes hitos:

<i>Unidad</i>	1	2	3	4
<i>Inicio de la operación</i>	Diciembre de 2021	Abril de 2022	Julio de 2022	Octubre de 2022

Con la reserva marginal sobre las actividades complejas asociadas a la finalización de las entradas a las unidades 2, 3 y 4, el IAP considera que el cronograma es realizable.

La fiabilidad de las estimaciones de costes es buena para los equipos de E&M porque se espera que la mayoría de los costes adicionales corran a cargo de las compañías de seguros.

Se necesitan más investigaciones y pruebas para definir adecuadamente las obras civiles requeridas para la puesta en marcha de las unidades 5 a 8. El IAP considera prematuro evaluar las implicaciones relativas de los costes, hasta que las investigaciones y el diseño hayan alcanzado un nivel suficiente de confiabilidad.

El IAP considera razonable destinar una contingencia de USD 50 millones para enfrentar requerimientos imprevistos en las obras civiles necesarias para la puesta en marcha de las unidades 1 a 4.

1 SITUACIÓN ACTUAL DEL PROYECTO

1.1 General

El Proyecto Hidroeléctrico Ituango está en construcción en el noroeste de Colombia desde 2009. El Panel Asesor Independiente (IAP) se formó en 2018 para asesorar a BID Invest en asuntos técnicos de importancia primordial para la seguridad y la sostenibilidad del Proyecto. El IAP visitó Ituango tres veces, en agosto de 2018, marzo de 2019 y septiembre de 2019 y emitió los informes respectivos.

La cuarta misión, de mayo de 2020, tuvo que organizarse virtualmente debido a la pandemia concomitante de COVID-19. Los tres miembros del IAP asistieron a la misión. A pesar de las dificultades, gracias a una excelente organización por parte de EPM y la facilitación por parte del BID, la misión virtual permitió al IAP apreciar los avances realizados y obtener una actualización sobre los principales problemas técnicos del Proyecto.

La misión estuvo compuesta por tres videoconferencias, los días 19, 20 y 21 de mayo. Los dos primeros días se dedicaron a presentaciones y debates. El último día, el IAP dio un resumen de sus observaciones preliminares, que se elaboran y presentan en este informe, seguido del taller de PFMA. Este último fue entregado por el IAP para ayudar a EPM a tomar una decisión basada en el riesgo sobre el tema del control del embalse durante la operación del Proyecto.

A las sesiones del 19 y 20 de mayo asistieron EPM y sus Consultores.

Los miembros de la Junta de Asesores Independientes de EPMS y de Poyry también asistieron al informe del IAP y al taller de PFMA del 21 de mayo; el anexo C del presente informe contiene el listado completo de participantes.

El IAP desea reconocer la contribución altamente profesional de todas las partes interesadas a las conversaciones y los intercambios de puntos de vista sobre los complejos temas técnicos relacionados con el Proyecto Hidroeléctrico Ituango.

1.2 Comparación con octubre de 2019

Durante la misión virtual del IAP de mayo de 2020, la situación del proyecto ha evolucionado considerablemente en comparación con septiembre de 2019:

- El rendimiento de la represa está en línea con las expectativas de diseño y la correspondencia entre el rendimiento previsto y el medido es excelente.
- El aliviadero está operando a tiempo completo, lo que supera las previsiones de diseño, y continuará así hasta que se establezca la operación de la turbina. El monitoreo de las pendientes de la piscina de inmersión no muestra ningún signo de desgaste inaceptable.
- La mayoría de las áreas subterráneas, que se vieron afectadas por el caudal incontrolado del río, han sido inspeccionadas y se han definido los trabajos de reparación necesarios. La gran cavidad entre los pozos de presión 1 y 2 se ha rellenado con éxito.
- Las condiciones de seguridad y protección se han restablecido en la mayoría de las áreas y progresan satisfactoriamente en otros lugares.
- De los trabajos restantes, requeridos para poner en marcha las unidades 1 a 4, la estabilización de la conexión entre PH Cavern y Almenara 1 es el más desafiante; la experiencia adquirida en el llenado exitoso de la cavidad de los pozos 1-2 ayudará a la conducción de los trabajos.
- El diseño y la metodología para el taponamiento de RDT y GAD están avanzados y las actividades de los contratistas especializados están en curso, aunque algunos de ellas están demostrando ser más desafiantes de lo esperado.
- Se firmó el contrato para las nuevas tuberías forzadas y el contratista está procediendo con el suministro de material y la movilización.

- Después de la evaluación negativa de las partes embebidas de la unidad 3 y 4, se abandonó la hipótesis de una partición de cada cámara del pozo en dos mitades y se definió la secuencia de montaje y puesta en marcha de las unidades.
- La adquisición a través de varios paquetes del equipo electromecánico dañado se ha completado sustancialmente.
- Se adoptó el cambio de diseño, colocando la entrada de la IDG a mayor altura utilizando un pozo vertical conectado a las entradas de alimentación; el diseño detallado está en marcha.

1.3 Opciones para la finalización del proyecto

La siguiente tabla muestra la progresión de la evaluación del IAP de las "Opciones para la finalización del proyecto"

que se presentaron desde la participación del IAP en el Proyecto.

Opciones	Evaluación de agosto de 2018	Evaluación de marzo de 2019	Evaluación de octubre de 2019	Mayo de 2020 mayo de 2020
Rehabilitación completa	Opción preferible; confirmación final después de la evaluación de los daños en el complejo de la sala de máquinas.	Opción preferible confirmada.	Confirmado sustancialmente.	Confirmado
Revisar las salidas del proyecto	No previsto en esta etapa.	Salida de alimentación sin modificar. Programación de la fuente de alimentación de la segunda etapa (unidades 5 a 8) a evaluar.	Salida de alimentación sin modificar. La secuencia para poner en funcionamiento la unidad será independiente de la fuente de alimentación original de dos etapas.	Salida de alimentación sin modificar. Secuencia de puesta en marcha de la unidad: U1 (dic20), U2 (abr21). Otras unidades aún por definir.
Revisar los objetivos del proyecto	No es realista.			
Reingeniería del proyecto	Adición de salida de nivel medio (MLO) esencial		Decisión futura sobre la MLO que será respaldado por un análisis de modos de fallo potenciales.	Taller de PFMA realizado. Se desarrollará aún más para lograr una decisión informada sobre el riesgo en la MLO adicional.
Cierre parcial/total	Muy improbable, a menos que la ubicación de la caverna deba ser abandonada por daños excesivos.	Se puede excluir el cierre parcial.	Cierre parcial excluido.	
Visión a largo plazo	El proyecto tendrá que ser abandonado al final de su vida útil, cuando la gestión de los sedimentos gruesos, para mantener el funcionamiento de la central de pasada, deje de ser rentable.	Se deben iniciar estudios batimétricos para evaluar las tendencias de sedimentación.	La gestión del embalse a largo plazo conserva su importancia.	El IAP desea revisar los resultados de los estudios batimétricos realizados hasta la fecha.

1.4 Registro de riesgos del proyecto y plan de preparación para emergencias

El registro de riesgos del proyecto cubre todo tipo de riesgos: de seguridad, técnicos y financieros. En algunos análisis de riesgo, se estima un índice de riesgo general, al utilizar una combinación de los tres tipos, con algún tipo de factores de ponderación. Tales índices generales pueden ser engañosos si no se entiende el procedimiento de acumulación. En otras palabras, los tipos de riesgo deben desglosarse según el tipo de evaluación de riesgos en el que uno esté interesado.

El documento titulado "Alertas Proyecto Ituango", representado en la figura n.º 1, es una buena síntesis de los elementos clave para evaluar las condiciones del proyecto en tiempo real en interés de la seguridad del proyecto y de las comunidades corriente abajo. Como tal, representa un componente clave del plan de preparación para emergencias del proyecto .

Alertas Proyecto Itango							
Reporte OMT	23/11/2019	Hora de Corte		3:00 p.m.			
RISGOS	Medida	Variable	Estado	Valores de Referencia para alertas			Observaciones
				Normal	Amarillo	Rojo	
Caudal	Caudal Píntola	(m³/s)	879.84	>1500	>1500	>3000	Registro tomado a las 4:15 p.m.
	Caudal Olaya	(m³/s)	1431.28	>2000	>3000	>3000	Registro tomado a las 4:50 p.m.
	Caudal que ingresa al embalse	(m³/s)	1253.67	>10000	>10000	>20000	Registro tomado a las 5:15 p.m.
	Vertimiento	(m³/s)	1117.96	>2000	>3000	>3000	Registro tomado a las 6:30 p.m.
	Descarga Itango	(m³/s)	1148.33	>2000	>3000	>3000	Registro tomado a las 4:30 p.m.
Puerta Vacuica	(m³/s)	2289.78	>2000	>3000	>3000	Registro tomado a las 6:15 p.m.	
Presa	Piezómetros	Estado	Estable	Estable	En observación	Inestable	Valor esperado con relación a la variación del nivel del embalse.
	Celdas de presión	Estado	Estable	Estable	En observación	Inestable	Valor esperado relacionado al empuje relacionado por la variación del nivel del embalse.
	Aserranieretas	Estado	Estable	Estable	En observación	Inestable	No se presentan novedades.
	Nivel de Embalse	(mm)	-467.49	>421	>421 - >432.5	>433.0	El nivel del embalse disminuyó -0.01 m en las últimas 12 horas.
	Infiltraciones Zona prioritaria	(l/d)	8.13	>79	>79 - >100	>100	Este dato corresponde al total de las infiltraciones registradas en los frentes de la Presa, asociadas a cuatro franjas diferentes.
	Infiltraciones Margen Derecha	(l/d)	25.02	>121	>121 - >407	>407	La totalidad del agua infiltrada en el acrílico derecho se aferra en la Galería 289_540. Se reporta el dato del 18/11/19.
	Infiltraciones Margen Izquierda	(l/d)	64.52	>128	>128 - >219	>219	El valor corresponde a la suma de las infiltraciones que se presentan en las galerías 250-313-391. Al 250 presenta aumento por fuga de agua en tubería instalada sobre el hastal.
Deslizamientos	Volumen de desplazamiento talud captación	(m³)	0	>250 000 m³	>250 000 m³	>400 000 m³	Se presenta tendencia lineal en 1 pixel en la zona A1. Suma con velocidad cercana a 0.74 mm/d. Registro tomado a las 04:00 p.m.
	Volumen de desplazamiento talud cercano a vertederos	(m³)	0	>250 000 m³	>250 000 m³	>400 000 m³	Deformaciones no significativas. Registro tomado a las 04:00 p.m.
	Volumen de desplazamiento portal descargas	(m³)	0	>250 000 m³	>250 000 m³	>400 000 m³	Se presenta tendencia lineal en 3 pixels en la zona B2 con velocidad cercana a 0.58 mm/d. Registro tomado a las 04:00 p.m.
Movilidad Túnel Vial km 3.2	Deformación de la Sección	Estado	Estable	Estable	En Observación	Inestable	No se presentan novedades, vía habilitada.

Figura n.º 1. Sistema de alerta temprana: niveles de monitoreo y alerta.

El IAP entiende que el sistema de alerta temprana de la figura n.º 1 es el resultado de un análisis de riesgos más amplio realizado por el Diseñador y otras partes técnicas, que por supuesto añade valor al sistema. Dicho esto, el IAP ofrece las siguientes sugerencias para mejorar el sistema en términos de efectividad y comunicación con las partes interesadas.

- La descarga del aliviadero debe añadirse al nivel de alerta porque, si bien un valor de descarga puede ser perfectamente seguro para la represa, podría tener consecuencias significativas corriente abajo. En función de los otros valores de descarga indicados como umbrales, EPM puede considerar, y adaptar según sea necesario, los siguientes límites:

Nivel de alerta	Normal	Amarillo	Rojo
Vertimiento (m³/s)	< 2000	> 2000; < 3000	> 3000

- En el caso de “Deslizamientos”, el sistema de alertas tempranas utiliza como indicadores los volúmenes de potenciales movimientos de masa. Eso es aceptable, pero no constituye una alerta “temprana”. Para lograrlo, el sistema también debe incluir elementos de instrumentos clave de monitoreo (inclinómetros, extensómetros, piezómetros, celdas de presión). Como se indica para la represa, “Estable”, “En observación”, “Inestable” podrían ser las definiciones que activen los tres niveles de alerta.

1.5 Taponamiento permanente de TD2 y GAD

Ambas compuertas correderas del GAD se han cerrado con éxito y se ha realizado una derivación temporal para reducir la presión del embalse y aumentar la seguridad durante la construcción del tapón final. La situación está bajo control y el IAP espera que el tapón final se pueda construir con éxito y seguridad.

El cierre del TD2, el segundo canal de agua a ser taponado, enfrentó nuevos retrasos debido a la mala calidad de la rejilla de pilotes de acero, lo que representa el primer paso esencial en el tratamiento. EPM está actuando para mejorar la calidad del acero.

El IAP señaló que existe un plan de acción detallado para poner fin al problema. Sus características principales son:

- Adquisición de acero de mejor calidad para la rejilla de pilotes.
- Intentos de enlechar huecos en el tapón temporal mediante enlechado¹.
- Reanudación de la instalación de tuberías de acero.
- Lanzamiento de las esferas de plástico y proceder en consecuencia a la secuencia que se ha optimizado con la prueba del modelo hidráulico.

El plan incluye medidas de contingencia como la inyección de lechada, el aumento de la densidad de la rejilla de pilotes, el bombeo de la mayor parte del flujo de paso para permitir la entrada segura de la fuerza de trabajo, etc.

El IAP reconoce la complejidad de la operación y cree que, en circunstancias sin precedentes, la planificación es totalmente satisfactoria y las medidas tecnológicas que se están adoptando son apropiadas. También se cuenta con una planificación de contingencia satisfactoria para superar acontecimientos imprevistos.

1.6 Nivel de peligro corriente abajo

Las disposiciones de alerta temprana descritas anteriormente se basan en un sistema de monitoreo que funciona las 24 horas del día, los 365 días del año. El sistema controla 650 señales de instrumentación y monitoreo en tiempo real. Tres radares láser y varias cámaras de vídeo para la vigilancia remota integran el sistema. Cada sitio de trabajo cuenta con instrumentos para medir parámetros sísmicos, geotécnicos, hidráulicos y de otro tipo. Todo está unificado en el Centro de Monitoreo Técnico (CMT).

La condición de alerta para la población corriente abajo todavía está en el nivel amarillo y permanecerá así hasta que se taponen definitivamente la GAD y el DT2. El monitoreo integral proporciona la confianza de que la seguridad está bajo control. La figura n.º 2 a continuación es un ejemplo de ello. Muestra la velocidad del agua a través del DT2, en tiempo real.

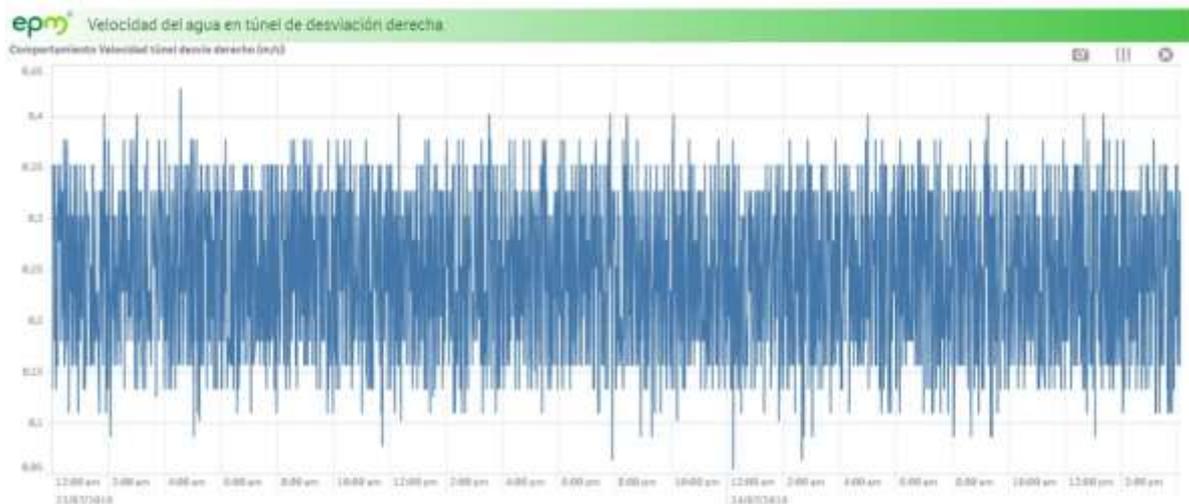


Figura n.º 2. Velocidad del agua en el túnel de desvío derecho (DT2): monitoreo en tiempo real.

Cualquier cambio en el patrón de velocidad indicaría un posible deterioro de los tapones existentes y se podrían adoptar medidas de alerta temprana.

¹ Esa lechada debe realizarse en presencia de un flujo de agua de unos 7 m³/s, lo que es indiscutiblemente muy difícil de lograr. El Diseñador lo está intentando de todos modos, y se planea el uso de tubos con mangas (*tubo manchette*) que posiblemente podrían mejorar la efectividad.

1.7 Evaluación de seguridad

La última visita del IAP al proyecto tuvo lugar en octubre de 2019. En la misión virtual de mayo de 2020, el personal del proyecto proporcionó una descripción completa de los trabajos en curso. La disponibilidad de cámaras de vídeo en tiempo real, instaladas en ubicaciones clave, ayudó significativamente a evaluar las condiciones de las obras.

Los principales aspectos relacionados con la seguridad del proyecto se pueden resumir de la siguiente manera.

- El nivel de instrumentación y monitoreo del proyecto es de última generación: todas las lecturas son automáticas, están centralizadas en la sala de control y son accesibles de forma remota.
- El rendimiento de la represa está en línea con las expectativas de diseño y la correspondencia entre el rendimiento previsto y el medido es excelente.
- Queda por definir el tratamiento de la zona por encima de los túneles de desvío.
- Un movimiento de masas está en curso, en un área alejada de las obras, y no representa una amenaza para el embalse; la zona es monitoreada para definir las intervenciones necesarias.
- El aliviadero está operando a tiempo completo, lo que supera las previsiones de diseño, y continuará así hasta que se establezca la operación de la turbina. El monitoreo de las pendientes de la piscina de inmersión no muestra ningún signo de desgaste inaceptable.
- La mayoría de las áreas subterráneas, que se vieron afectadas por el caudal incontrolado del río, han sido inspeccionadas y se han definido los trabajos de reparación necesarios. La gran cavidad entre los pozos de presión 1 y 2 se ha rellenado con éxito.
- De los trabajos restantes, requeridos para poner en marcha las unidades 1 a 4, la estabilización de la zona colapsada entre PH Cavern y Almenara 1 es el más desafiante; la experiencia adquirida en el llenado exitoso de la cavidad de los pozos 1-2 ayudará a la conducción de los trabajos.
- La parte Sur de la caverna y los canales de agua relacionados es geotécnicamente más problemática; se planean tratamientos extensivos.

En conclusión:

- A pesar de los eventos sin precedentes que impactaron el Proyecto, los trabajos implementados permiten expresar una evaluación satisfactoria de la seguridad de las obras tanto de superficie como subterráneas.
- El taponamiento del DT2 sigue siendo la actividad más urgente y EPM se concentra en eso. Una vez que el taponamiento se complete con éxito, las condiciones de seguridad para la población corriente abajo volverán a la normalidad.

2 EVALUACIÓN GEOTÉCNICA

2.1 Pozos de presión 1 a 4 (lado Norte)

Durante la visita al sitio del IAP en marzo de 2019, se había delineado preliminarmente el tamaño de la cavidad que conecta los pozos 1 y 2, y se estaban definiendo los trabajos de reparación. Se temía que el colapso hubiera creado una masa rocosa suelta e inestable en su límite. La figura n.º 3 muestra la previsión de marzo de 2019 y la cavidad ahora rellenada de forma segura.

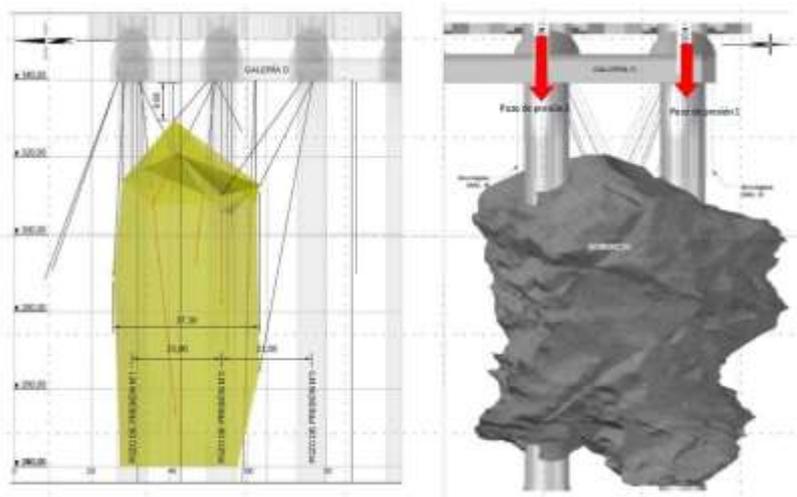


Figura n.º 3 Cavidad entre el pozo de presión 1 y 2. Previsión de marzo de 2019 (izquierda) y abril de 2020 según lo construido.

La estabilización de la cavidad y el relleno (60 000m³) se han completado con éxito. Sorprendentemente, contrariamente a las expectativas del año pasado, el macizo rocoso en los límites de la cavidad se encontró en buenas condiciones. El monitoreo no mostró signos de deformaciones notables del límite de la cavidad. El relleno actuará como elemento rigidizador y mantendrá la estabilidad a largo plazo del macizo rocoso en esta zona.

Durante las obras se han observado filtraciones mínimas y localizadas. La perforación para lechada de contacto y los orificios de control mostraron resultados satisfactorios y bajas absorciones de lechada. Se planean algunos agujeros de control adicionales.

Las partes inferiores de los pozos de presión a las unidades 1, 2, 3, 4 aún no han sido inspeccionadas. En caso de que necesiten reparaciones importantes, estas podrían afectar el plan de finalización.

2.2 Pozos de presión 5 a 8 (lado sur)

Se perforaron muchos orificios en el "macizo rocoso alterado (DRM)" por encima de los codos superiores de los pozos. La primera impresión que se tiene, en base a los valores de RQD, es que algunos núcleos indican un macizo rocoso muy alterado. El IAP opina que grandes partes de los núcleos se vieron gravemente afectadas por la acción de la barrena de perforación y por su extracción de los barriles. Muy probablemente, la calidad real del macizo rocoso es mucho mejor.

La figura n.º 4 proporciona la justificación de la opinión del IAP. La estructura del macizo rocoso (uniones y discontinuidades) es reconocible en el recuadro izquierdo. Ese no es el caso en el recuadro derecho donde las rupturas del núcleo son perpendiculares al eje del orificio perforado; esa característica caracteriza un muestreo que no es representativo de las condiciones in situ del macizo rocoso. Los núcleos en el recuadro derecho están claramente afectados

por el proceso de perforación y por la extracción de los núcleos del barril. Como tales, esos núcleos no son representativos para derivar índices de calidad del macizo rocoso.



Figura n.º 4. Núcleo representativo (izquierda) y no representativo (derecha).

Se ha realizado una extensa campaña de perforaciones y lechadas en la zona (ver figura n.º 5). A partir de la información proporcionada, el IAP no está seguro de que existan vacíos en la parte superior de los pozos. En la parte inferior de los pozos, se informa que existen vacíos, pero los datos de los orificios perforados examinados no permiten confirmarlo. En cualquier caso, la información recopilada debe ser adecuada para una caracterización detallada del macizo rocoso.

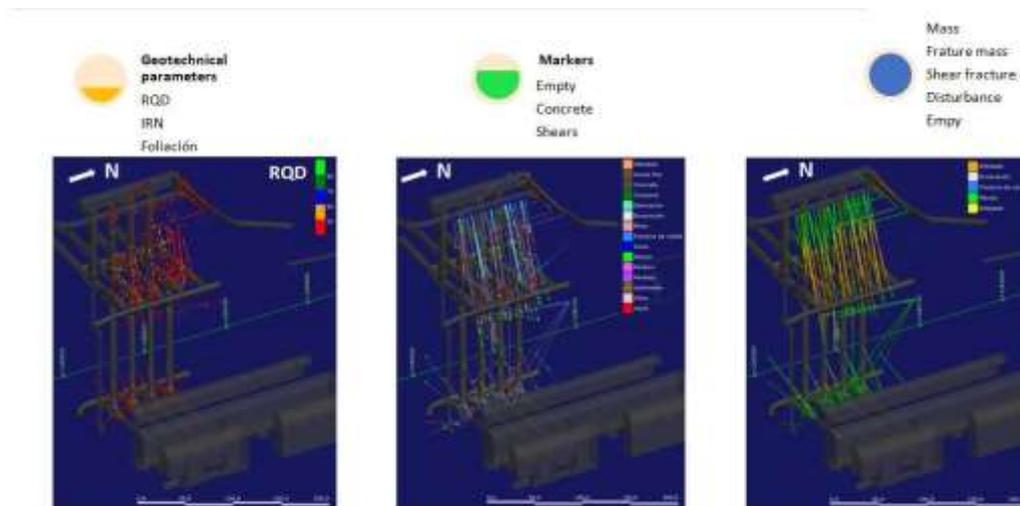


Figura n.º 5. Campaña de exploración zona Sur. Pozos 5 a 8.

El IAP recomienda preparar una clasificación por zonas del macizo rocoso, teniendo debidamente en cuenta la fiabilidad de los núcleos. El método GSI podría utilizarse para ese propósito. El diseño de los trabajos de rehabilitación debe basarse en los defectos reales del macizo rocoso (juntas abiertas, zonas de corte, roca suelta, cavidades, etc.) y los posibles mecanismos de falla asociados.

En términos de tratamiento del macizo rocoso, sin duda se prevé la lechada de consolidación. Según las fotos de los núcleos del orificio perforado, el macizo rocoso es apropiado para la inyección de lechada.

2.3 Complejo de cavernas de la sala de máquinas

A pesar de la disipación de energía extremadamente alta e incontrolada que se produjo bajo tierra, durante mucho tiempo, el comportamiento general del macizo rocoso es satisfactorio. Sorprendentemente, no se ha observado ninguna falla progresiva debido a la redistribución de tensiones.

Según los datos disponibles hasta ahora, se espera que la permeabilidad del macizo rocoso sea baja. Se espera que el interior del macizo rocoso que rodea las cavernas sea estrecho. Hay una infiltración de agua insignificante en la caverna de la sala de máquinas (PH); solo en algunos puntos se han medido no más de 2 l/s. Las observaciones piezométricas son extremadamente importantes para detectar posibles conexiones hidráulicas con el embalse. El Diseñador debe considerar si se requieren más instalaciones piezométricas.

La falla principal Mellizos, que cruza la caverna de la PH en el centro, este a oeste, no parece tener caídas de roca/erosión agravadas. Alguna alteración, posiblemente asociada a la falla Mellizos, se nota solo en el canal 2.

Las principales aberturas subterráneas están completamente instrumentadas (figura n.º 6). La mayoría de los extensómetros y otros instrumentos muestran tendencias estables, lo que indica que el interior del macizo rocoso no se ve alterado.

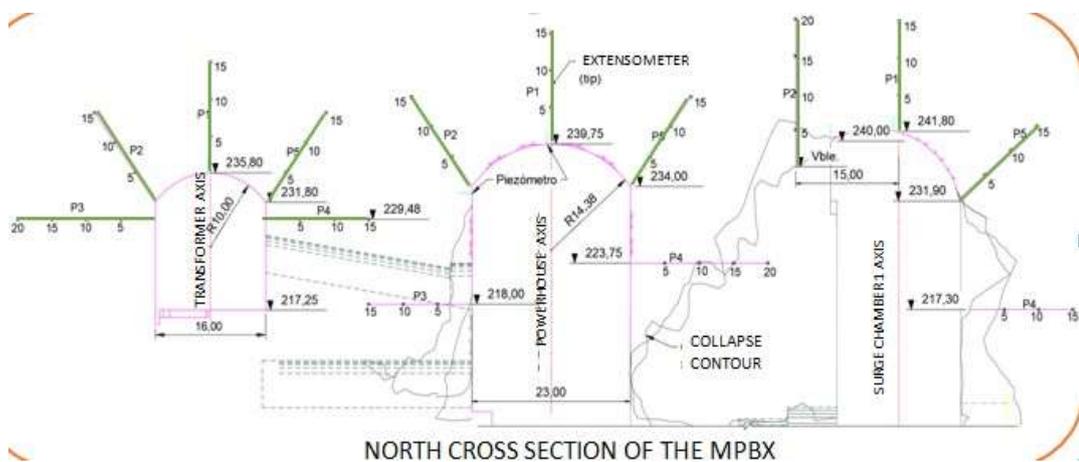


Figura n.º 6. Complejo de la sala de máquinas. Extensómetros de orificios perforados multipunto.

En pocos lugares se han registrado ligeras deformaciones. Según se informa, los mayores desplazamientos (5 mm) se han registrado en lugares específicos donde se llevaron a cabo intervenciones importantes. Eso es evidente a partir de la línea naranja en la figura n.º 7.

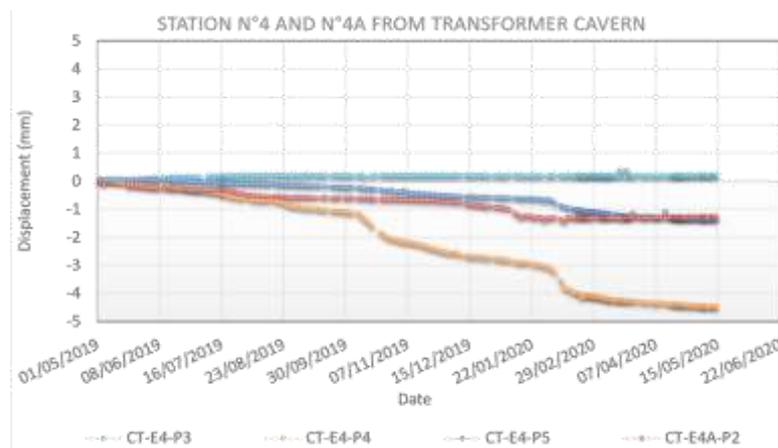


Figura n.º 7. Lectura del extensómetro de orificio perforado multipunto, donde algún desplazamiento alcanzó los 5 mm.

Tales movimientos, aunque pequeños, van más allá del nivel de precisión del instrumento, por lo tanto, se debe adoptar una mayor frecuencia de monitoreo en caso de que esos desplazamientos no muestren signos de estabilización. Obviamente, el monitoreo debe continuar en todas partes.

La caverna Transformers está completamente mapeada y estabilizada en su mayor parte. El lado norte de la caverna PH se ha estabilizado. La principal actividad en curso es el tratamiento y relleno de la gran zona colapsada (40 000m³) entre la caverna PH y la cámara de compensación (Almenara) 1.

El Consultor ha realizado cálculos de falla de cuña estructural y análisis numérico de tensiones del complejo PH. Los extractos representativos se muestran en la figura n.º 8 y la figura n.º 9, respectivamente.

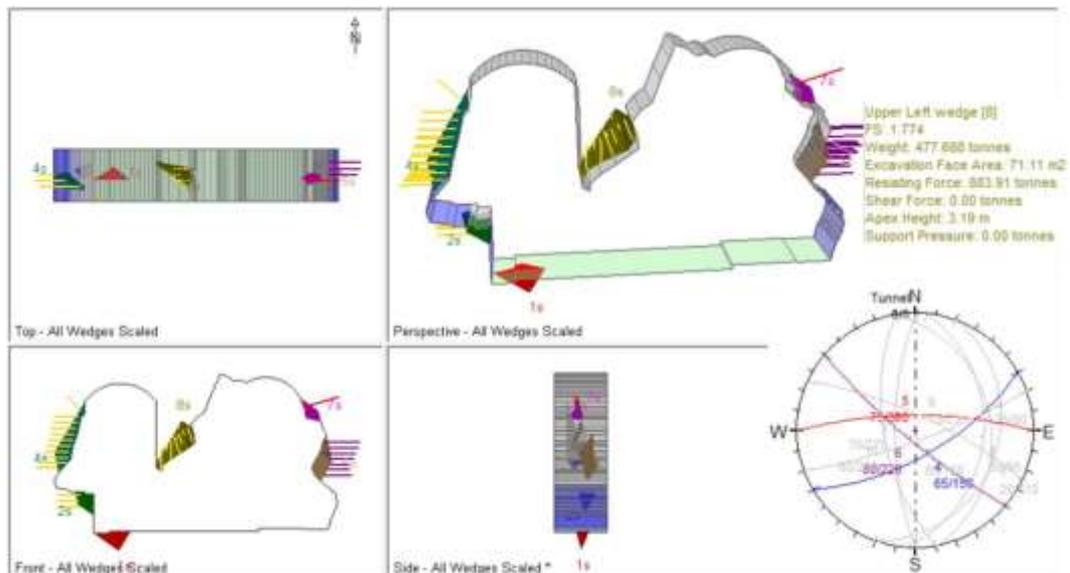


Figura n.º 8. Análisis de cuñas del complejo PH.

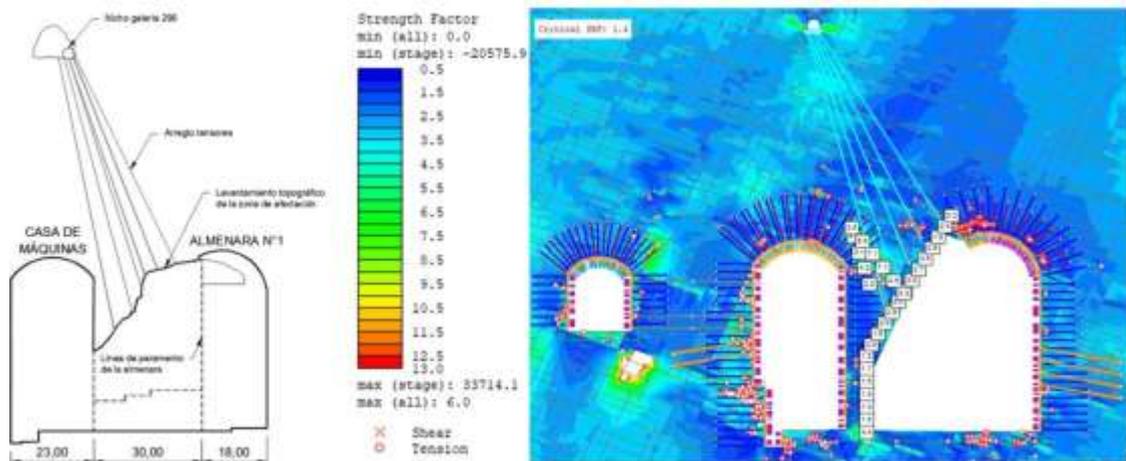


Figura n.º 9. Análisis de tensión del complejo PH.

Los análisis modelan la geometría actual de las excavaciones y las medidas de soporte/refuerzo aplicadas dentro de un macizo rocoso articulado. Los factores de seguridad resultantes son satisfactorios. Para evaluar los resultados de este análisis, el IAP desea revisar los supuestos básicos, con especial referencia a los temas enumerados en la siguiente tabla.

Parámetros del macizo rocoso (resistencia y deformación) asumidos en el modelo.

Patrón y resistencia de la junta, estructura de la roca y resistencia en la zona adyacente a las aberturas y alejada de ellas.
Las hipótesis relativas al factor de alteración cerca de las paredes alteradas de la abertura son muy importantes, especialmente alrededor de la zona derrumbada y dentro del delgado pilar entre la sala de máquinas y Almenara n°1.
Estadificación del análisis numérico. Descripción de las etapas desde las condiciones iniciales hasta la fase final de modelización.
Modelización de las medidas de apoyo en el momento de los eventos de falla.
Proceso de factor de reducción de fuerza. Descripción del mecanismo de falla crítica según los resultados del modelo, suposición de respuesta elástica o plástica de soporte, consideración de la estimación del SRF para etapas anteriores a la final para investigar posibles etapas intermedias del proceso de rehabilitación con menores niveles de seguridad.
Tratamiento/medidas de refuerzo postuladas en la parte más baja y delgada del pilar entre la sala de máquinas y Almenara n.º 1 (ver figura n.º 9).
Supuestos de escala de cuña.

El diseño de rehabilitación prevé la reconstrucción de las Almenaras con rellenos de hormigón, tras el refuerzo del macizo rocoso. El relleno será particularmente masivo en el caso de Almenara 1 y la acumulación de presiones de agua podría ser desestabilizadora, especialmente teniendo en cuenta las oscilaciones en la cámara de compensación. El IAP recomienda que el Diseñador evalúe la necesidad de orificios de drenaje: la figura n.º 10 muestra un diseño teórico.

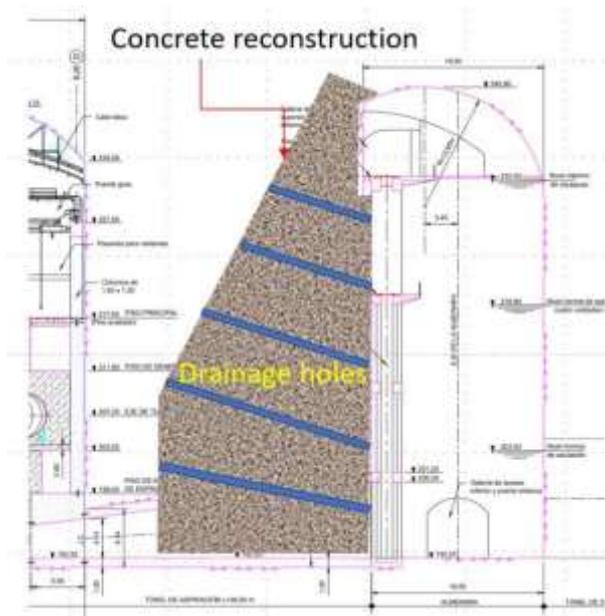


Figura n.º 10 Drenaje a reconstrucción masiva de hormigón de Almenara 1.

Como indican los sondeos perforados en la zona, la zona Sur del complejo de cavernas es geotécnicamente más problemática. El macizo rocoso es más articulado y menos homogéneo en comparación con la zona Norte (unidades 1 a 4). Se planean extensos tratamientos de inyección de lechada. Se esperan algunos vacíos en la zona entre las galerías de construcción, la sala de máquinas y Almenara 2.

Los túneles de fuga están en condiciones bastante buenas.

El complejo subterráneo presenta un laberinto de galerías temporales y permanentes, algunas de las cuales pueden inducir gradientes hidráulicos hacia aberturas permanentes. Es necesario contar con un plan de taponamiento para poder planificar cuidadosamente

los trabajos de taponamiento, revestimiento y lechada. La gestión del riesgo asociado a la carga del embalse debe informar el Plan para evitar la fracturación hidráulica, el taponamiento del drenaje, el daño a los revestimientos permanentes, etc.

2.4 Galería de descarga intermedia (IDG)

Las dificultades para abrir la entrada de la IDG, a una presión de agua de más de 140 m, han llevado a la decisión de desconectar el agua de las elevaciones más altas, a lo largo de los canales de agua de la entrada de alimentación.

De acuerdo con un prudente criterio de ingeniería, el Diseñador no está a favor de la opción original de hundir un pozo entre los conductos de alimentación 3 y 4.

El IAP cree que la actitud no está necesariamente respaldada por datos empíricos (permeabilidad, niveles piezométricos, contacto directo con el embalse), pero aprecia el enfoque de precaución. Además, el Diseñador puede recomendar piezómetros adicionales para señalar el aumento potencial de gradientes hidráulicos entre el embalse y los canales de agua.

Dicho esto, el IAP aprecia que los argumentos de programación son fundamentales para llegar a una elección informada entre las alternativas contempladas. Por ejemplo, la opción 7 requeriría un estudio hidráulico detallado de las entradas de los pozos de alimentación, el material de acero se adquirirá pronto, la "ramificación" se debe instalar al mismo tiempo que la tubería forzada, y se necesitaría una abertura de gran envergadura para ensamblar la rama de acero.

Según lo anterior, el IAP está a favor de la opción 5. En las partes de tunelización de la IDG, donde se encuentra roca débil, será esencial instalar un revestimiento circular completo.

El IAP señala que, durante la vida del proyecto, podría ser valioso lavar los sedimentos en la zona de las entradas y prolongar la vida del proyecto. A tal efecto, podrá reconsiderarse la necesidad de abrir la entrada de la IDG a 260 m, durante la vida del Proyecto. La planificación debe basarse en estudios batimétricos. Antes de su próxima visita, el IAP desea revisar los estudios realizados hasta la fecha.

2.5 Represa

El sistema de monitoreo revela una respuesta convincente del cuerpo de la represa, en términos de deformación y tendencias de filtración.

Los asentamientos son posiblemente más bajos de lo esperado, especialmente teniendo en cuenta la prisa con la que se tuvo que completar la parte superior del dique. Los asentamientos son muy pequeños en comparación con otras represas de este tipo y altura. La tasa de asentamiento es actualmente 0,1-0,2 mm por día, que es satisfactoria.

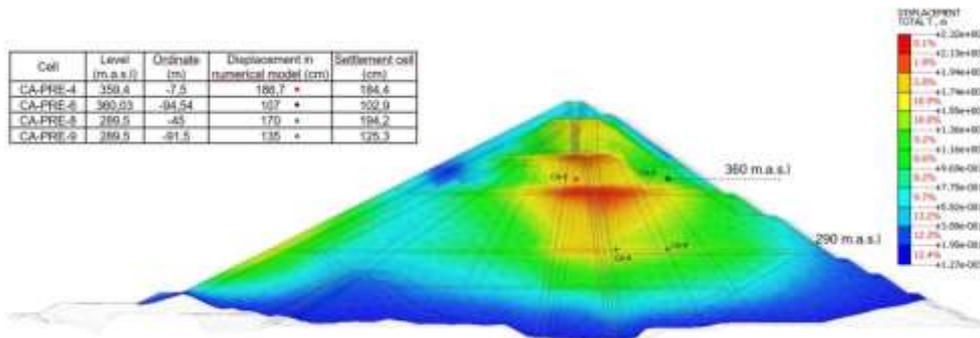


Figura n.º 11. Celdas de asentamiento (calibración del modelo numérico) - Abcisa 480.

El comportamiento de la cortina de lechada es satisfactorio. El IAP desea revisar los datos piezométricos corriente abajo de la cortina y los registros de drenaje.

Los resultados de los trabajos de lechada, que han alcanzado un avance del 90 %, son satisfactorios. Durante la visita del IAP de septiembre de 2019, las fugas en el lado izquierdo ascendieron a 170 l/seg en el nivel de la galería baja. Actualmente, se han reducido a 32 l/seg. Son aún más bajos en el lado central y derecho.

El comportamiento del núcleo y de la zona plástica es satisfactorio. La filtración a través de la parte superior de la represa es de aproximadamente 6 l/seg solamente. El efecto positivo de la pared del diafragma es evidente. El área ha sido designada como "dique prioritario" porque su construcción tuvo que acelerarse, con un trazado de diseño modificado, durante la emergencia de 2018. Dado el rendimiento observado, esa área debe considerarse "relleno definitivo".

Como se muestra en las figuras n.º 12 y 23, existe una correspondencia particularmente buena entre los valores calculados y medidos de las deformaciones y los niveles piezométricos.

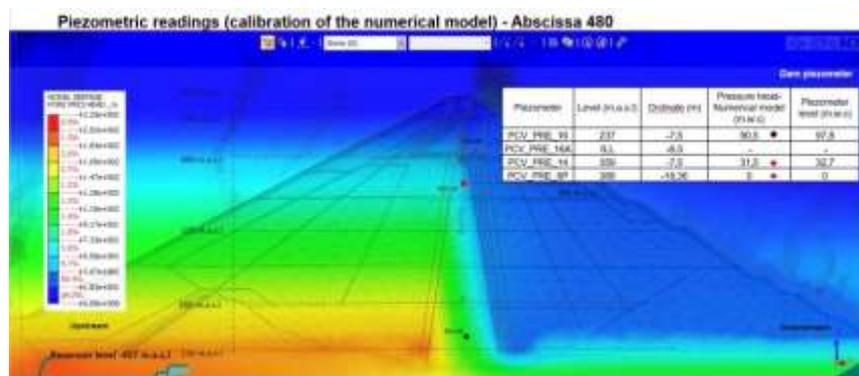


Figura n.º 12. Lecturas piezométricas (calibración del modelo numérico) - Abcisa 480.

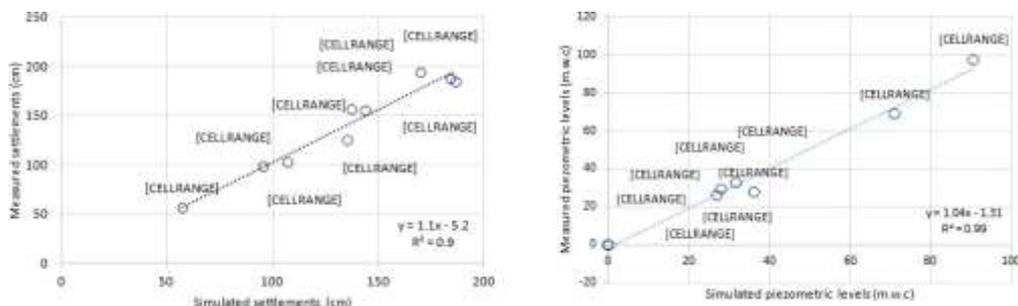


Figura n.º 13. Modelo numérico vs. lecturas de los instrumentos - Calibración.

2.6 Piscina del aliviadero

El retraso en la entrada en funcionamiento de la central eléctrica obliga al aliviadero a funcionar de forma continua.

Con caudales inferiores a 1000 m³/s, el chorro de agua incidiría en las pendientes rocosas. Para evitar esa condición desfavorable, los flujos bajos se descargan a través de la rampa estrecha en el lado izquierdo del aliviadero. La medida está funcionando bien. EPM reconoce la necesidad de sellar las conexiones a nivel del suelo entre la rampa lateral izquierda y la principal, y se están tomando las medidas adecuadas.

La geometría de la piscina de inmersión está diseñada para funcionar durante la vida del proyecto, y no hay evidencia de que se desarrollen condiciones anormales. La estabilidad general no muestra signos evidentes de preocupación. Sin embargo, como ya se mencionó en el segundo informe del panel, las pendientes sobre el área de la piscina de inmersión están saturadas por la niebla y sufren tensiones en la base. Esto ya ha causado algunos fallos menores, que inevitablemente progresarán con el tiempo. Esta es una condición esperada para este tipo de diseño de disipación de energía. El IAP está de acuerdo con el programa de monitoreo de las pendientes y alrededores de la piscina de inmersión, que debe ser permanente.

Para evaluar los posibles efectos que podrían sufrir las pendientes, se están realizando análisis de erosionabilidad y estabilidad geotécnica. Se basan en la energía del chorro de agua y las propiedades geotécnicas del macizo encontradas durante la excavación. El IAP está de acuerdo con los resultados de este análisis. A partir de los datos existentes, el macizo rocoso en la piscina es sólido con pocas discontinuidades principales.

Cuando, con la operación de la turbina, sea posible el acceso, se realizará una evaluación exhaustiva y evaluar la oportunidad de excavar previamente partes de la piscina.

2.7 Estabilidad de la pendiente del estribo derecho

La instrumentación muestra un rendimiento general satisfactorio de la pendiente sobre la plataforma de las entradas de alimentación.

Los análisis estáticos de las superficies deslizantes locales (superficiales) y globales (más profundas) indican factores aceptables de seguridad. Los parámetros de resistencia utilizados (figura n.º 14) son más bien conservadores. Las condiciones del agua subterránea aparecen diferentes en las dos secciones transversales adyacentes presentadas al IAP (figura n.º 15). En la sección A, la supuesta napa subterránea está bastante cerca de la superficie. Sin duda, una suposición conservadora, dado el nivel de agua subterránea observado en la sección del sitio 7, ligeramente al norte. En la sección B, no se ve la napa subterránea.

Material	Color	Densidad (kN/m ³)	Criterio	Cohesión (kN/m ²)	Phi (°)	UCS (MN/m ²)	GSI
Qv		18	Mohr-Coulomb	20 +/-5	30 +/-10	-	-
IIA Fracturado		23	Hoek-Brown	-	-	40	25
IIA		24	Hoek-Brown	-	-	70 +/-10	48 +/-12
IIB		26	Hoek-Brown	-	-	80 +/-10	50 +/-12
Cizalla		16	Mohr-Coulomb	10	25	-	-

Figura n.º 14. Análisis de estabilidad – Parámetros geotécnicos.

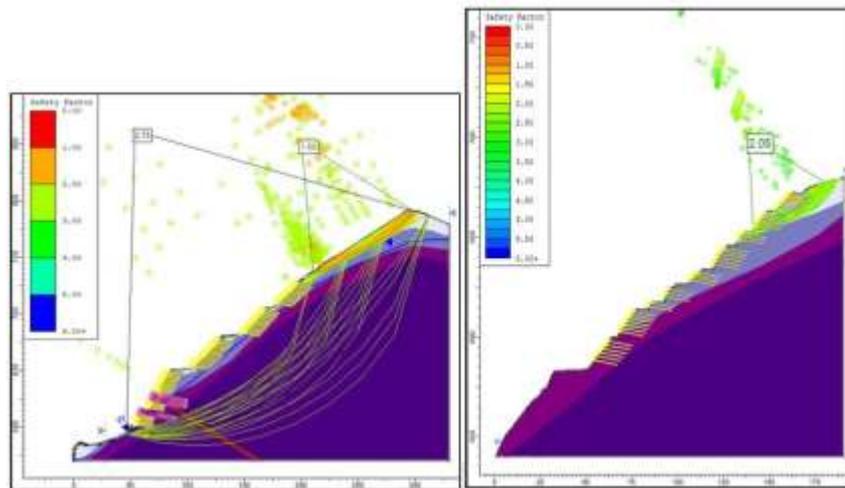


Figura n.º 15. Análisis de estabilidad de pendientes estáticas. Izquierda: Sección transversal A. Derecha: Sección transversal B.

Han aparecido algunas grietas en las partes superiores de la pendiente. De estas, las grietas en la Zona 1 no necesariamente concuerdan con los resultados de los cálculos de estabilidad y puede ser necesario reconsiderarlas al modelar la pendiente (por ejemplo, grietas de tensión).



Figura n.º 16. Entradas de alimentación - Grietas localizadas en la parte superior de las pendientes.

Las otras grietas son generalmente fisuras localizadas en el hormigón proyectado, que muy probablemente están asociadas con ligeros cambios en el deterioro del macizo rocoso, límites/discontinuidad del tratamiento del hormigón proyectado y los consiguientes movimientos diferenciales. Obviamente, los orificios de drenaje en el hormigón proyectado son una medida apropiada y probablemente habrá que aumentar su número.

El tratamiento del sumidero Romerito será el siguiente paso; el drenaje superficial, el refuerzo del borde de la cavidad y el relleno posterior se encuentran entre las medidas consideradas.

La efectividad de la galería de drenaje ejecutada en el lado de la pendiente norte no está clara para el IAP. Al parecer, es en relación a las pendientes del Sitio 7, en el margen Norte de los tratamientos de Romerito. Además, la galería se encuentra por encima de la napa subterránea evaluada. La napa subterránea en posición elevada, arriba, parece insignificante. De todos modos, el drenaje siempre es útil en la estabilidad de las pendientes y el IAP no tiene recomendaciones específicas.

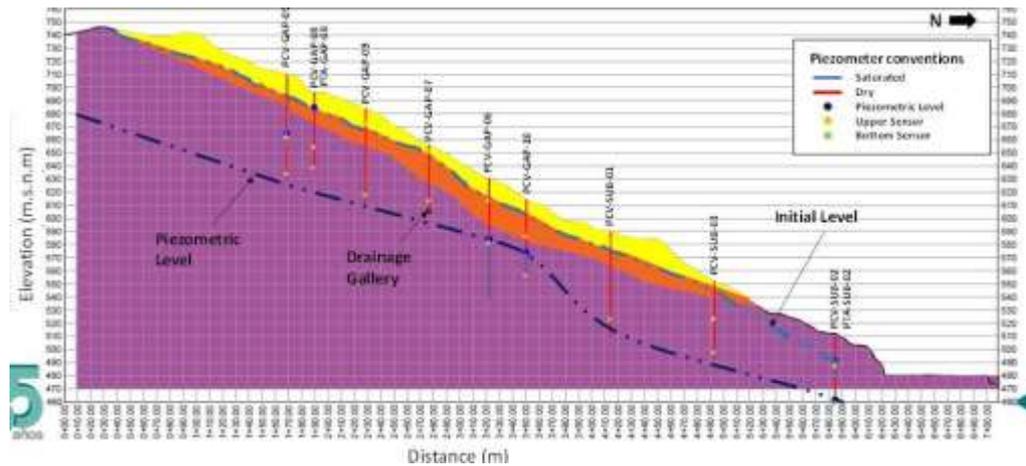


Figura n.º 17. Galería de drenaje - Piezómetros. Sitio 7

Las mediciones del inclinómetro en el área, indican un patrón de desplazamientos (figura n.º 18) que no corresponde a una superficie deslizante reconocible a ningún nivel. No se observan cambios bruscos de pendiente a lo largo de las alineaciones del inclinómetro. Lo más probable es que los movimientos registrados sean el resultado de un ajuste incompleto o defectuoso del tubo del inclinómetro en los orificios de perforación.

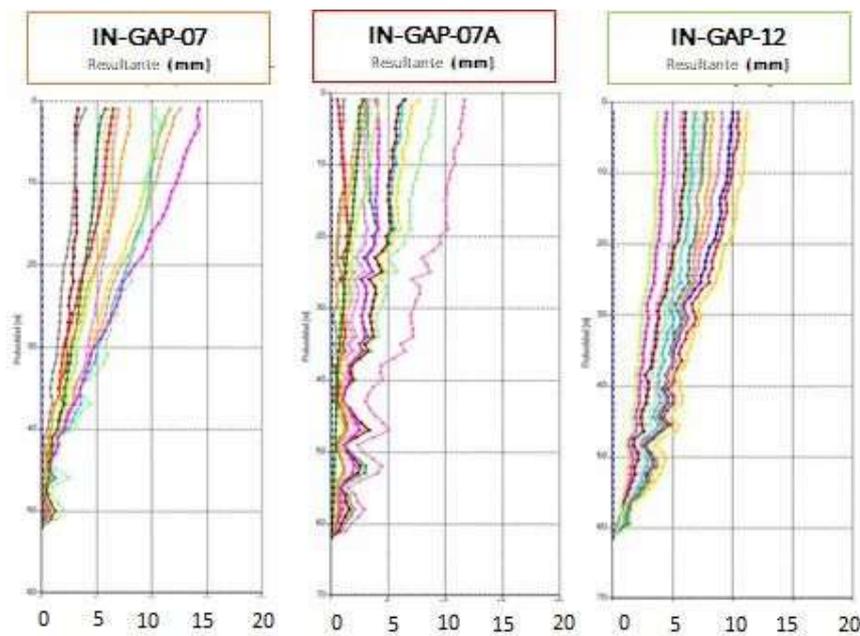


Figura n.º 18. Lecturas del inclinómetro en la pendiente sobre la plataforma de compuertas. Las curvas no evidencian ninguna deformación o ruptura del tubo del inclinómetro.

2.8 La pendiente más corriente arriba al sur de Romerito

EPM informó que, después de que se completen los trabajos de tratamiento en el área de Romerito, se reevaluará el diseño de los trabajos de estabilización de pendientes en las áreas corriente arriba del sur. La evidencia actual es que esta área corriente arriba no muestra ninguna evolución retro o lateral.



Figura n.º 19. El área desestabilizada por encima de los dos túneles de desvío. En el extremo superior, las pendientes de Romerito, antes de la remodelación y el tratamiento.

El problema se ha planteado en todos los informes del IAP. Una pendiente en esas condiciones no puede dejarse sin tratar. Está demasiado cerca de la represa, y no podemos excluir la posibilidad de completar la IDG o incluso añadir un MLO durante la vida del Proyecto.

2.9 Otras características de estabilidad de pendientes

En la pendiente izquierda del embalse, cerca del sitio de la represa, se produjeron dos inestabilidades, una en 0+900 a 1+290 y la segunda en 2+255 (figura n.º 20). El primer caso afecta a la carretera alternativa. El IAP no ha intervenido en estos deslizamientos ni ha visitado los lugares.

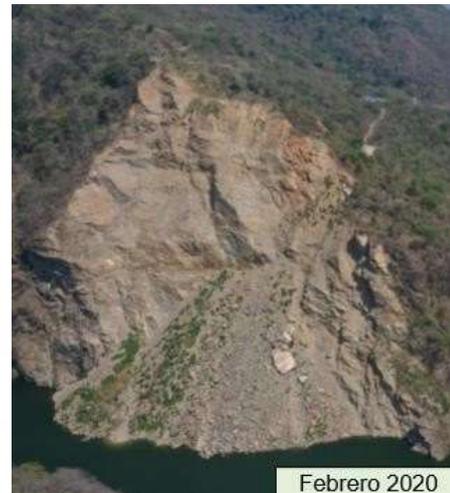


Figura n.º 20. Inestabilidades cerca del complejo del proyecto, a la izquierda, sobre el embalse, izquierda, a 0+900 a 1+290 y derecha a 2+255.

Al observar las fotografías y las secciones, el desprendimiento de 0+900 a 1+290 es claramente rotacional. La roca es probablemente la zona erosionada y alterada de la parte superior de la formación de gneis. La superficie de la pendiente, como se muestra, no es profunda. El refuerzo de la pendiente con anclajes se considera razonable para la protección de la carretera. Debe considerarse el drenaje superficial, con desagües de aguas de captación y, posiblemente, agujeros de drenaje en las pendientes. Observaciones más detalladas requerirían una visita al sitio y la revisión del análisis de estabilidad.

En su Informe de abril de 2019, el IAP comentó las condiciones de estabilidad de la pendiente sobre el borde de embalse. El IAP no fue informado de nuevos eventos que requieran la actualización de las observaciones de abril de 2019, que se recuerdan brevemente a continuación.

"No se reconocieron características geomorfológicas que denotaran grandes deslizamientos de tierra antiguos. Las características hidrográficas también son alentadoras. En general, las pendientes exhiben configuraciones generales estables. En la parte corriente arriba, las pendientes de la cuenca presentan formas erosionadas. Estas formas indican un fondo estable en términos de retención de pendientes. No pueden generar deslizamientos de tierra significativos. La erosión se reduce en la parte corriente abajo de la cuenca, probablemente debido a la dureza del lecho rocoso. Una vez más, no se detecta ninguna característica de movimientos de masas a gran escala.

En algunos lugares se observan deslizamientos de tierra de tamaño reducido y pequeña escala, rotacionales o planares, y pueden generarse otros nuevos por el funcionamiento/las fluctuaciones del embalse. No pueden generar olas de preocupación.

Los estudios existentes insinuaban la posibilidad de un antiguo megadesprendimiento, a 50 km corriente arriba del sitio de la represa, en el lado izquierdo del embalse (megadesprendimiento "Guasimo"). No se observaron evidencias contundentes en la geomorfología y características de la zona. No hay una morfología bien definida de una antigua escarpa desde donde podría haberse originado el desprendimiento de tierra. Existe una fuerte erosión que denota la estabilidad general de esa área de escarpa. El tamaño de la masa cuesta abajo que se supone que se ha deslizado, no es compatible con la morfología cuesta arriba. Toda el área se caracteriza por la erosión persistente".

3 EQUIPOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS

3.1 Equipos instalados en el complejo de cavernas

Durante la misión virtual de mayo de 2020, el IAP pudo observar, mediante cámaras remotas, las condiciones y las actividades en curso en las siguientes áreas:

- Cámaras del pozo norte (la misma cámara del pozo norte y la cámara del pozo sur se visitaron en septiembre de 2019).
- La caverna de la sala de máquinas principalmente en su parte norte (la misma parte fue inspeccionada físicamente en septiembre de 2019 mientras que la parte sur estaba en ese momento llena de escombros).
- Galerías de transformadores y cables (ambas muy visitadas en septiembre de 2019).

Una evaluación completa de los daños a la mayoría de los equipos electromecánicos ya estaba disponible en septiembre de 2019 y se confirmó durante la misión virtual de mayo de 2020.

Todos los equipos ya instalados, incluidas las partes mecánicas incrustadas en hormigón en el área norte de la sala de máquinas, ahora se consideran inadecuados para su futura operación. Esta evaluación también se aplica a los transformadores monofásicos elevadores y a los cables de alta tensión, los únicos componentes para los que no se descartó en principio una posible recuperación.

Sus daños físicos y funcionales no fueron drásticos. Sin embargo, un estudio conjunto entre EPM y las Aseguradoras decidió un reemplazo completo, principalmente al coste de las Aseguradoras; la respuesta de los Seguros fue positiva y EPM privilegió un enfoque conservador.

Esta decisión parece rentable y arriesgada para EPM y, en estas condiciones, cuenta con el pleno apoyo del IAP. Además, hay que añadir que el fabricante de transformadores (SIEMENS) no habría extendido una garantía para ningún equipo si no se hubiera reemplazado completamente.

Los tanques de aceite del transformador no se vieron afectados y varias evaluaciones de EPM no informaron ninguna pérdida de aceite (ver figura n.º 21). Posteriormente, se retiró el aceite de los tanques del transformador y se eliminó adecuadamente.



Figura n.º 21. Transformador monofásico [archivo].

En el momento de la visita virtual de mayo de 2020, los transformadores todavía estaban en su lugar. Las actividades de la empresa que los compró como material de desecho están en suspenso debido a la pandemia de COVID-19; sin embargo, un equipo de 60 personas de EPM está trabajando para desmontar los transformadores.

EPM tiene en sus almacenes 6 de los 25 transformadores monofásicos del suministro original, que son suficientes para las dos primeras unidades. Los otros 19 ya están adquiridos y su cronograma de entrega es: 6 en el segundo semestre de 2020, 6 en el primer semestre de 2021 y 7 para el segundo semestre de 2021. Los transformadores no están en la ruta crítica.

Los 11 cables monofásicos de alta tensión ya adquiridos y su entrega al sitio se espera para finales de 2020. No están en la ruta crítica.



Figura n.º 22. Cable monofásico de alta tensión [archivo].

Las dos grúas aéreas todavía están en su lugar, pero no son adecuadas ni siquiera para la actividad temporal. Las 2 grúas aéreas nuevas de 300 toneladas ya están adquiridas; su fabricación se completará en junio de 2020 y se espera su entrega en el sitio para agosto/septiembre de 2020. Su cronograma de entrega no afectará directamente el cronograma del proyecto porque EPM está utilizando grúas móviles mientras tanto (ver figura n.º 23).



Figura n.º 23. La segunda grúa en funcionamiento en la parte sur de la sala de máquinas.

En el momento de la inundación de la sala de máquinas, el progreso de la instalación de las turbinas del lado norte estaba muy avanzado, especialmente la Unidad 4 y 3 que se iban a poner en marcha primero.

Las partes más bajas de las unidades 1 y 2 y el hormigón de primera y segunda fase correspondiente se evaluaron como completamente inadecuadas para cualquier acción correctiva. La misma evaluación se extendió a las unidades 3 y 4 a finales de 2019. Por lo tanto, la rehabilitación de las unidades 1 a 4 ha comenzado desde la primera fase de hormigón (ver figura n.º 24).



Figura n.º 24. Extracción del equipo de la Unidad 3 y 4 como material de desecho.

Como resultado de la evaluación negativa de la unidad 3 y 4, EPM decidió volver a la secuencia original para la operación comercial, procediendo secuencialmente de 1 a 4. El IAP apoya la decisión que parece más rápida en términos de logística.

La situación de las piezas empotradas y otros componentes de los tubos de tiro es la siguiente:

- Todo el suministro para la unidad 1 está disponible en el sitio.
- El suministro para las unidades 2, 3 y 4 ya está adquirido.
- Parte del suministro para las unidades 5 a 8 (PH sur) está disponible en el almacén.

La figura n.º 25 muestra el progreso de montaje de los tubos de tiro de las unidades 5 a 8, en el momento de la inundación de la sala de máquinas (verde: instalado; rojo: por instalar).

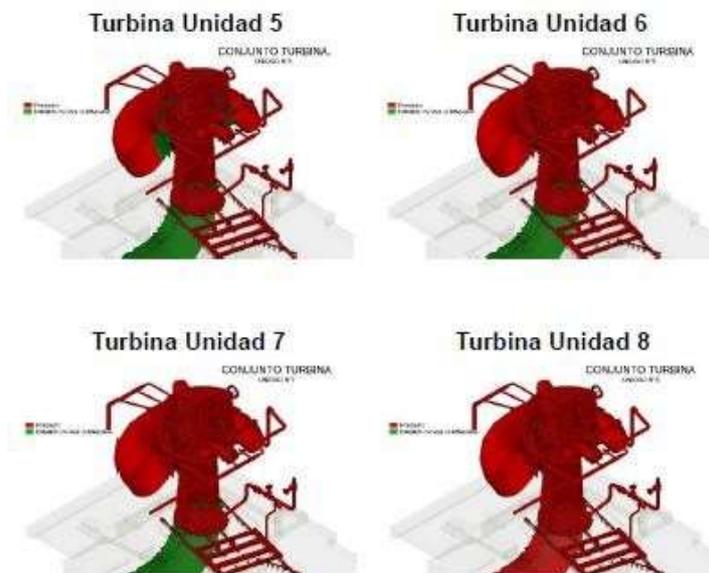


Figura n.º 25. Equipos de turbina disponibles en el almacén.

Tanto las compuertas de control de los tubos de tiro 1 a 4 como las guías de 5 y 6 se perdieron en la contingencia; se encontraron algunas partes de compuertas destruidas dentro de los túneles de fuga y desapareció todo el circuito hidráulico y su sistema de control (ver figura n.º 26).



Figura n.º 26. Ranura para la compuerta del tubo de aspiración de la unidad 5 en la cámara del pozo sur: se pierden las guías.

3.2 Resumen del proceso de evaluación

La decisión de reemplazo total de la Unidad 3 y la Unidad 4, incluyendo hormigón de primera y segunda fase y partes embebidas, básicamente completó la evaluación de los equipos electromecánicos y permitió la colocación de todos los pedidos necesarios para reconstituir todo el suministro electromecánico de Ituango. La siguiente tabla resume los pedidos.

Contrato	Alcance de las obras	Contratista	Valor
CT-2012-000039	Suministro partes afectadas de turbinas, generadores y partes empotradas de unidades 1 a 7. Servicios de instalación para las unidades 1 a 4.	GE Energías Renovaveis Ltda	USD 84 018 422,87
CT-2014-000507	Suministro e instalación de 8 tuberías forzadas. Revestimiento de acero para el pozo de liberación de agua ambiental.	ATB Riva Calzoni Spa	USD 52 795 890 (suministro) COP 111 555 549 000 (instalación)
CT-2013-00168	Sustitución de diecinueve (19) transformadores de potencia y sus equipos asociados.	Siemens Transformer Guanzhou	USD 17 031 583
CT-2015-000748	Sustitución de diez (10) cables de alimentación de 500 kV y sus equipos asociados.	Suedkabel GMBH	USD 2 820 362,60
CT-2019-001291	Suministro de 2 grúas aéreas de 300 toneladas.	Industrias Electromecanicas GH	USD 2 555 728
CT-2016-00085	Suministro de servicios auxiliares eléctricos y sistema de control para las primeras 4 unidades.	Siemens Colombia	USD 3 980 147
CT-2017-000203	Suministro de sistemas de refrigeración y drenaje.	Electrohidráulica S.A.	USD 1 576 000
CT-2017-000204	Sustitución de los sistemas de extinción de incendios de las 4 primeras unidades.	Tecnofuego S.A	USD 1 234 000
CT-2017-000205	Sustitución del sistema de climatización para las 4 primeras unidades.	CSL Larco	USD 3 916 000
Nuevo contrato	Cable de alimentación, cables de control y bandejas portacables para las primeras 4 unidades.	Por definir	USD 900 000
Nuevo contrato	Elevador inclinado para reemplazar equipos eléctricos, cable festón y estructuras metálicas.	Alimak	USD 579 000

3.3 Actualización sobre el patio de maniobras de GIS de 500 kV.

Se completó el patio de maniobras de 500 kV. Habrá que reinstalar varios cables de alta tensión y la mayoría de los cables de alimentación y control, procedentes de la sala de máquinas. La galería de cables y sus conexiones con el patio de maniobras de GIS de 500 kV se encuentran en buenas condiciones. Los trabajos de estabilización se realizaron en la pendiente por encima del área del patio de maniobras (figura n.º 27).



Figura n.º 27. Las obras de estabilización [patio de maniobras en la esquina inferior izquierda]

3.4 Equipos hidromecánicos

3.4.1 Compuertas de entrada de alimentación

Las actividades en las compuertas de entrada y sus sistemas operativos avanzan a un ritmo bajo porque no están en la ruta crítica. Las prioridades, en esta área, son los trabajos de refuerzo subterráneo y estabilización de pendientes. Las actividades se concentran actualmente en las compuertas de entrada 3 y 4, las únicas en estado "seco" porque están aisladas del embalse por tapones de hormigón (figura n.º 28, izquierda). Todas las demás compuertas están actualmente bajadas a su posición cerrada, 1 y 2 con sus dispositivos de elevación, 5, 6, 7 y 8 con grúas (figura n.º 28, derecha). Además, se están llevando a cabo actividades en las guías de las compuertas de entrada 5 y 6 para remediar las deformaciones menores sufridas por estas guías en el momento de la inundación de la sala de máquinas.



Figura n.º 28. Compuertas de entrada: izquierda, bajando la compuerta 3 en su foso utilizando una grúa temporal. Derecha: Inspección de las guías de las compuertas 5 y 6.

La siguiente tabla resume los comentarios del IAP sobre las compuertas de entrada.

Equipos hidromecánicos	Progreso de la instalación y las pruebas	Observaciones
Compuertas de entrada Compuertas corredizas de altura, 5,03 x 6,87 m, con ataguías. Funcionamiento: servomotores oleo dinámicos.	Ahora se puede acceder a la zona. Se instaló una protección física sobre el foso y la caja de control de las unidades 1 y 4.	Las compuertas se cierran en condiciones de presión equilibrada y, en caso de emergencia, bajo la carga hidráulica máxima y el flujo nominal de la unidad. Sin embargo, se demostró su capacidad para cerrar bajo flujo más alto que el nominal.

3.4.2 Revestimiento de acero de los pozos verticales

El diseño original preveía el forro de acero solo en la sección horizontal entre el codo inferior y la caja en espiral de las unidades. Dada la gran cavidad en el área de los pozos de presión 1 y 2, se debe suponer que el macizo rocoso había perdido su capacidad de colaborar con el revestimiento para soportar las presiones internas. El IAP recomendó la adopción de un revestimiento de acero autoportante y dúctil. EPM actuó con rapidez, para evitar retrasos de programación en la puesta en marcha de la primera y firmó el contrato correspondiente en 2019. La figura n.º 29 muestra: (izquierda) la construcción del almacén para la fabricación de los segmentos de la tubería forzada y (derecha) el elevador de cable que se baja en el área de los pozos 1 y 2.



Figura n.º 29. Izquierda: área de montaje de las tuberías forzadas. Derecha: pozos 1 y 2, instalación de revestimiento de acero.

3.4.3 Compuertas de la GAD

Las dos compuertas correderas verticales de la GAD se han bajado con éxito. Se ha instalado una tubería de derivación para aliviar la presión del embalse en las compuertas, para aumentar la seguridad cuando se construya el taponamiento permanente a la GAD y DT2. La derivación temporal se enruta a través del IDG (ver figura n.º 30).

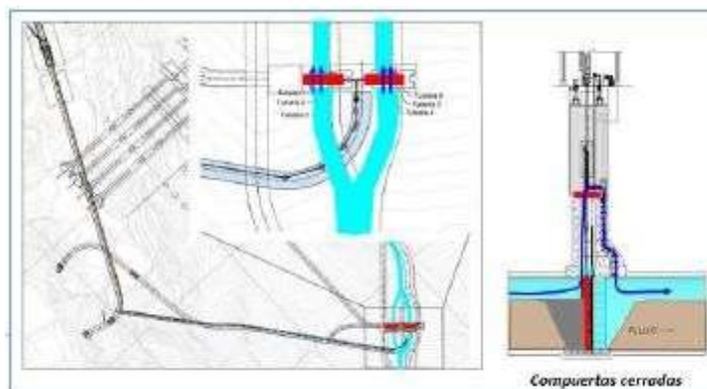


Figura n.º 30. Compuertas de la GAD en su posición final con sistema de derivación temporal.

EPM no informó ningún problema de O&M para el equipo ya instalado y operado. Después de conectar correctamente la GAD, se abandonará la cámara de control de la compuerta (figura n.º 31).

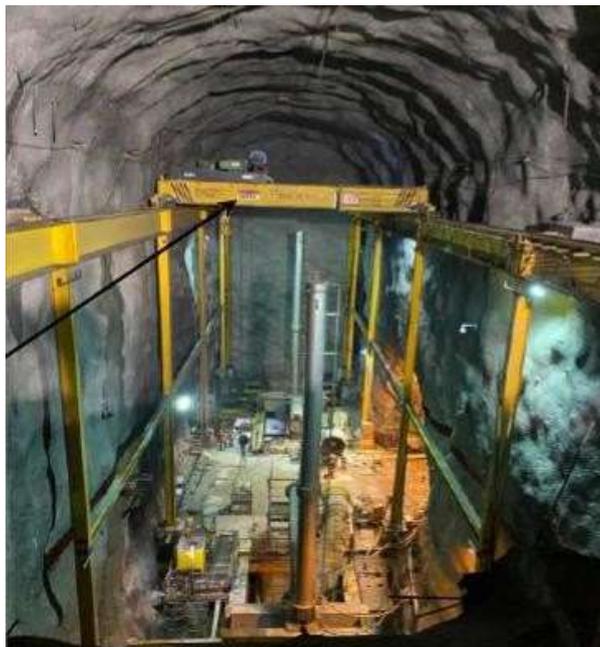


Figura n.º 31. Retirada de la grúa de la cámara de control de la GAD.

3.4.4 Aliviadero y compuertas de la IDG

La siguiente tabla resume los comentarios del IAP sobre las compuertas del aliviadero y de la IDG.

Equipos hidromecánicos	Progreso de la instalación y las pruebas	Observaciones
<p>Compuertas del aliviadero Cuatro compuertas radiales (dos con solapa para escombros) 15 m x 19,50 m Capacidad de descarga acumulada: 22 600 m³/s (PMF) Operación: servomotores oleodinámicos, control único y estaciones oleodinámicas para cada compuerta + control común</p>	<p>Ya en funcionamiento; se han completado las pruebas y el control común.</p>	<p>La posición del edificio del generador diésel. En caso de terremoto, las rocas pueden caer desde la pendiente y golpear el edificio. Se recomienda la evaluación de riesgos. Las estadísticas muestran que la confiabilidad de los generadores diésel en caso de eventos excepcionales es menor de lo esperado.</p>
<p>Compuertas de la galería de descarga intermedia Dos compuertas radiales + dos compuertas corredizas de emergencia Tamaño: 3 m x 3,90 m (compuertas radiales) Capacidad de ajuste: 750 m³/s con ambas compuertas en funcionamiento para toda elevación del embalse superior a 350 msnm Operación: servomotores oleodinámicos, control único y estaciones oleodinámicas para cada compuerta.</p>	<p>Ya en condiciones de funcionamiento; se han completado las pruebas y el control. Instalación de revestimiento de acero debidamente completada.</p>	<p>Ninguna</p>

4 FINALIZACIÓN DEL PROYECTO: CRONOGRAMA E IMPLICACIONES DE COSTES

4.1 Calendario de finalización del proyecto

El esquema que se muestra en la figura n.º 32 proporciona una instantánea del progreso de los trabajos de reparación y recuperación en el complejo de cavernas de la sala de máquinas. Se puede observar lo siguiente:

- La sala de transformación está totalmente recuperada (color verde).
- La mayoría de los canales de agua y las estructuras subterráneas asociadas con las unidades 1 y 2 han sido reparados/recuperados (verde) o en proceso de estabilización (amarillo).
- Los trabajos de recuperación pertenecientes a las unidades 3 y 4 están ligeramente por detrás de 1 y 2, porque las áreas de los tubos de tiro aún no han sido inspeccionadas (violeta).
- Los canales de agua de las unidades 5 a 8 aún no han sido inspeccionados y se están realizando reparaciones en la estructura subterránea de la parte sur de la planta.
- El tratamiento de los pozos de presión a las unidades 5 a 8 está bajo definición.

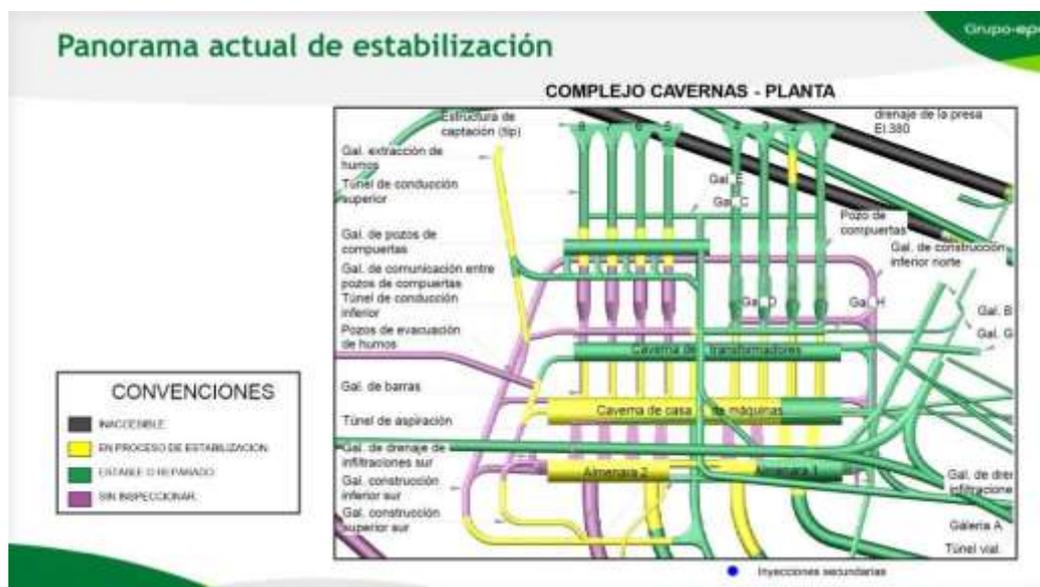


Figura n.º 32. Recuperación de obras subterráneas, descripción general del progreso a abril de 2020.

El IAP está de acuerdo con los métodos utilizados para la recuperación de las obras subterráneas pertenecientes a la parte Norte de la planta (unidades 1 a 4). El logro de la operación comercial se comenta en la siguiente sección.

La evaluación relativa a la parte Sur, unidades 5 a 8, es más difícil. El diseño de la recuperación de los pozos de presión se encuentra actualmente en fase de definición.

4.2 Logro de la operación comercial

El cronograma de EPM del 30 de marzo de 2020 incluye los siguientes hitos:

- Fecha de Operación Comercial de la Unidad 1: diciembre de 2021
- Fecha de Operación Comercial de la Unidad 2: abril de 2022
- Fecha de Operación Comercial de la Unidad 3: julio de 2022
- Fecha de Operación Comercial de la Unidad 4: octubre de 2022

El montaje, la puesta en marcha y las pruebas de la Unidad 1 pueden tardar aproximadamente 9 meses y esto dejaría suficiente tiempo para que EPM proceda con la primera y segunda fase de hormigón. El tiempo es razonable para un contratista experimentado; la decisión de eliminar totalmente todos los trabajos de hormigón aumenta la carga de trabajo pero facilita las decisiones: una situación que los contratistas experimentados siempre favorecen. Además de eso, debido a las obras de rehabilitación sin precedentes emprendidas, EPM se ha visto obligada a desarrollar una logística masiva y eficiente que permite operar en varios frentes, en paralelo, y concentrar las actividades en un área si es necesario.

Se aplican algunas otras consideraciones:

- Tener a GE Brasil directamente involucrado en el montaje de las primeras 4 unidades es una ventaja para el cronograma.
- Hay suficientes equipos de entrega a largo plazo en los almacenes para garantizar la operación comercial de la primera unidad.
- El calendario de adquisiciones no plantea grandes preocupaciones; la desaceleración de la economía en todo el mundo y pocos pedidos nuevos juegan a favor del tuango.
- La única tarea incierta es la finalización de las actividades complejas asociadas con los trabajos de entrada a las unidades 2, 3 y 4.

Con la reserva marginal del último punto, el IAP considera factible el cronograma actual a operación comercial.

4.3 Implicaciones de costes del cronograma de finalización

Se solicitó al IAP que evaluara las estimaciones de costes anteriores, lo que hizo en su primer informe de octubre de 2018. Después de eso, debido a las investigaciones en curso y los trabajos de ingeniería asociados, no se disponía de elementos suficientes para actualizar esa estimación. El progreso logrado hasta la fecha ha permitido a EPM preparar una actualización de costes para la finalización del HPP Ituango a partir de abril de 2020. Los datos se muestran en la figura n.º 33; la última columna convierte los COP en millones de dólares estadounidenses (USD).

PROYECTO ITUANGO COSTO PPTO 2020 Millones COP Corrientes																
CONCEPTO	TOTAL	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	ESTIM. 2019	2020	2021	2022	2023	2024	TOTAL (en USD)
1 Ingeniería y administración	1.829.456	123.218	79.265	161.658	167.960	126.833	184.236	183.388	205.382	234.044	238.049	80.683	59.014	47.850	39.259	476
1.1 Estudios y diseño	53.963	53.963	36	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
1.2 Interventoría	487.297	12.251	16.690	26.481	30.936	38.721	53.751	68.412	71.748	85.739	45.715	16.381	12.571	12.716	8.324	127
1.3 Asesoría	334.854	13.991	12.442	18.271	20.430	21.291	27.564	31.106	36.296	48.277	57.066	3.152	2.517	879	363	87
1.4 Auditorías	4.207	125	247	231	217	320	425	427	0	651	542	542	542	0	0	1
1.5 Pólizas	112.892	16.402	18.696	4.242	2.262	7.616	10.252	11.234	14.018	15.751	3.060	4.844	328	0	0	20
1.6 Administración	835.936	23.748	28.185	108.489	35.328	48.779	52.240	70.916	83.304	90.627	129.827	26.062	43.025	34.223	35.640	217
2 Costos directos	10.147.927	106.589	206.655	394.988	845.945	1.148.564	1.179.642	1.533.293	1.171.658	825.421	1.019.262	788.515	291.269	114.597	51.294	3.838
2.1 Infraestructura	1.888.362	146.491	272.358	290.855	280.155	215.193	170.878	194.675	88.918	83.817	37.549	30.139	13.462	0	0	460
2.2 Otros principales	5.370.606	390	67.982	253.254	400.159	460.256	721.003	900.963	940.649	838.598	822.866	263.198	143.043	82.620	8.813	1.266
2.3 Equipos	1.796.283	0	0	0	183.230	183.177	207.606	290.442	133.150	117.919	237.255	311.825	80.747	7.991	4.891	463
2.4 Gestión ambiental y social	1.062.200	9.717	18.318	47.395	101.811	175.989	79.599	89.599	125.426	113.580	127.608	83.888	42.177	23.876	25.990	279
2.5 Conexión al STN	95.448	0	0	0	0	0	0	57.848	2.518	1.507	4.774	0	0	0	0	17
3 Tierras y servidumbres	91.320	7.563	4.588	7.547	8.874	4.899	6.717	21.471	15.516	8.094	8.271	0	0	0	0	24
TOTAL INVERSIÓN	12.048.696	287.468	440.599	763.223	1.061.379	1.295.317	1.330.282	1.728.149	1.382.923	1.047.559	1.254.602	969.184	330.282	162.427	70.593	3.138
Gastos preoperativos	383.809	6.471	6.882	9.659	25.629	25.242	29.402	21.289	166.465	76.989	13.163	9.068	4.682	0	0	102
Gastos financieros	2.479.576	0	0	40.284	84.833	139.200	233.268	295.202	326.465	397.638	388.600	376.437	112.682	73.540	32.857	849
TOTAL CON GASTOS PREOPERATIVOS Y FINANCIEROS	14.942.082	293.939	447.391	813.229	1.151.231	1.444.939	1.593.163	2.044.519	1.882.463	1.242.184	1.456.367	1.254.781	467.757	235.967	103.450	3.889
IVA Descontable	325.462	0	0	0	1.480	21.940	22.500	34.803	37.914	26.863	72.612	70.825	26.866	8.217	4.074	85
TOTAL CON IVA DESCONTABLE	15.267.544	293.939	447.391	813.229	1.152.832	1.486.866	1.615.663	2.079.613	1.921.379	1.348.067	1.728.979	1.324.719	494.717	242.468	107.524	3.974

Figura n.º 33. Costes de finalización: estimación de EPM de abril de 2020.

En línea con la evaluación de octubre de 2018, los costes indirectos y financieros (*gastos preoperativos y financieros*) no se incluyen en la revisión actual. Por lo tanto, la comparación entre las estimaciones de costes de octubre de 2018 y marzo de 2020 se refiere únicamente a los costes directos.

Los costes que se muestran en la primera tabla de la figura n.º 34 a continuación se derivan de la estimación de costes de EPM de abril de 2020 y representan la suma de las partidas indicadas desde el año 2020 hasta 2024.

EPM's Apr 2020		EPM' Sep 2018			IAP's Oct 2018		
Item	Cost (MUS\$)	DETALLE INVERSIONES CONTINGENCIA	Col Pesos	USD	ITEM	min	max
Infraestructura	21	1. Obra civil	369,000.00	123	Civil works		
Obras principales	309	2. Equipos (recuperación y reemplazos)	332,750.00	111	Taponamiento túnel derecho y SAD	10	40
Equipos	170	3. Taponamiento túnel derecho y SAD	100,000.00	33	Pantalla impermeable en la presa	30	50
Gestión Ambiental y social	80	4. Pantalla impermeable en la presa	150,000.00	50	Extension of spillway slopes' treatment	25	50
Conexión a STN	1	5. Desembalse	300,000.00	100	Repairs and reinforcement to power house cavern	10	50
Tierras y servidumbres	2	TOTAL ESTIMADO EPM	1,251,750.00	417	Reservoir landslide risk mitigation	10	15
Total directos	583				Intermediate Discharge Gallery	3	5
					Steel lining to penstock elbows	10	15
					Middle level outlet (Desembalse)	100	100
					Subtotal Civil Works in USD Million	258	325
					Equipment		
					Generation Equipment	80	100
					Balance of plant	10	20
					Gates and valves	5	10
					Subtotal Equipment in USD Million	95	130
					TOTAL EQUIPMENT + CIVIL WORKS IN US MILLION	353	455

Figura n.º 34. Comparación de estimaciones de costes.

Las otras dos tablas representan, respectivamente, la estimación de EPM de septiembre de 2018 y la evaluación del IAP de octubre de 2018. En esa oportunidad, el IAP proporcionó un rango de costes. Cabe señalar que la estimación de septiembre de 2018 preveía la realización de una salida de nivel medio (*Desembalse*), que no está incluido en la estimación de abril de 2020.

La estimación de costes de septiembre de 2018 fue igual a USD 417 millones. En marzo de 2020, después de evaluar la magnitud de las reparaciones extensas a las obras subterráneas, la estimación se ha incrementado a USD 583 millones. En cuanto a las obras civiles requeridas para la puesta en marcha de las unidades 1 y 2, dos conjuntos de actividades presentan las mayores incertidumbres:

- Las partes inferiores de los pozos de presión a las unidades 1, 2, 3, 4 aún no han sido inspeccionadas. Podrían necesitar reparaciones importantes y volverse críticos en el plan de finalización.
- Completar la descarga intermedia (esencial para la autorización de ANLA) requiere el taponamiento permanente de TD2 y GAD, lo que implica actividades complejas, aún sujetas a incertidumbres significativas.

Se requieren más investigaciones y pruebas para definir en detalle las obras civiles requeridas para la puesta en marcha de las unidades 5 a 8. El IAP considera prematuro evaluar las implicaciones relativas de los costes, hasta que las investigaciones y el diseño hayan alcanzado un nivel suficiente de confiabilidad.

La estimación de marzo para el coste asociado a "Obras Principales", de 2020 a 2024, asciende a USD 309 millones (equivalente). Asignar una contingencia de USD 50 millones (alrededor del 15 % de 309) para hacer frente a necesidades imprevistas parece razonable.

En conclusión, la estimación actual de costes directos para la finalización de las obras civiles se puede asumir en el orden de USD 633 millones, es decir, aproximadamente un 50 % más que la estimación de septiembre de 2018 (USD 417 millones).

En términos de equipos y puertas EM, la comparación con la estimación de octubre de 2018 no es inmediata, porque se espera que la mayor parte de los costes adicionales corran a cargo de las compañías de seguros. En consecuencia, el coste aumentó solo en USD 17,4 millones (COP 66 818 millones).

5 RIESGO RESIDUAL DURANTE LA OPERACIÓN

5.1 Equipos de generación e hidromecánicos

Como se dijo anteriormente, todos los equipos EM afectados, junto con las piezas integradas, serán reemplazados por completo. Por lo tanto, el nivel de riesgo durante la operación puede evaluarse como si la inundación no hubiera ocurrido.

En línea con los estándares de la industria, algunos elementos de riesgo potenciales se evalúan y valoran en la siguiente tabla.

Equipos	Evaluación de riesgos	Valoración de riesgos
Compuertas del aliviadero	El movimiento diferencial de la estructura civil puede causar graves consecuencias en las compuertas radiales de los aliviaderos, sobre todo en las compuertas de grandes dimensiones.	Insignificante: debido a los buenos cimientos de roca.
Sistema de compuertas de entrada	La calidad de terminación y puesta en marcha del sistema de compuertas de entrada no fue uniforme entre las 8 entradas. Por lo tanto, se podría postular la posibilidad de un comportamiento diferente de las compuertas de entrada.	Bajo: la experiencia adquirida y el éxito logrado por EPM en el cierre de las compuertas de entrada 1 y 2, permiten considerar esto como un riesgo bajo.
Sistema de compuertas de entrada	Movimientos diferenciales de las estructuras civiles a las que se fijan las guías de las compuertas de entrada.	Mínimo: buenas cimentaciones rocosas, junto con el éxito alcanzado por EPM en la gestión de las compuertas de entrada.
Tuberías forzadas	Grietas o apertura de juntas asociadas a movimientos diferenciales.	Mínimo: el uso de revestimiento de acero ha reducido drásticamente el riesgo. Además, la adopción de acero dúctil como alternativa al acero de alta resistencia aumenta la resistencia al movimiento diferencial sin agrietarse ni limitar la propagación de la grieta.
Unidades turbogeneradoras	Teóricamente, el equipo podría verse afectado por el movimiento diferencial de las estructuras civiles.	Insignificante: dada la calidad del macizo rocoso, y el alcance de las medidas de rehabilitación ejecutadas, se pueden descartar positivamente movimientos diferenciales.

A pesar de lo que a menudo se percibe, el margen para realinear una unidad hidráulica cuyas obras civiles están sujetas a movimientos diferenciales es relativamente amplio. Mientras que la precisión de las regulaciones mecánicas, en el momento de la alineación de la unidad, es una cuestión de micras, el margen para contrarrestar los movimientos de la estructura es del orden de varios centímetros, suficiente para hacer frente a cualquier movimiento razonable. Un par de estos casos, en plantas de África, son conocidos en la industria.

5.2 Operación de turbinas en condiciones de "Velocidad sin carga"

Durante la misión virtual, se llevó a cabo una discusión sobre la posibilidad de operar la turbina en condiciones de "velocidad sin carga" (SNL). Esa operación permitiría, aunque por un tiempo limitado, implementar liberaciones de flujo ecológico cuando la planta está fuera de línea y el embalse está por debajo del nivel del aliviadero.

El IAP observa que SNL representa un uso no convencional de las unidades, siendo pertinentes las siguientes constataciones.

- Todas las turbinas están diseñadas para permanecer en funcionamiento SNL durante un tiempo relativamente corto (minutos/decenas de minutos), como un paso en el proceso de sincronización. Dependiendo del diseño, algunas turbinas pueden funcionar como reserva de centrifugado durante un período más largo. Esta posibilidad debe verificarse con los fabricantes.
- Existe una experiencia limitada en unidades operativas en condiciones "sin carga", a una velocidad de rotación superior a la síncrona, durante períodos relativamente largos. Si bien no se puede descartar la posibilidad, requeriría un cuidado extremo y debería estar respaldado por un estudio específico de los fabricantes. Se deben verificar las frecuencias de resonancia del eje y el comportamiento real del prototipo puede no ser completamente predecible en el modelo.

Según lo anterior, el IAP desalienta el recurso a la operación SNL. Diferente es el caso de la posible operación de las unidades por debajo de la elevación 390 msnm, que se discute en la sección 5.5.

Si el interés sobre SNL regresa, las siguientes consideraciones se aplican a la práctica de SNL.

- Mantener la inyección de aceite a presión en las almohadillas de los soportes de confianza incluso después de la puesta en marcha de la unidad aumenta la seguridad en el funcionamiento al garantizar el establecimiento de una película de aceite más gruesa por encima de las almohadillas. En Ituango se adopta la inyección de aceite. No se informa que esta práctica tenga ningún problema colateral.
- Cuando las unidades, como las de Ituango, están diseñadas con inyección de aire natural debajo del corredor, activada en un área seleccionada del rango de operación, a menudo es posible actualizar la inyección natural a inyección forzada. Este último tiene el beneficio de "regularizar" el flujo de agua y, en consecuencia, el funcionamiento y la vibración de la unidad. Dicho beneficio se paga con una eficiencia ligeramente menor y con el consumo adicional de las bombas del compresor de aire.

5.3 Control del embalse durante la operación del proyecto

El IAP ha tratado el tema del control del embalse, durante la operación del Proyecto, en todos sus informes, a partir de agosto de 2018. Disponer de canales de agua de capacidad suficiente para gestionar las entradas fluviales permite controlar los niveles de los embalses para lo siguiente:

- Seguridad: la parte superior del embalse debe bajarse en condiciones de emergencia (por ejemplo, después de un terremoto o para manifestaciones de erosión interna), incluso cuando no se puede confiar en la descarga a través de las turbinas.
- Mantenimiento: para acceder a las áreas de la compuerta de entrada, para mantenimiento o reparaciones extraordinarias.

Por el momento, el único canal de agua de control es el aliviadero de superficie, que no se puede utilizar para hacer descender el embalse por debajo de 401. Cuando las turbinas estén en funcionamiento, el control del embalse mejorará, y más aún cuando todas las unidades estarán disponibles para la generación.

Al mismo tiempo, puede haber situaciones, a lo largo de la vida del Proyecto, en las que se interrumpa el flujo de la turbina (sin demanda, fallo de la línea de transmisión, posterremoto, etc.). La disponibilidad de un canal de agua independiente (Salida de Nivel Medio), de capacidad hidráulica adecuada, para lograr el control del embalse sería un elemento clave en interés de la seguridad a largo plazo del HPP Ituango.

Si, Dios no lo quiera, tal contingencia ocurriera durante el transcurso de la operación, nadie se acordaría y daría importancia a los retos afrontados durante la construcción.

El IAP entiende las preocupaciones legítimas del Diseñador asociadas con las dificultades de realizar una capacidad de descarga adicional en un macizo rocoso con áreas alteradas localmente y que ya alberga varios túneles. Sin duda, el esfuerzo implicaría riesgos significativos, pero esos riesgos deben compararse con los asociados con la incapacidad de gestionar una emergencia, durante la operación, por falta de un control adecuado del embalse.

Para ayudar a EPM a tomar una decisión informada sobre el riesgo, el IAP llevó a cabo un taller demostrativo de PFMA durante la visita virtual.

5.4 El taller de PFMA

La sesión de PFMA (Análisis de modos de fallo potenciales) se llevó a cabo el 21 de mayo. Los procedimientos se informan en el Anexo B, y las conclusiones se pueden resumir de la siguiente manera.

- Integral está llevando a cabo una Evaluación de Riesgos integral del Proyecto, aplicando la técnica PFMA a un gran conjunto de posibles modos de falla. Integral confirmó que el enfoque es, en principio, el mismo que el utilizado por el IAP y que la sesión del 21 de mayo proporcionó información útil para los próximos pasos del ejercicio que Integral está llevando a cabo.
- La Probabilidad de Falla (PF) obtenida, para los dos PFM analizados el 21 de mayo, oscila entre $5 \cdot 10^{-5}$ (máximo) y $3 \cdot 10^{-6}$ (mínimo). Es deseable, para un proyecto de la importancia y el nivel de peligro del tuango, apuntar al "rango ICOLD" para PF, es decir, 10^{-6} a 10^{-5} .
- Dos medidas clave pueden lograr ese resultado:
 - Hacer funcionar las turbinas a alturas inferiores a 390 msnm.
 - Adición de una salida de nivel medio.
- La primera medida parece factible y se trata en el siguiente párrafo.
- Agregar una MLO a Ituango, aunque es muy difícil debido a la presencia del embalse, no debe abandonarse porque aumentaría notablemente la seguridad del Proyecto. En consideración de las dificultades involucradas, la construcción debe planificarse cuidadosamente y, si se confirma que es esencial, construirse durante la vida del Proyecto.
- La decisión debe estar informada sobre el riesgo, es decir, el PFMA debe repetirse, con estimaciones de probabilidad más detalladas y el rango de PF en comparación con el asociado con la construcción de una MLO. El IAP alienta a EPM e Integral a realizar el ejercicio. El IAP estará encantado de revisar el informe relativo.

En conclusión, el taller de PFMA logró el resultado previsto de aumentar la conciencia sobre la importancia primordial de un control confiable del embalse durante la operación. El PFMA también permitió identificar elementos importantes, como la posibilidad de operar las turbinas por debajo de los 390 msnm, que requieren un seguimiento serio.

5.5 La posibilidad de operar las unidades por debajo de 390 msnm

La carga operativa del embalse de Ituango, tal como se define en su diseño, está nominalmente limitado a un rango de 30 m: entre 420 y 390 msnm (figura n.º 35).



Figura n.º 35. Niveles operativos máximos normales y mínimos.

La decisión de diseño para ese rango se tomó hace mucho tiempo y sus razones parecen haberse perdido de alguna manera. El diseño del proyecto y la geología del embalse no parecen ser las razones de dicha decisión, ni la presencia de escombros flotantes puede considerarse el factor limitante.

El IAP considera que dicho rango se deriva de la simulación de la operación del embalse en el escenario que maximiza la salida de la sala de máquinas y que luego se solicitó el mismo rango al fabricante de la turbina quien, a su vez, limitó el rango de operación a lo solicitado por el cliente.

La posibilidad surgió, durante el taller de PFMA, como una gran ayuda para controlar los niveles del embalse en condiciones de emergencia. La capacidad de reducir el nivel del embalse por debajo de 390 msnm puede convertirse en una medida crítica para ampliar las opciones de gestión del embalse, actualmente muy limitadas, y en consecuencia para aumentar la seguridad del Proyecto en funcionamiento. Por lo tanto, el asunto debe ser seriamente reevaluado por EPM. No hace falta decir que hay que consultar a los proveedores de equipos.

A continuación, el IAP desarrolla los aspectos electromecánicos de la modificación del rango de cargas. En condiciones de funcionamiento normales y excepcionales (limitadas a cuatro/ocho centenares de horas al año), la carga neta de funcionamiento de las turbinas Francis se sitúa normalmente en el rango de:

- carga nominal neta + 10 % y
- carga nominal neta -25/30 %

En ese rango, la eficiencia disminuye, pero las unidades no se ven afectadas o se ven marginalmente afectadas.

Dicho rango corresponde a una relación "Carga Mínima/Carga Máxima" de aproximadamente el 65 %.

Rangos similares se traducirían para Ituango en la posibilidad de bajar el embalse a, digamos, 370 msnm, más o menos. Esta posibilidad permitiría controlar el nivel del embalse después de un terremoto (objetivo de seguridad). También podría facilitar intervenciones de mantenimiento extraordinario de las obras de entrada (objetivo de mantenimiento).

Restringir el nivel mínimo de operación a 390 msnm para evitar vórtices en las entradas parece una medida de diseño excesiva y debe ser reevaluada por el ingeniero. En situaciones de emergencia similares, las prácticas establecidas incluyen lo siguiente:

- Supervisión constante en las entradas, para detectar la formación incipiente de vórtices.
- Monitoreo de cualquier ruido fuerte de las cajas en espiral, causado por la expansión de las primeras burbujas de aire.

La siguiente tabla resume la comprensión del IAP de los rangos de carga de Ituango (se encontraron números ligeramente diferentes en diferentes documentos).

Carga	Valor de carga neta de la turbina de Ituango [m]	Valor de carga neta de la turbina de Ituango [%]	Relación	Valores [por unidad]
Máxima	207	104,9 %	Máx. /mín.	1,25
Normal	197,3	100,0 %		
Mínima	166	84,1 %	Mín./máx.	0,80

La figura n.º 36 muestra el "diagrama-de colinas" de la turbina de Ituango. El "área de operación continua" parece ser el resultado de la solicitud de EPM de un área de muy alta eficiencia en lugar de una limitación física. La relación carga operativa máxima bruta/carga operativa mínima bruta basada en el nivel del embalse es de aproximadamente el 85 % y la relación carga mínima/carga máxima del prototipo según la prueba del modelo es del 80 %. Ambas cifras son bajas.

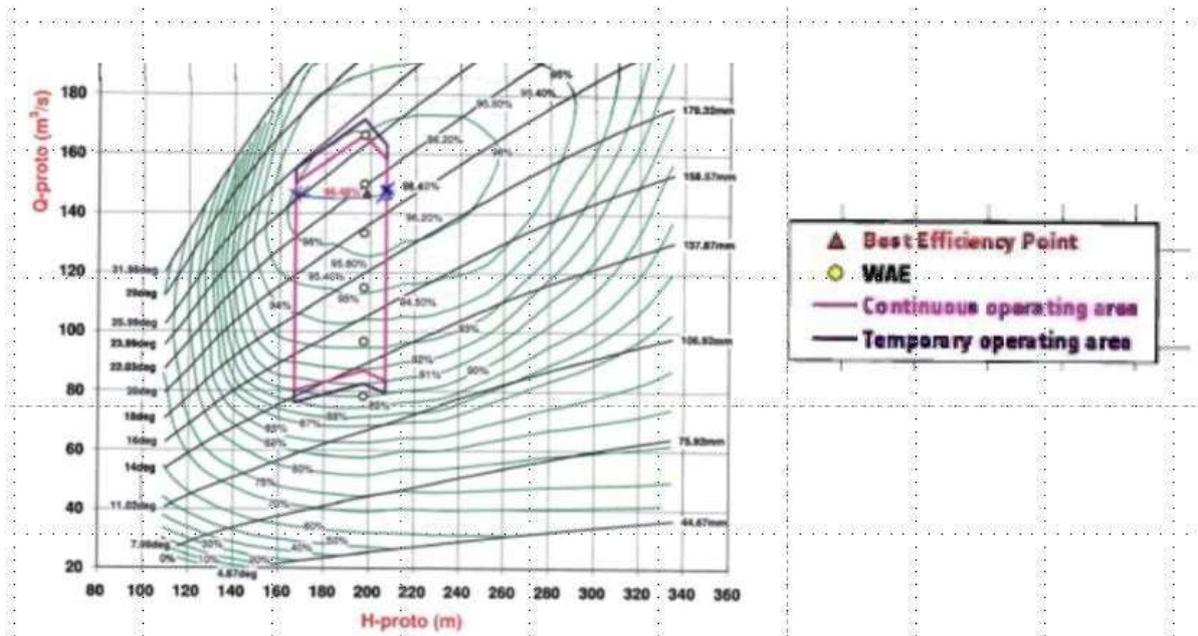


Figura n.º 36. Gráfico de colinas de la turbina de Ituango.

Además, cabe señalar que el funcionamiento de la turbina por debajo de su carga mínima oficial seguiría estando en un área de alta eficiencia (por encima del 90-91 %), especialmente para valores altos de Q (los más interesantes). Eso indica un rendimiento respetable de la turbina.

La siguiente tabla compara la turbina de Ituango con la de otra turbina² que tiene una velocidad específica similar (n_q).

Parámetros de la turbina	Unidad	Ituango	Central eléctrica con turbina con n_q similar
N rpm	rpm	180	166,7
Q	m³/s	169	278
H	m	197,4	254
n_q	-	44	45
H mín.	m	166,9	185
H máx.	m	207	320
H máx./H mín.	-	1,24	1,73
H nominal/H mín.	-	1,18	1,32

Referencias de otras centrales hidroeléctricas en América del Sur (cortesía de KfW basada en datos disponibles públicamente):

- SOGAMOSO HEPP (Colombia; 3 x 273 MW = 820 MW - Colombia) D de Turbina = 4,5 m
Hn = 145,5 m / H máx. = 155 / H mín. = 107 m ; relación = + 7 % / - 27 %
- GURI 2 HEPP (Venezuela 10 X 770 MW) D Turbina = 7 m Hn = 134, H mín. 108; H máx. = 144; relación = + 7 % / - 20 %

Finalmente, la figura n.º 37 muestra ejemplos de gráficos de colinas propuestos por dos fabricantes diferentes para instalar exactamente la misma turbina en diferentes partes de la misma central eléctrica; esas turbinas son similares, en tamaño, a las de Ituango. Cabe destacar la amplia gama de operaciones y, no menos importante, las diferencias entre fabricantes.

² El nombre del proyecto no se puede citar por razones de confidencialidad.

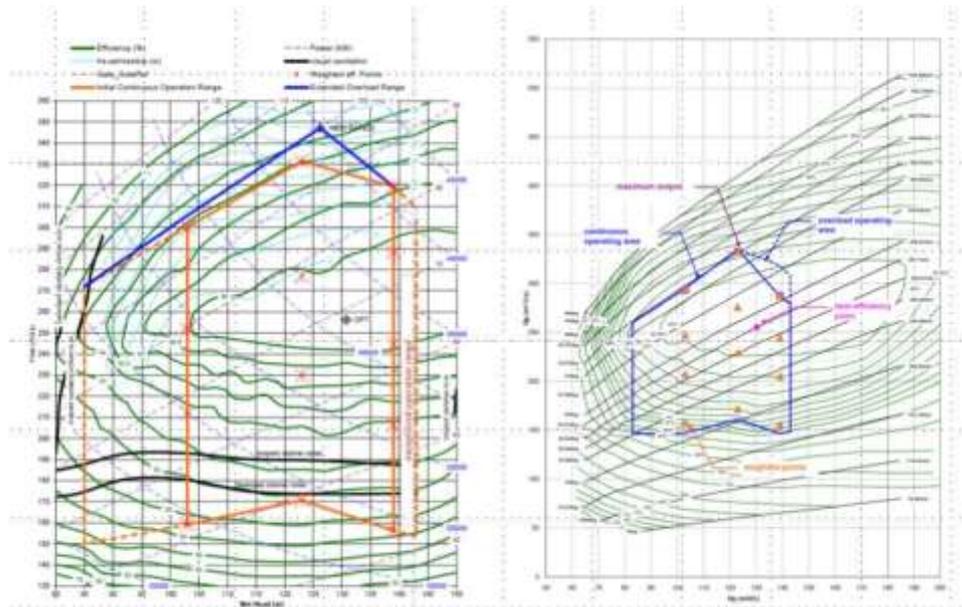


Figura n.º 37. Gráficos de colinas propuestos por dos fabricantes para la misma turbina.

En conclusión:

- La posibilidad de operar las turbinas de Ituango por debajo de los 390 msnm parece técnicamente factible.
- La opinión del proveedor es esencial, incluida su opinión sobre la eficiencia de las garantías.
- El análisis del informe de prueba del modelo, incluidas las pulsaciones de presión y las curvas de cavitación, también es esencial.
- Según los informes, el modelo físico de la turbina todavía está disponible y se puede utilizar para validar.

6 ANEXO A: LISTADO DE DOCUMENTOS PUESTOS A DISPOSICIÓN DEL IAP

- 1Presentación Técnica Proyecto Hidroeléctrico Ituango mayo 2020, EPM;
- 20200516_Stilling basin, Integral;
- 20200518-_DAM, Integral;
- 20200518_NorthZone_Lower_Elbows, Integral;
- 20200518_Power_house_caverns, Integral;
- 20200518_SouthZone, Integral;
- 20200518_Superficial, Integral;
- 20200519 presentación asesores BID_Aseguradora,
- BID RISK PRESENTATION 20 Mayo 2020, EPM;
- DI_GAD_TDD-Presentation1, Mayo 2020, Integral;
- Environmental Flow, Mayo 2020, Integral;
- ITUANGO-Costo ppto 2020 y comparación costo ppto 2019, EPM;
- ITUANGO COSTO Marzo2020, EPM;
- Presentación BID 3 de abril Extract 3. PROGRAMA DE PUESTA EN OPERACIÓN, abril 2020, EPM;
- Seguimiento Avance Megaproyectos Ituango_Dic_2019, EPM.

7 ANEXO B: TALLER DE MODO DE FALLA POTENCIAL el 21 de mayo

7.1 Justificación

La disponibilidad de obras hidráulicas para bajar el nivel del embalse, en circunstancias excepcionales cuando no se puede confiar en el funcionamiento de la turbina, es fundamental para el desempeño seguro del proyecto a largo plazo.

El tema del control del embalse a largo plazo es demasiado importante y requiere un examen detallado, incluida la evaluación de riesgos, la definición de medidas de mitigación y la preparación de planes de contingencia. Con este fin, el IAP llevó a cabo un taller de PFMA (Análisis de Modos de Fallo Potenciales) para analizar posibles escenarios de operación del proyecto, o falla en la operación, bajo diferentes configuraciones de canales de agua.

7.2 Objetivos del taller de PFMA

- i) Ayudar a EPM a tomar una decisión informada sobre el riesgo sobre las medidas más apropiadas para garantizar un funcionamiento seguro y confiable de HEP Ituango.
- ii) Asistir en la transición entre la construcción y la operación, con especial referencia a la Instrumentación y Monitoreo, Operación y Mantenimiento y Preparación para Emergencias del Proyecto .

Con referencia al segundo objetivo, el IAP entiende que Integral ya ha realizado sesiones de PFMA considerando una amplia gama de posibles modos de falla. Dichas sesiones están programadas para continuar hasta la finalización del Proyecto.

En la sesión también participaron todas las partes interesadas clave, representantes de EBIA y POYRY. La lista completa de participantes se muestra en el Anexo C.

7.3 Introducción al PFMA

Para el beneficio de aquellos que no están familiarizados con el método, el IAP introdujo el PFMA utilizando una presentación en español. La presentación se muestra en el Anexo D.

7.4 Proceso PFMA

Se analizaron dos marcos de PFM que son relevantes para el control del embalse durante la operación:

- SB: **Aliviadero bloqueado** por un desprendimiento de tierra masivo, y
- ED: **Reducción de emergencia del embalse**, requerida después de un fuerte terremoto o evidencia de erosión interna progresiva.

Los dos PFM no son exhaustivos, pero se consideran altamente informativos para el Objetivo i).

Para el análisis se utilizó el método de árbol de eventos, implementado en hojas XLS. El método implica asignar probabilidades a cada evento/estado postulado del sistema. Las probabilidades se pueden asignar de una de cuatro maneras, o una combinación de ellas:

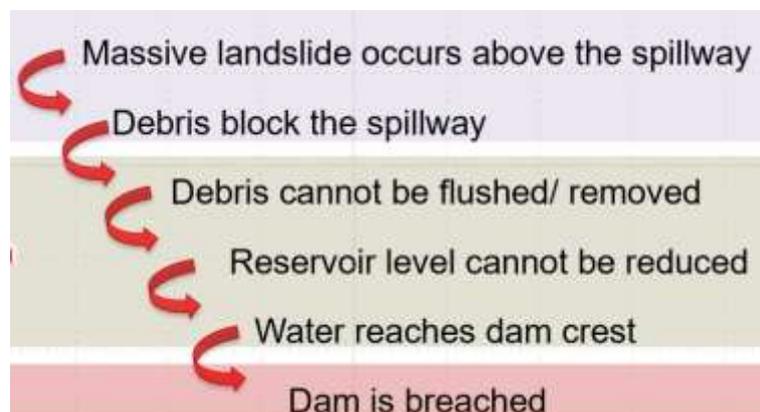
- Modelos de ingeniería basados en procesos físicos (por ejemplo, frecuencia de inundación)
- Estimaciones estadísticas basadas en datos empíricos (por ejemplo, erosionabilidad de un determinado tipo de suelo)
- Árbol de fallas basado en la construcción lógica (por ejemplo, mal funcionamiento del equipo)
- Juicio (por ejemplo, proceso de elicitación de expertos)

En todos los casos, el juicio está inevitablemente involucrado. Por lo tanto, es muy importante que se utilice una referencia coherente para asociar un valor de probabilidad a descriptores subjetivos. En el taller se utilizó la siguiente referencia.

Descriptor	Associated Probability
Virtually Certain	0.999
Very Likely	0.99
Likely	0.9
Neutral	0.5
Unlikely	0.1
Very Unlikely	0.01
Virtually Impossible	0.001*

7.4.1 PFM SB: Aliviadero bloqueado por desprendimiento de tierra

Mecanismo de fallo postulado:



El árbol de eventos se muestra en el Anexo E. Cinco pasos componen el árbol de eventos:

- Iniciación
- Respuesta ante emergencias

- Intervención
- Progresión
- Brecha

Cada nodo del árbol de eventos tiene un resultado doble:

- El proceso se detiene y no se puede producir un fallo.
- Ese proceso continúa.

La suma de las probabilidades respectivas debe ser igual a 1 (eventos mutuamente excluyentes).

La multiplicación de las probabilidades a lo largo de las ramas del árbol que alcanzan la "brecha" da la probabilidad de falla.

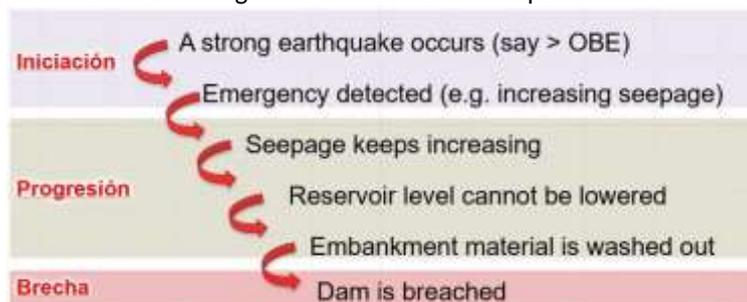
La rama superior del árbol de eventos cuenta solo con la descarga de la turbina para controlar el embalse. Si la turbina no estuviera disponible durante la emergencia, sería imposible mantener el embalse por debajo del nivel del aliviadero, y el proceso podría continuar para lograr la ruptura de la represa. La probabilidad general de falla sería de $2 \cdot 10^{-5}$, es decir, 2:100.000, un valor muy bajo pero no insignificante según la siguiente categorización:

Category	Probability range (per year)
Neglegible	Indistinguishable from 0
Very Low	$< 10^{-4}$, except 0
Low	10^{-3} to 10^{-4}
Medium	10^{-2} to 10^{-3}
High	10^{-1} to 10^{-2}
Very High	$> 10^{-1}$, not 1
Certain	1

La rama inferior postula la disponibilidad de una salida de nivel medio (MLO). En caso de que las turbinas no estén disponibles durante la emergencia, la MLO podría controlar el embalse y evitar fallas. Si no hay MLO disponible, el proceso podría continuar para lograr la ruptura de la represa. La probabilidad general de falla sería de $5 \cdot 10^{-5}$, es decir, 5:100.000, ligeramente superior a la anterior.

7.4.2 PFM ED: Reducción de emergencia del embalse

Durante la operación, podría ser necesario una reducción de emergencia del embalse después de un fuerte terremoto o evidencia de erosión interna grave. Mecanismo de fallo postulado:



El árbol de eventos se muestra en el Anexo F

Al igual que en el caso anterior (PFM SB), la rama superior del árbol de eventos cuenta solo con la descarga de la turbina para controlar el embalse. Si la turbina no estuviera disponible durante la emergencia, sería imposible bajar el embalse a un nivel seguro, y el proceso podría continuar logrando la ruptura de la represa. La probabilidad general de fallo sería de $4 \cdot 10^{-5}$, es decir, 4:100.000, un valor muy bajo pero no insignificante. La rama inferior postula la disponibilidad de una MLO. En caso de que las turbinas no estén disponibles durante la emergencia, la MLO podría controlar el embalse y evitar fallas. Si no hay MLO disponible, el proceso podría continuar logrando la ruptura de la represa. La probabilidad general de falla sería $3 \cdot 10^{-6}$, es decir, 3:1000,000, menor que la anterior.

7.5 Inventario

El IAP se enteró de que Integral está llevando a cabo una Evaluación de Riesgos integral del Proyecto, aplicando la técnica PFMA a un gran conjunto de posibles modos de falla. Integral confirmó que el enfoque es, en principio, el mismo que el utilizado por el IAP y que la sesión del 21 de mayo proporcionó información útil para los próximos pasos del ejercicio que Integral está llevando a cabo.

La PF obtenida, para los dos PFM analizados el 21 de mayo, oscila entre $5 \cdot 10^{-5}$ (máximo) y $3 \cdot 10^{-6}$ (mínimo). Para poner tales valores en perspectiva, debe tenerse en cuenta que la PF de las represas modernas generalmente se considera que está alrededor de 10^{-5} , y que la "visión" y el compromiso de ICOLD es reducir aún más esa PF a 10^{-6} . La figura n.º 38 pone los valores anteriores en perspectiva (se muestran los rangos indicativos para represas pequeñas⁴ e instalaciones de residuos⁵ para comparación). *Si se invierte la cifra, es decir, el margen de seguridad*

= $1/PF$, la imagen puede resultar más familiar para quienes no estén familiarizados con las probabilidades.

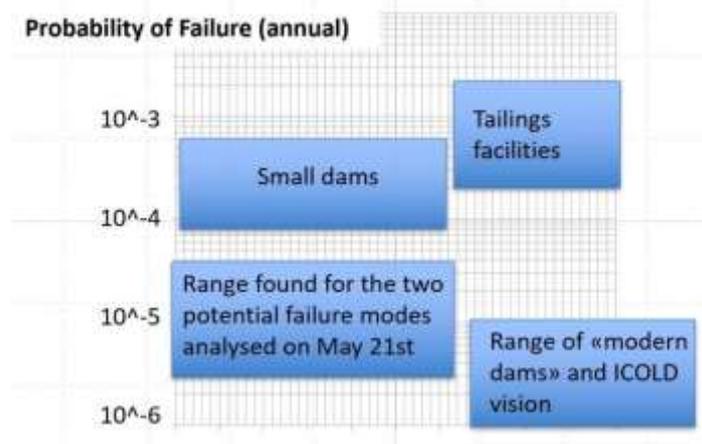


Figura n.º 38. Probabilidades de falla puestas en contexto.

Es deseable, para un proyecto de la importancia y el nivel de peligro como Ituango, apuntar al "rango ICOLD". Dos medidas clave pueden lograr ese resultado:

- Hacer funcionar las turbinas a alturas inferiores a 390 msnm.
- Adición de una salida de nivel medio.

La primera medida parece factible y se analiza en la sección 5.5 del presente informe.

³ ICOLD (2017) "Dam Safety Management", Bulletin 154.

⁴ ICOLD (2016) "Small Dams Design, Surveillance and Rehabilitation", Bulletin 157.

⁵ ICOLD (2018) "Tailings Dam Design, Technology Update", Bulletin 181.

Agregar una MLO a Ituango, aunque es muy difícil debido a la presencia del embalse, no debe abandonarse porque aumentaría notablemente la seguridad del Proyecto. En consideración de las dificultades involucradas, la construcción debe planificarse cuidadosamente y, si se confirma que es esencial, construirse durante la vida del Proyecto.

La decisión debe estar informada sobre el riesgo, es decir, el PFMA debe repetirse, con estimaciones de probabilidad más detalladas y el rango de PF en comparación con el asociado con la construcción de una MLO. El IAP alienta a EPM e Integral a realizar el ejercicio. El IAP estará encantado de revisar el informe relativo.

En conclusión, el taller de PFMA logró el resultado previsto de aumentar la conciencia sobre la importancia primordial de un control confiable del embalse durante la operación. El PFMA también permitió identificar elementos importantes, como la posibilidad de operar las turbinas por debajo de los 390 msnm, que requieren un seguimiento serio.

8 ANEXO C: Taller PFMA- Listado de participantes

NOMBRE	ENTIDAD	CARGO
Bayardo Materón	Board de Asesores	Especialista en Presas
Gabriel Fernández	Board de Asesores	Especialista en Geotecnia
Adriana Cubides Cruz	EPM	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería
Alejandro Giraldo	EPM	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería
Angela Vergara Jaller	EPM	VP Riesgos
Bladimir Suarez	EPM	Jefe Unidad Operaciones Ituango
Gloria Tobón	EPM	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería
Jesús María Arango	EPM	Profesional Experto
Jorge Tabares Ángel	EPM	Vicepresidente de Finanzas e Inversiones
José Alberto Eusse	EPM	Profesional Ambiental y Social
Juan Carlos Gallego	EPM	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería
Juan Carlos Gutiérrez	EPM	Profesional Experto
Juan Carlos Palacios	EPM	Profesional Finanzas y Gestión del Riesgo
Juan Carlos Sampedro	EPM	Director de Gestión de Capitales
Julián Montoya	EPM	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería
Leonardo Henao	EPM	Profesional Ambiental y Social
Luis Alberto Sierra	EPM	Profesional Experto
Marcela Grajales	EPM	Profesional Financiero Dirección Gestión de Capitales
Mary Sol Londoño Perez	EPM	Profesional Financiero
Mauricio Correa	EPM	Jefe Unidad Hidrometría y Calidad Generación Energía
Michel Aljure	EPM	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería
Nestor Daniel Jurado	EPM	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería
Oscar Sierra	EPM	Profesional Gestión Proyectos e Ingeniería
Otoniel Corrales	EPM	Profesional Experto
Robinson Miranda	EPM	Director Ambiental, Social y Sostenibilidad Proyecto Ituango
Rodrigo Mazo	EPM	Profesional Financiero
Stefano Di Ubaldo C.	EPM	Director Desarrollo Proyecto Ituango
Tatiana Isaza	EPM	Directora Seguros Corporativos
William Giraldo	EPM	Vicepresidente Proyectos Generación Energía
Wilson Javier Sánchez	EPM	Profesional Finanzas y Gestión del Riesgo
Alessandro Palmieri	IAP	Especialista en Presas y Obras Hidráulicas
Federico Ciampitti	IAP	Especialista Electromecánico
Paulo Marinos	IAP	Especialista en Geotecnia
Alexi Adriana Duque	Integral	Residente de Instrumentación
Fabio Villegas	Integral	Asesor
Gabriel Lacouture	Integral	Lider Especialista en Hidrología e Hidráulica
José Ignacio Hernández	Integral	Director Técnico de Proyectos
Juan Bernardo Salazar	Integral	Ingeniero Civil Analista de Riesgos
Juan Camilo Arango	Integral	Ingeniero Mecánico
Juan David Herrera	Integral	Residente de Geotecnia
Juan Luis Cadavid	Integral	Director General
María Cecilia Sierra	Integral	Especialista en Geociencias
Ricardo Germanetti	Integral	Lider Técnico Área de Estructuras
Santiago Rivera	Integral	Ingeniero
Jacobo Ojeda	Interventoría	Profesional
José Iván Bohórquez	Interventoría	Jefe de Túneles y Conducciones
Tito Martínez	Interventoría	Director Técnico
Oscar González	KfW	Ingeniero Mecánico – Experto Senior en Energía
Matías Egaña	POYRY	Ingeniero Geólogo
Patrick Furrer	POYRY	Gerente de Proyecto
Santiago Castro	POYRY	Geotécnico
Winfred Riemer	POYRY	Experto en Presas

9 ANEXO D: Modo de falla potencial- Básico


Ituango HPP
 Independent Advisory Panel to IDB Invest
Taller de los Modos de Fallo Potenciales
Modo de Fallo Potencial
Análisis – Básico
 Alejandro Palmieri
 Mayo 2020

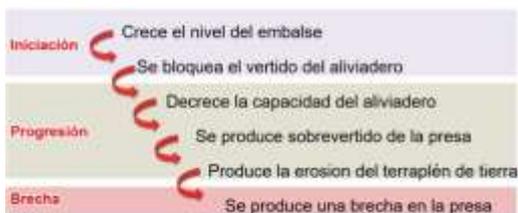
Modos de Fallo Potenciales en Presas

Un Modo de Fallo Potencial (PFM) son una serie de eventos que pueden originar el fallo de la presa.

- El riesgo de fallo de la presa se puede reducir al comprender los modos de fallo potenciales.
- Esto implica comprender cómo y por qué fallan las presas:
 - Comprender cómo se comportan normalmente nuestras presas.
 - Aprender a identificar las primeras señales de que algo va mal.
 - Comprender los peligros y riesgos existentes en la presa.
 - Comprender el impacto potencial del fallo en la comunidad de aguas abajo.
 - Estar preparado para el comportamiento inesperado del fallo.
- FERC (USA) Guía de Ingeniería para la Evaluación de Proyectos Hidroeléctricos. Capítulo 14: PROGRAMA DE MONITOREO DEL FUNCIONAMIENTO DE LA SEGURIDAD DE LA PRESA

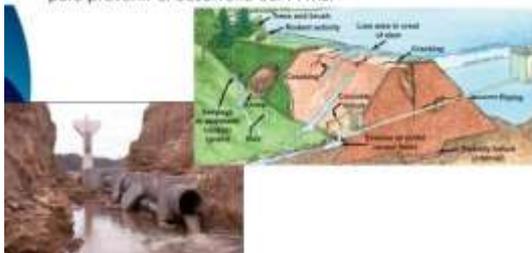
Modos de Fallo Potenciales en Presas

Ejemplo #1. Modo de Fallo Potencial. Sobre-vertido de la presa



Modos de Fallo Potenciales en Presas

- Determina cuál PFM tiene la mayor probabilidad de ocurrir en tu presa y cuáles son los indicadores claves.
- Permite al propietario de la presa tomar acciones tempranas para prevenir el desarrollo de PFM.



Modos de Fallo Potenciales en Presas

Definición de Fallo:

- La liberación incontrolada de agua del embalse a través de la rotura de la presa o una estructura accesoria (aliviadero, toma, etc.)
- La descarga incontrolada por fallo del equipamiento o una operación no planificada



Modos de Fallo Potenciales en Presas

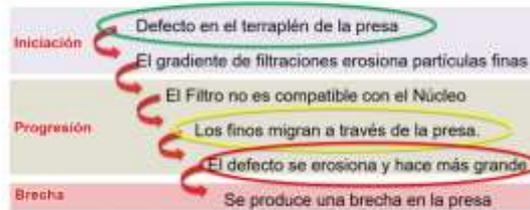
Cómo se producen los Modos de Fallo Potenciales

- Iniciación:** PFM se inician por un peligro o un evento.
- Progresión:** Para que suceda el fallo tienen que darse una cadena de eventos.
- Intervención/Brecha:** La progresión se detiene por la intervención humana o porque casi se llega a la rotura de la presa.



Modos de Fallo Potenciales en Presas

Ejemplo #2. Modo de Fallo Potencial. Erosión Interna



¿Dónde puedes identificar el PFM e intervenir?

Modos de Fallo Potenciales en Presas

El Proceso PFMA



Modos de Fallo Potenciales en Presas

El Proceso PFMA

Paso 1	• Nombrar participantes en la evaluación del Modo de Fallo Potencial
Paso 2	• Recopilar datos e información relevantes para la presa
Paso 3	• Leer y revisar información de antecedentes
Paso 4	• Visitar la presa
Paso 5	• Realizar un taller de PFMA
Paso 6	• Documentar los resultados del taller de PFMA

Modos de Fallo Potenciales en Presas

Paso 5. Proceso del Taller PFMA

- Introducción al Taller
- Desarrollo y descripción de los Modos de Fallo Potenciales
- Identificación de Factores Favorables y Adversos al MF
- Detección de Modos de Fallo Potenciales
- Considerar intervención
- Documentación de los hallazgos
- Planificación de las Medidas de Reducción

Modos de Fallo Potenciales en Presas

Taller PFMA - Resultados clave

- Definir relaciones funcionales entre modos de fallo potenciales y datos de monitoreo / instrumentación.
- Afina los tipos y ubicación de la instrumentación.
- Evaluar los niveles de embalse seguros.
- Establecer una línea de base de seguridad para la próxima evaluación de PFMA.
- Términos de referencia para Planes de seguridad de presas (instrumentación; O&M; preparación para emergencias / Matriz de nivel de respuesta).
- Plan de acción para mejorar la seguridad de la presa.

Modos de Fallo Potenciales en Presas

- Determine las cargas que podrían iniciar los Modos de Fallo Potenciales, incluidos los de peligros naturales

Estático	• Condiciones de operación normal (E). Filtraciones a través del cuerpo de presa con nivel de operación de embalse normal).
Avenidas	• Precipitaciones importantes causan avenidas y ascensos del nivel de embalse (E). Sobrevuerto de corona)
Sismo	• Cargas dinámicas causadas por un sismo (E). Inestabilidad de taludes por sismo).
Operacional	• Errores en la operación /disfunción que pone en peligro la presa (E). Fallo de apertura de compuertas de aliviadero).
Otros	• Otras cargas relevantes en el emplazamiento (E). Deslizamientos, oleaje inducido por viento que produce sobrevuerto).

Modos de Fallo Potenciales en Presas

Detección de Potenciales Modos de Fallo

- US Bureau of Reclamation (USBR) categorías:

Categoría	Descripción
Categoría I Altamente creíble	Altamente Creíble Estos posibles modos de fallo se han iniciado y están en progreso, o se espera que progresen en condiciones normales de operación o carga de diseño. Se pueden requerir medidas urgentes de emergencia, vigilancia o medidas de mitigación si la situación parece ser peligrosa en términos de probabilidad de fallo y las consecuencias resultantes del fallo.
Categoría II Creíble	Creíble Se considera que estos modos son significativos, pero no requieren medidas inmediatas para mitigarlos. Tenga en cuenta que aunque estos modos de fallo potenciales se consideran menos significativos que la Categoría I, se describen con la misma cantidad de detalles. La razón de la menor importancia se anota y resume en el informe o estado de la documentación.
Categoría III Insuficiente información	Se necesita más información o requiere un análisis Para clasificar estos modos de fallo potenciales se requiere más información para permitir un juicio seguro. Se requieren más acciones de investigación o análisis para comprender estos modos de fallo. Debido a que se requiere una acción antes de la resolución, también se puede resaltar la necesidad de esta acción.
Categoría IV No creíble	Descartado Estos posibles modos de fallo pueden descartarse porque no existe una posibilidad física. Hay información disponible que muestra la imposibilidad que había generado el desarrollo del modo de fallo potencial, o el modo de fallo es tan remoto que se determina que su probabilidad no es creíble.

ANEXO E: PFM SB: Aliviadero bloqueado por desprendimiento de tierra

Potential Failure Mode

Spillway Blocked



ANEXO F: PFM ED: Reducción de emergencia del embalse

Potential Failure Mode

Emergency Drawdown (strong quake/ internal erosion)

