

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 de BID Invest
Informe del IAP n.º 2, abril de 2019**

**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

1	Situación actual del proyecto	1
1.1	General	1
1.2	Comparación con agosto de 2018.....	1
1.3	Evaluación de seguridad.....	2
2	Cierre posterior de los canales de agua de emergencia	3
2.1	Descarga de emergencia: cronología esencial.....	3
2.2	Decisión de anticipar el cierre de la admisión 1	3
2.3	Fenómenos observados: equipos hidromecánicos.....	4
2.4	Rendimiento observado de las subterráneas	5
2.4.1	Erosión y falla	6
2.4.2	Zonas sobrecargadas	7
2.4.3	Erosión del piso del túnel.....	7
2.5	Cavidad entre los pozos 1 y 2	8
2.6	Complejo de cavernas	9
2.7	Cámara de carga norte (“almenara”).....	9
2.8	Otras ocurrencias de inestabilidad: observadas y esperadas.....	10
2.9	Medidas prioritarias en curso	11
3	Evaluación de daños a equipos electromecánicos	11
3.1.1	Breve actualización sobre equipos hidromecánicos	15
3.1.2	Breve actualización sobre el patio de maniobras de GIS de 500 kV.....	16
4	Control de los niveles del embalse	17
4.1	General	17
4.2	Galería de descarga intermedia a 260 m.....	17
4.3	Salidas de nivel medio adicionales en estudio.....	18
5	Estabilidad de la orilla derecha.....	18
6	Represa	21
7	Aliviadero	21
8	Embalse.....	22
8.1	Estabilidad de los bordes.....	22
8.2	Gestión de escombros.....	24
8.2.1	Tendencias de sedimentación.....	25
9	Finalización del proyecto	26

9.1	Cronograma	26
9.2	Costes	28
10	Conclusiones y recomendaciones del IAP	28
10.1	Progreso desde julio de 2018	28
10.2	Evaluación de seguridad.....	28
10.3	Estabilidad de la pendiente	29
10.4	Implementación de la descarga intermedia	29
10.5	Entradas de alimentación y conductos de presión	29
10.6	Sala de máquinas y complejo de cavernas	29
10.7	Cámaras de carga.....	30
10.8	Planta y equipo	30
10.9	Calendario y costes de finalización del proyecto.....	30

Glosario de 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
GAD:	galería auxiliar de desviación
SAD:	sistema alterno de desviación
GSI:	índice de fortaleza geológica
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
PH:	sala de máquinas
TD2:	túnel de desvío 2

Resumen ejecutivo

La situación del Proyecto ha evolucionado considerablemente desde agosto de 2018.

- Se detuvo la descarga de emergencia a través de canales de alimentación.
- La decisión de adelantar el cierre de la última entrada (n.º 1) fue necesaria por motivos de seguridad, y los impactos sociales asociados se gestionaron adecuadamente.
- Se están afinando los planes para el taponamiento del DT2 y la GAD.
- La galería de descarga intermedia se está fortaleciendo y tendrá una mayor capacidad de descarga.
- La planificación de una salida de nivel medio adicional está en marcha.
- Se están valorando las condiciones de las obras subterráneas (trabajos muy difíciles).
- Malas noticias: gran hueco que une los pozos 1 y 2; entre la caverna de la sala de máquinas y la cámara de carga del lado norte.
- Buenas noticias: el techo de la caverna principal no está dañado.
- En general, las buenas noticias son más que las malas noticias.
- También se está evaluando el daño a la planta y al equipo; por el momento, el IAP no tiene elementos para revisar el cronograma y las implicaciones de los costes; por lo tanto, se mantienen los supuestos de agosto de 2018.

La siguiente tabla actualiza la evaluación de opciones para la finalización del Proyecto:

Opciones	Evaluación de agosto de 2018	Evaluación de marzo de 2019
Rehabilitación completa	Opción preferible; confirmación final después de la evaluación de los daños en el complejo de la sala de máquinas.	Opción preferible confirmada.
Revisar los resultados 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.
Revisar los propósitos del proyecto	No es realista.	
Reingeniería del proyecto	Adición de salida de nivel medio esencial	
Cierre parcial/total	Muy improbable, a menos que la ubicación de la caverna deba abandonarse por daños excesivos.	Se puede excluir el cierre parcial.
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 económica.	Se deben iniciar estudios batimétricos para evaluar las tendencias de sedimentación.

Con base en el estado actual de conocimiento, las reparaciones a las obras subterráneas son el factor de control del cronograma. Hasta que un mejor conocimiento informe una planificación confiable, la gestión adaptativa será el principio rector para la implementación de trabajos de reparación subterránea. EPM podrá emitir una actualización del cronograma en los próximos meses, después de completar el desagüe y la evaluación de las obras de rehabilitación necesarias.

Las estimaciones de costes son aún más inciertas que el cronograma. Por el momento, hay muy pocos elementos disponibles para actualizar de forma fiable las estimaciones que se realizaron en septiembre de 2018. Con base en el conocimiento actual, es seguro mantener las estimaciones de septiembre para fines financieros. Se espera que las estimaciones de costes se actualicen en el tercer trimestre de 2019.

Panel Asesor Independiente de BID Invest Informe n. 2
Proyecto Hidroeléctrico Ituango – Colombia, abril de 2019

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) de BID Invest visitó el Proyecto, por primera vez, en agosto de 2018 (fase I del IAP). El objetivo de la fase II del IAP es asesorar a BID Invest sobre:

- Los avances logrados en la implementación del proyecto desde julio de 2018.
- La situación actual del proyecto con foco en:
 - Estabilidad de la represa e implementación de la pared flexible para unir el dique prioritario al cuerpo de la represa;
 - Estabilidad de las pendientes;
 - Implementación de la descarga intermedia;
 - Sellado de los túneles de desvío;
 - Información sobre la casa de máquinas y el complejo de cavernas basada en el monitoreo indirecto y los orificios exploratorios;
 - Estabilidad de las tuberías forzadas;
 - Acondicionamiento general de las entradas de la sala de máquinas.
- Evaluar críticamente las opciones para la finalización del proyecto, incluida la reingeniería, el cronograma revisado y los riesgos potenciales para la finalización exitosa del proyecto.
- Evaluar la seguridad general de la infraestructura.

El presente Informe contiene los hallazgos y las recomendaciones del IAP, luego de la segunda visita del IAP a Ituango HPP en marzo de 2019. Las visitas al sitio tuvieron lugar los días 5 y 6 de marzo, seguidas de una reunión informativa en la sede de EPM en Medellín el día 7. Los miembros del IAP desean reconocer el compromiso, la cooperación y la transparencia sobresalientes de EPM y otras partes.

Al momento de la visita, el nivel del embalse era de 407,33 metros sobre el nivel del mar (msnm), la descarga del aliviadero era de 650 m³/s, y la cresta de la represa había alcanzado la elevación de 418 m.

1.2 Comparación con agosto de 2018

Durante la visita del IAP en marzo de 2019, la situación del Proyecto había evolucionado considerablemente en comparación con agosto de 2018:

- Se detuvo la descarga de emergencia a través de los canales de alimentación.
- Se están evaluando las condiciones de las obras subterráneas a través de las cuales se realizó la descarga de emergencia durante nueve meses, lo cual es una tarea muy desafiante.
- La creación de una gran cavidad, entre los pozos de presión 1 y 2, ha sido un hallazgo negativo, aunque explicable dado el extenso período de carga dinámica de los canales.
- El hallazgo más satisfactorio ha sido el techo intacto de la sala de máquinas.

- En general, a la espera de una evaluación completa de las condiciones del macizo rocoso, el balance parece ser positivo.
- El diseño y la metodología para el taponamiento del DT2 y la GAD han demostrado ser más exigentes de lo esperado, y se están movilizando contratistas especializados.

A pesar de los desafíos extremos encontrados, y los esperados en el futuro, el personal del Proyecto de todas las partes involucradas demuestra un compromiso sobresaliente. El IAP desea reconocer la cooperación y la actitud proactiva de las partes interesadas del Proyecto.

La siguiente tabla actualiza la evaluación del IAP de las "Opciones para la finalización del proyecto" que se presentaron durante la visita de agosto.

Opciones	Evaluación de agosto de 2018	Evaluación de marzo de 2019
Rehabilitación completa	Opción preferible; confirmación final después de la evaluación de los daños en el complejo de la sala de máquinas.	Opción preferible confirmada.
Revisar los resultados 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.
Revisar los propósitos del proyecto	No es realista.	
Reingeniería del proyecto	Adición de salida de nivel medio esencial	
Cierre parcial/total	Muy improbable, a menos que la ubicación de la caverna deba abandonarse por daños excesivos.	Se puede excluir el cierre parcial.
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 económica.	Se deben iniciar estudios batimétricos para evaluar las tendencias de sedimentación.

Haber encontrado el techo de la sala de máquinas en condiciones seguras significa que el proyecto se puede completar de acuerdo con el diseño original, aunque con retrasos significativos y trabajos de reparación. Estos últimos están siendo evaluados.

1.3 Evaluación de la seguridad

La seguridad hidrológica ya no es un problema, el corte de la cresta de la represa se ha completado y el dique de la represa está progresando rápidamente hasta su elevación final.

Se están evaluando las condiciones de seguridad de las obras subterráneas; esta es una tarea crítica porque controla el cronograma del proyecto y la posibilidad de tapar definitivamente la GAD y el DT2 para eliminar las condiciones de alerta a la población corriente abajo.

Las investigaciones subterráneas requieren una mayor atención a la salud y la seguridad de los trabajadores. El rendimiento de la represa es tan bueno como el observado en agosto.

2 Después del cierre de los canales de emergencia

2.1 Descarga de emergencia: cronología esencial

La siguiente tabla resume la secuencia de los eventos clave; las fechas más críticas posteriores a agosto de 2018 (primera visita del IAP) se muestran en rojo, las medidas de respuesta a la emergencia se resaltan en amarillo.

Día	Eventos clave
28 de abril de 2018	28 de abril de 2018: la falla del macizo rocoso en la GAD inició la secuencia de eventos.
10 de mayo de 2018	Para evitar el desbordamiento de la represa, EPM dejó abierto los túneles de entrada 1 y 2, así como los túneles de entrada 7 y 8; el embalse comenzó a fluir a través de la sala de máquinas. Control del nivel del embalse recuperado.
12 mayo de 2018	Un arrastre abrupto de la obstrucción del túnel de desvío derecho causó un flujo superior a 4000 m ³ /s que duró unas 4 horas, causando graves consecuencias corriente abajo.
17 de mayo de 2018	El túnel de fuga 3 redujo su flujo, que posteriormente se detuvo.
20 de mayo de 2018	EPM cerró las compuertas de entrada 7 y 8.
5 de junio de 2018	El nivel de la cresta de la represa alcanzó una altura de 410 msnm, lo que permitió la operación del aliviadero de superficie. Riesgo de desbordamiento de la represa evitado.
Noviembre de 2019	El nivel del embalse se mantuvo constantemente a una altura de 408 msnm sin causar daños adicionales a la represa.
Diciembre de 2019	Aparecieron signos de deterioro de la parte fija de las compuertas de entrada, lo que generó preocupaciones sobre la posibilidad futura de cerrar el túnel de entrada utilizando las compuertas de entrada. Tal evento podría haber tenido graves consecuencias para la sala de máquinas.
Diciembre de 2018/principios de enero de 2019	El reconocimiento de que las actividades sobre la descarga intermedia no se completarían antes de octubre o noviembre de 2019, el resultado positivo del monitoreo de la represa y de las obras subterráneas, y el riesgo de enfrentar problemas con el cierre del túnel de entrada, significó reconsiderar las condiciones previamente identificadas como esenciales para el cierre de las compuertas, es decir (i) tapón final de la GAD y el RDT, (ii) finalización del diagrama plástico de la represa, (iii) finalización de la descarga intermedia. Se iniciaron los preparativos para el cierre de la primera compuerta, incluidas la instalación de instrumentación temporal adicional de la compuerta y una amplia reevaluación de las condiciones de operación de las compuertas de entrada, que involucran a Expertos y Fabricantes.
16 de enero de 2019	Cierre de la primera compuerta de entrada (n.º 2)
Enero de 2019, días posteriores al cierre de la primera compuerta de entrada	Durante el cierre de la primera compuerta de entrada, una conexión física directa entre el túnel de entrada 1 y el 2 se evidencia inequívocamente por diversos fenómenos. Las primeras investigaciones revelaron que los pozos 1 y 2 se vieron severamente afectados por colapsos de sus paredes que generaron grandes cavidades. El colapso de la roca amenazaba los codos superiores, y quedaba solo un pequeño pilar de menos de 20 m.
5 de febrero de 2019	Cierre de la segunda compuerta de entrada (n.º 1)
Febrero de 2019 en adelante	Inicio del desagüe de las obras subterráneas; las actividades se previeron parcialmente porque el volumen de escombros en las elevaciones más bajas de las obras subterráneas fue mayor de lo esperado.
4 de marzo de 2019	Visita del Panel Asesor Independiente

2.2 Decisión de anticipar el cierre de la entrada 1

El cierre de la primera compuerta de entrada n.º 2 se planificó exhaustiva y cuidadosamente.

Las recomendaciones posteriores al evento del Panel de Expertos de Ituango (en junio de 2018) fueron evitar detener el desvío del río a través de la sala de máquinas sin haber logrado antes los siguientes hitos:

- Tapón final de la GAD;
- Tapón final del túnel de desvío derecho;

- Finalización del diafragma de plástico de la represa (y pruebas húmedas de fiabilidad de la operación del aliviadero);
- Finalización de la descarga intermedia (que mientras tanto se estaba rediseñando para una mayor capacidad de descarga).

Sin embargo, los signos de deterioro de la parte fija de las compuertas de entrada comenzaron a aparecer a finales de 2018, aumentando las preocupaciones sobre la posibilidad futura de cerrar los túneles de entrada utilizando las compuertas de entrada. Además, desde el inicio de los eventos, las irregularidades en el flujo a través de la casa de máquinas y los túneles habían afectado rápidamente a los túneles de entrada 7 y 8 que se cerraron después de unos días de operación, a pesar de que estaban significativamente menos completados que los túneles 1 y 2. Posteriormente, las mismas irregularidades afectaron a los túneles de entrada/fuga 1 y 2, generando preocupaciones de derrumbes en las obras subterráneas. Se empiezan a detectar huecos en la zona de los pozos 1 y 2. Si se permitía que progresara, dicho colapso podría haber tenido graves consecuencias para la sala de máquinas y para el Proyecto en general.

Estas señales preocupantes y el resultado positivo del extenso monitoreo del comportamiento de la represa, las obras subterráneas, los taponos temporales, etc., llevaron a la decisión de proceder al cierre del primer túnel de entrada. Se recopilaban datos particularmente útiles durante el mes de noviembre, cuando el embalse permaneció a una altura de aproximadamente 410 msnm durante largos períodos de tiempo.

El plan preveía el cierre secuencial de las dos compuertas, empezando por la entrada n.º 2. El cierre del primer túnel de entrada habría facilitado el cierre del segundo, reduciendo el flujo de agua por la casa de máquinas y otorgando la posibilidad de cerrar la segunda compuerta (entrada n.º 1) con el aliviadero en funcionamiento. El flujo ambiental de 450 m³/s se habría asegurado constantemente.

Si bien la operación de cierre de la primera compuerta (el 16 de enero) fue exitosa, evidenció una conexión física inequívoca entre los canales 1 y 2. Teniendo en cuenta el riesgo de una mayor extensión del vacío entre los pozos 1 y 2, que estaba a menos de 20 m del codo superior de las dos tuberías forzadas, condujo a la decisión de antedatar el cierre de la entrada 1. Se evaluaron completamente los impactos ambientales y sociales de una reducción temporal del flujo corriente abajo del proyecto y se implementaron con éxito las medidas de mitigación. Cabe mencionar que, en una acción paralela, EPM negoció con el Proyecto Hidroeléctrico Salvajina (propiedad de CELCIA y ubicado corriente arriba del embalse de Ituango) la descarga de agua adicional para aumentar el caudal del río Cauca y, por lo tanto, acortar el período de desagüe que iba a ser provocado por el cierre de la última compuerta. Además, EPM decidió liberar flujos adicionales de los embalses propiedad de Porce II y Porce III para complementar los flujos del río Porce (afluente del río Nechi y, por lo tanto, del río Cauca) para mitigar los posibles impactos que la reducción de los flujos del Cauca habría causado en los humedales ubicados corriente abajo de la ciudad de Nechi (unos 150 km corriente abajo de la represa de Ituango).

2.3 Fenómenos observados: equipos hidromecánicos

El cierre de mayo de 2018 de las compuertas de entrada 7 y 8 fue abrupto, al haberse llevado a cabo sin el apoyo de servomotores hidráulicos. Las compuertas se bajaron manualmente tanto como fue posible y luego se dejaron cerrar por gravedad. A pesar de la presencia de un sistema de ventilación correcto, el cierre repentino provocó una vibración extremadamente intensa en toda la caverna de las compuertas de entrada 5 a 8 y, pocas horas después, el desprendimiento de tierra en la zona por encima de estos túneles.

El cierre de la compuerta de entrada n.º 2 (enero de 2019) fue un gran éxito gracias a una planificación extremadamente cuidadosa. La participación del Sr. Erbisti, uno de los principales expertos en compuertas, y de los fabricantes fue clave para la gestión de los riesgos.

El cierre de la compuerta n.º 2 se realizó en aproximadamente 40 minutos, es decir, casi el doble del tiempo recomendado por el fabricante.

La instrumentación temporal instalada en el cuerpo de la compuerta no registró ninguna distorsión mecánica del marco, ni ninguna sobrecarga del sistema en general. Las vibraciones fueron muy elevadas, como se esperaba.

La sorpresa fue, en cambio, la salida masiva de agua de foso de la compuerta de entrada 1 adyacente y la fluctuación de todos los valores piezométricos de ambos canales (1 y 2). Estos eventos evidenciaron una conexión física entre los dos canales.

Un drenaje incorrecto del aire de uno de los circuitos hidráulicos fue el único problema menor reportado durante el cierre de las dos compuertas; causó un retraso en el cierre completo de una de las compuertas.

2.4 Rendimiento observado de las obras subterráneas

El IAP visitó el sitio de Ituango los días 5 y 6 de marzo. El acceso a las obras subterráneas, que había estado funcionando como canales de emergencia durante más de 10 meses, se vio limitado por los estudios en curso relacionados con la seguridad. Sin embargo, el IAP podría tener acceso a las siguientes áreas (consulte la figura n.º 1):

- El túnel de acceso E6 desde donde se podría hacer una valoración general de la casa de máquinas (PH).
- El túnel de acceso al extremo norte de la caverna de la PH, pero no fue posible avanzar más y solo se pudo inspeccionar parcialmente la caverna de transformadores.
- El túnel de acceso a la PH, hasta la bifurcación con la “galería de construcción superior norte”; el túnel de acceso a la PH no era accesible desde allí.



Figura n.º 1: Accesos al complejo de cavernas, 5 de marzo.

Los daños observados y los mecanismos de falla se pueden dividir en tres tipos.

2.4.1 Erosión y falla

Durante el período prolongado de descarga de emergencia, el flujo de agua debe haber desencadenado presiones pulsantes y probablemente penetrado a través de las juntas dentro del macizo rocoso y las cuñas desestabilizadas. La rugosidad de las paredes del túnel de hormigón proyectado y las anomalías debidas a roturas incluso pequeñas podrían generar subpresiones. En la mayoría de los túneles visitados, dicho mecanismo provocó la caída de losas y cuñas limitada por la discontinuidad de la masa rocosa del techo. Los túneles donde ocurrieron tales fallas se pueden restaurar con bastante facilidad.



Figura n.º 2: Mecanismos de erosión y falla; cuñas y losas colapsadas desde el techo de los túneles

2.4.2 Zonas sobrecargadas

Las esquinas o uniones afiladas de las aberturas subterráneas con diferentes orientaciones son áreas típicas de concentración de tensión. Tales áreas sobrecargadas se encuentran en la esquina del túnel de acceso, donde se encuentra con la caverna de la sala de máquinas, como lo demuestra una serie de fisuras que forman partes inestables del macizo rocoso. Se pueden tratar con refuerzo o soporte de hormigón. El 5 de marzo ocurrió un colapso, muy probablemente debido a este mecanismo de falla, durante la visita de IAP en el área de la caverna, en la unión del pozo de aire y la galería de carga ("almenaras").



Figura n.º 3: Fisuras en la esquina del túnel de acceso en la entrada a la caverna de la casa de máquinas.

2.4.3 Erosión del piso del túnel

Se ha observado la destrucción total del piso en varios tramos a lo largo de los canales de emergencia. Eso puede atribuirse al arrastre del material del piso o al colapso de una solera ligera, que probablemente no estaba conectada con el revestimiento del túnel. La erosión puede haber progresado, desde el suelo, socavando las paredes del túnel. Si había una solera presente y afectada, se debe construir una nueva y conectarla estructuralmente al revestimiento del túnel para formar una carcasa continua.



Figura n.º 4: Solera del túnel erosionada y destruida

2.5 Cavity between the wells 1 and 2

Los daños más graves que se han identificado hasta la fecha se encuentran en los pozos de entrada (consulte la figura n.º 5) Los orificios exploratorios revelaron que los pozos 1 y 2 están gravemente afectados. Los colapsos de las paredes laterales han causado grandes vacíos y ciertamente han creado una masa rocosa suelta e inestable en sus límites. Claramente, es necesaria una reconstrucción. El relleno y la lechada para consolidar el suelo circundante deben preceder a la reconstrucción del pozo. Se debe instalar un refuerzo de roca adecuado, dado que los pozos están derrumbados. Será necesario un revestimiento de acero autónomo, porque no se puede contar con la colaboración del macizo rocoso para soportar la presión interna durante el funcionamiento de la planta.

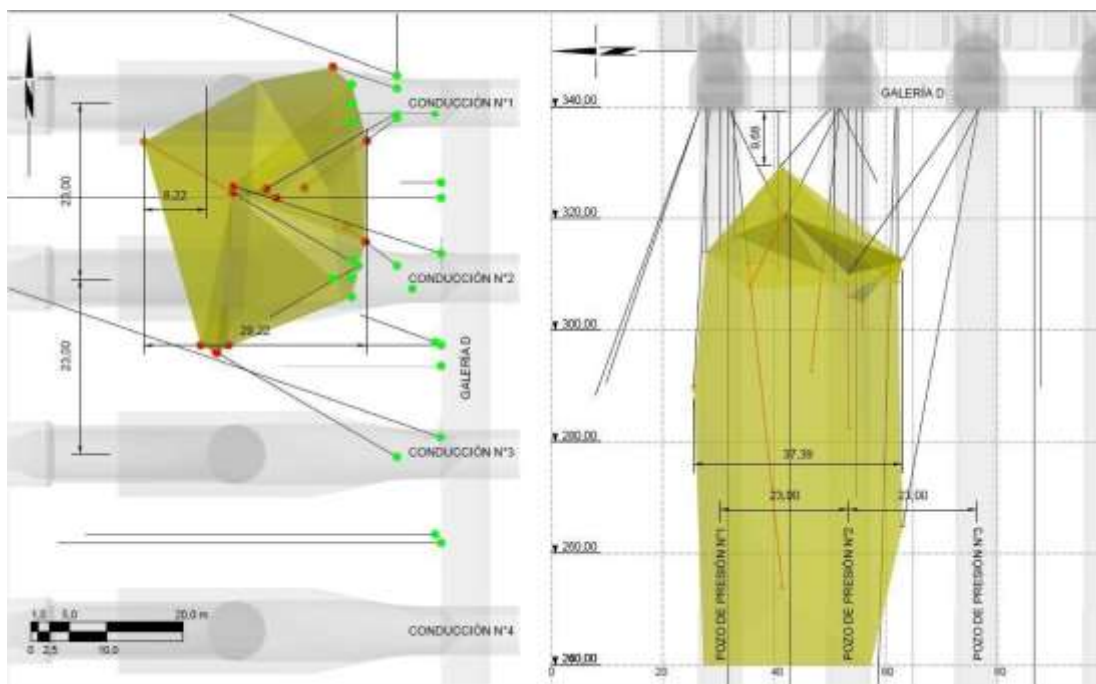


Figura n.º 5: Reconstrucción de la cavidad en el área de los pozos 1 y 2 (del informe Integral, marzo de 2019)

2.6 Complejo de cavernas

No se observaron colapsos generales importantes en el complejo de cavernas constituido por la sala de máquinas y la caverna de transformadores. Las cámaras de carga ("almenaras") merecen una consideración separada en el siguiente párrafo. La caverna de la casa de máquinas parece haber mantenido su geometría y no se evidencian daños irreparables. Al mismo tiempo, puede haber partes en condiciones metaestables que necesitan tratamiento. Se planea una inspección detallada para definir las medidas de refuerzo necesarias para garantizar la seguridad a corto plazo y la estabilidad a largo plazo de esta parte vital del Proyecto. Se recomienda un estudio remoto de las cavernas con LiDar como primer paso de la inspección.



Figura n.º 6: Caverna de la sala de máquinas; febrero de 2019 (izquierda) y marzo de 2019. Se conserva la geometría fundamental.

Las nuevas lecturas de convergencia y las lecturas de otros dispositivos de monitoreo proporcionarán datos fundamentales para revisar el análisis de estabilidad de la caverna. La evaluación de la estabilidad y la inspección detallada de la cavidad permitirán decidir las medidas correctivas apropiadas, que podrían incluir:

- Anclaje rocoso puntual o en patrón;
- Drenaje y orificios de alivio del macizo rocoso;
- Capa adicional de hormigón proyectado, particularmente en el techo;
- Posiblemente, vigas ancladas (correas).

2.7 Cámara de carga norte ("almenara")

Un área de inestabilidades masivas esperadas es el de las cámaras de carga ("almenaras"). El acceso limitado reveló una falla extensa en el límite más septentrional de la "almenara norte", con conexión clara a la caverna de la PH. Lo más probable es que las aguas embravecidas encontraran su camino hacia el túnel de fuga a través de la almenara norte. Esto resultó en el colapso local del pilar de roca de 30 m de ancho que separa el la sala de máquinas y la cámara de carga. La reconstrucción requerirá un diseño detallado y técnicas mineras cuidadosas. Aunque las limitaciones de acceso actuales no permiten una apreciación completa del volumen involucrado, se espera que las medidas de rehabilitación sean de

complejidad comparable a la de los pozos de presión 1 y 2. Las siguientes figuras muestran el colapso como se puede ver desde la “galería de construcción superior norte”, y una sección transversal de las aberturas subterráneas.



Figura n.º 7: Colapso extenso en la almenara norte con conexión directa a la caverna de la sala de máquinas

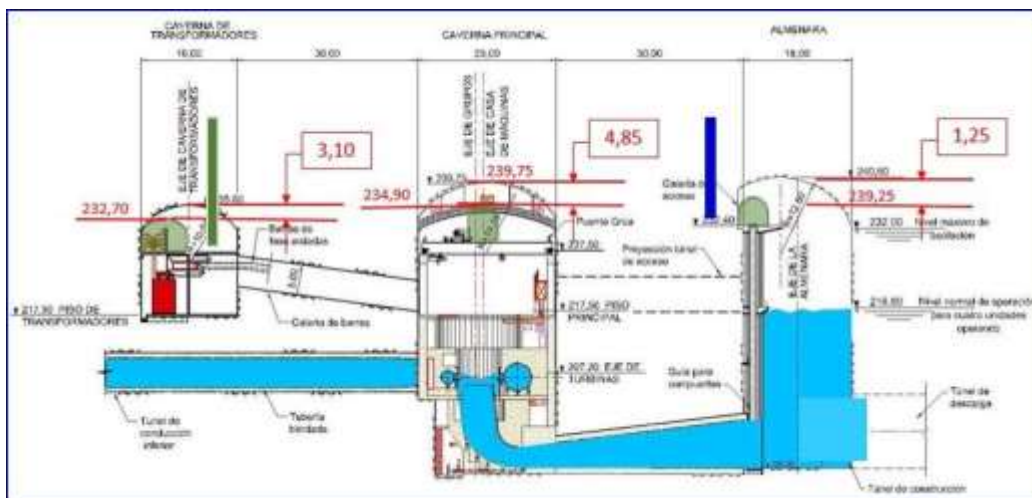


Figura n.º 8: Pilar de roca de 30 m de ancho que separa la caverna de la sala de máquina y la almenara norte, que ha sido colapsada, en el lado norte, por las aguas embravecidas.

2.8 Otras ocurrencias de inestabilidad: observadas y esperadas

Se están realizando inspecciones detalladas en todas las aberturas subterráneas. Se debe prestar especial atención a las zonas afectadas por las dos fallas principales (Tocayo y Mellizo).

Otra zona donde podrían haberse originado cavidades es la de los pozos de entrada 3 y 4. Esos canales de agua estuvieron expuestos a descargas de emergencia durante 10 días y tuvieron que cerrarse después de un ruido intenso y

vibraciones intensas en la zona de entrada. Se prevén perforaciones para investigar la zona, y es probable que se descubran algunas cavidades.

El refuerzo del suelo de la zona podría ser necesario, ya que el macizo rocoso probablemente esté relajado, debido a las altas tensiones impuestas por el flujo furioso durante la fase de descarga de emergencia.

2.9 Medidas prioritarias en curso

Se está realizando una inspección detallada de todas las aberturas para decidir si se debe aplicar un refuerzo puntual o un patrón. En ciertos casos (por ejemplo, las cavernas principales), pueden ser necesarias vigas ancladas.

Las medidas correctivas o de rehabilitación prioritarias tienen como objetivo eliminar el estado de alerta para la población corriente abajo, para que puedan volver a la vida normal. Dichas medidas consisten en los dos tapones del túnel de desvío derecho y la instalación de compuertas de la GAD.

Garantizar condiciones de acceso seguras en todos los niveles de las obras subterráneas es esencial. La evaluación del estado del hormigón de primera fase de la sala de máquinas y de las partes incrustadas más bajas merece una atención especial.

Los dos conjuntos de actividades requieren medidas de seguridad cuidadosas para el trabajo subterráneo, y claramente están interrelacionados.

La naturaleza de los fenómenos que han tenido lugar bajo tierra es altamente impredecible. No hay precedentes, en la industria hidroeléctrica, de una sala de máquinas y cavernas asociadas (caverna de transformadores, cámaras de carga, tubos de aspiración, etc.) expuestas a aguas turbulentas y flujo de escombros durante un período de nueve meses.

Es inevitable y apropiado que el proceso de investigación y diseño avance en paralelo, como gestión adaptativa. La gestión adaptativa implica intercambio continuo de información entre los equipos de investigación y el diseño. Se debe usar el método de "aprender haciendo".

3 Evaluación de daños a equipos electromecánicos

Cumpliendo con las disposiciones esenciales de seguridad, el IAP tuvo la posibilidad de visitar el área de la cámara del pozo norte y de la caverna de la sala de máquinas desde la galería del lado norte y realizar una breve inspección visual de la galería de cables que ocupa la parte superior de la galería del transformador. Esta última no era accesible.

Los daños físicos debidos a la acción del agua, la caída de rocas y la pérdida de parte de las obras subterráneas son los efectos evidentes de la inmersión prolongada del equipo.

Se dispondrá de un estudio detallado de los daños a los equipos electromecánicos tan pronto como la seguridad de las obras subterráneas y las actividades de desagüe lo permitan.

Sin embargo, ya es posible afirmar que los daños a los equipos electromecánicos están dentro del rango, aunque en el extremo superior, de las estimaciones de agosto de 2018.

Tres de las cuatro compuertas de los tubos de aspiración ya no están en su lugar, colapsadas junto con la parte de la cámara del pozo donde se instalaron.

Las dos grúas aéreas todavía están en su lugar. El personal de EPM confía en que puede obtener una grúa adecuada para la actividad temporal reutilizando las dos grúas y reemplazando todos los componentes eléctricos. La grúa tendrá que ser reemplazada para una operación a largo plazo.

El foso donde el generador n.º 3 estaba en estado avanzado de montaje parece vacío. El foso del generador n.º 4 está cubierto por escombros.

El nivel más alto del edificio de control en el extremo norte de la caverna ya no existe. El sistema de control estaba casi completamente instalado antes del incidente, y todos los equipos computarizados móviles se retiraron antes del inicio de la descarga de emergencia.

Los 10 cables monofásicos de alta tensión instalados están físicamente dañados y

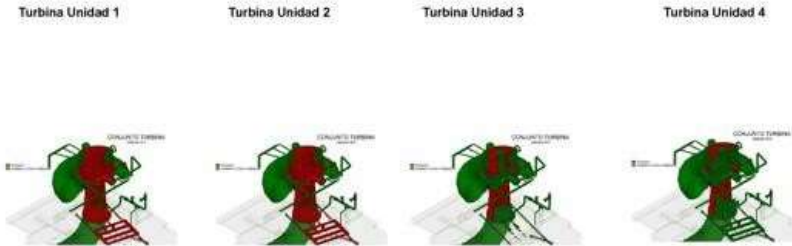
serán reemplazados. Los conductos colectores de fase aislada de las unidades 3 y 4, que son mecánicamente frágiles, se perdieron.

En términos simples, la suposición de que todos los equipos electromecánicos instalados en el momento de la inundación de la central eléctrica serán reemplazados no está lejos de la verdad.

Dos piezas del suministro electromecánico merecen una mención especial: las piezas integradas de las unidades y los transformadores.

En el momento de la inundación de la sala de máquinas, el progreso de la instalación de la parte más baja de las unidades era como se muestra en la siguiente figura (el color verde muestra el equipo instalado).

Progress of installation at the time of flooding the north power house



Progress of installation at the time of flooding the south power house

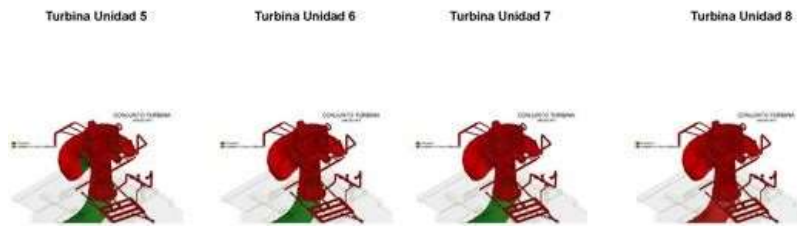


Figura n.º 9: Progreso en la instalación al momento de la inundación

La instalación de las turbinas del lado norte estaba muy avanzada, especialmente la unidad 3 y la unidad 4, que se iban a poner en marcha primero.

Se desconoce la situación de la unidad 4, dado que el área está cubierta por escombros, pero hay motivos de optimismo para las piezas incrustadas, especialmente las más bajas.

La unidad 2 está en malas condiciones y la unidad 1 es la más afectada. La situación de los tubos de aspiración es desconocida, y depende del tiempo que el flujo de agua necesita para encontrar una forma alternativa de fluir a través del túnel de fuga.

La necesidad de reemplazar los tubos de aspiración puede tener consecuencias sobre el cronograma, como se detalla en el párrafo correspondiente.

Estado de la unidad 1 al momento de inundar CM

Convención	Estructura	Estado
	Lozas 188.50-193.00-199.00	Ejecutado
	Muros aguas arriba y aguas abajo	Ejecutado
	Túnel de aspiración	Ejecutado
	Escaleras	Ejecutado
	Muros unidad 199.86-203.50 y 211.90-216.62	Ejecutado
	Masivo unidad	Ejecutado
	Vigas y Columnas	Ejecutado
	Galería de barras	Ejecutado
	Pendiente	Pendiente

Fuente: Interventoría

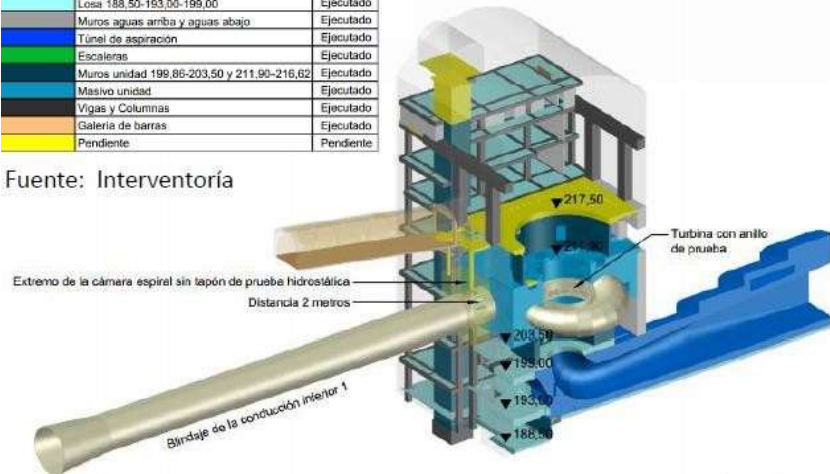


Figura n.º 9: Progreso en la instalación de la unidad 1 al momento de la inundación

En el momento de la inundación de la sala de máquinas, se habían colocado completamente 12 transformadores monofásicos de la casa de máquinas norte, y el de repuesto, incluidos los auxiliares y el lavado de aceite dieléctrico (consulte la figura a continuación).

Progress of installation at the time of flooding the north power house

Typical for all Units



Figura n.º 11: Avances en la instalación al momento de la inundación de la sala de máquinas norte

Dos transformadores monofásicos de la sala de máquinas sur se encontraban en condiciones similares; cuatro se encontraban en condiciones de transporte (con nitrógeno); y seis se encuentran actualmente en espera en un puerto colombiano.



Figura n.º 11: Avances en la instalación de los transformadores al momento de la inundación

La investigación visual preliminar realizada por EPM no observó ningún signo de pérdidas de aceite de los transformadores y, excepto la presencia de escombros pequeños en la caverna de transformadores, no se informaron daños en esta área.

Como se ve desde la abertura en el piso de la galería de cables, al menos parte de los transformadores están en su lugar. El asunto es relevante porque EPM tiene en el almacén solo 6 de los 12 transformadores monofásicos necesarios para energizar las cuatro unidades de la casa de máquinas norte. La decisión final sobre su disponibilidad a largo plazo puede depender del acuerdo con el seguro.

3.1.1 Breve actualización sobre equipos hidromecánicos

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: 22 600 m³/s (PMF) Operación: servomotores oleodinámicos, control único y estaciones oleodinámicas para cada compuerta + control común</p>	Ya en funcionamiento; se han completado las pruebas y el control común.	En caso de terremoto, las rocas pueden caer desde la pendiente y golpear el edificio del generador diésel. Se recomienda la evaluación de riesgos.
<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>	Ya en condiciones de funcionamiento; se han completado las pruebas y el control. Instalación de revestimiento de acero debidamente completada	Ninguno

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

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. Operación: servomotores oleodinámicos.	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 2.	Las compuertas se cierran en condiciones de presión equilibrada y, en caso de emergencia, bajo el cabezal hidráulico máximo y el flujo nominal de la unidad.
Compuertas de desvío Compuertas de dos volantes, 9 m x 18 m	EPM está trabajando para bajar las compuertas a través de una grúa fija temporal ya instalada para tapar el ADT.	Durante el transitorio hidráulico del ADT, las compuertas se elevaron de nuevo a la cámara de compuertas y se dañaron.
Compuertas de la salida inferior	Se bloquearán y taparán sin haber sido utilizadas.	

El IAP pudo visitar¹ las compuertas de entrada y las ataguías de servicio que inicialmente se colocaron y levantaron utilizando grúas móviles, y se mantuvieron en su posición utilizando dispositivos de retención. Los sistemas oleodinámicos están actualmente operativos para las compuertas de entrada 1 y 2, y se utilizaron para su cierre.

Las compuertas de entrada están diseñadas para funcionar bajo presión equilibrada y, en caso de emergencia, bajo el cabezal hidráulico máximo y el flujo nominal de la unidad. Los límites técnicos reales de dicha operación de emergencia se investigaron en detalle al planificar el cierre de las compuertas de entrada 1 y 2. Eso se hizo con el apoyo de los fabricantes (incluidos fabricantes distintos del que suministró las compuertas). De manera bastante inusual, el resultado de la reevaluación permitió extender la condición de operación: las compuertas se consideraron capaces de cerrarse bajo cualquier flujo razonable bajo el cabezal hidráulico máximo. Este resultado también es tranquilizador para la operación futura. El cierre de las compuertas anulares de la turbina permite equilibrar las presiones pero, en caso de grandes fugas de los canales de entrada, sería imposible lograr condiciones hidrostáticas. Por lo tanto, en caso de colapso en cualquier parte del sistema de entrada que provoque un flujo incontrolado de agua, se tiene suficiente confianza de que será posible detener dicho flujo.

Las actividades en las compuertas de entrada y sus sistemas operativos están en su mayoría en espera porque no están en la ruta crítica, y la atención de EPM a estas áreas se concentra en trabajos de refuerzo subterráneo y estabilización de las pendientes.

3.1.2 Breve actualización sobre el patio de maniobras de GIS de 500 kV

Durante la visita de marzo de 2019, el IAP recopiló información y pruebas documentales de que el patio de maniobras de 500 kV ya está completado, aunque será necesario reinstalar el cable de alimentación de alta tensión, incluidas sus conexiones con el patio de maniobras de GIS de 500 kV. EPM realizó pequeños trabajos de estabilización en la pendiente sobre el área del patio de maniobras.

¹ No eran accesibles en marzo de 2018 debido al desprendimiento de tierra.

4 Control de los niveles del embalse

4.1 General

La posibilidad de controlar el nivel del embalse de Ituango es extremadamente limitada en la configuración actual. Solo la IDG, con un umbral a 260 msnm, ofrece capacidad parcial en ese sentido. Su diseño ha sido revisado para permitir la descarga de hasta 750 m³/s y la mejora está en curso. Esto se trata en el siguiente párrafo.

Si bien dicha mejora es ciertamente parte de la solución, será insuficiente para garantizar el control del embalse cuando los flujos entrantes de los ríos se acerquen o superen los 750 m³/s, lo que puede ocurrir anualmente durante los períodos de lluvia.

4.2 Galería de descarga intermedia a elevación 260 m

El monitoreo exhaustivo del comportamiento del tapón y de toda la parte del túnel corriente arriba de las compuertas de la galería de descarga intermedia (IDG) hizo que EPM se sintiera confiada de comenzar a trabajar en esa parte del Proyecto. Las actividades en curso incluyen reforzar el revestimiento de hormigón y completar la lechada de contacto detrás del revestimiento de acero. El revestimiento de acero se extiende pocos metros corriente arriba de las compuertas de emergencia. La longitud total del revestimiento de acero corriente arriba de las compuertas (unos pocos metros), en el tramo de la compuerta y corriente abajo de las compuertas es de 100 metros.

EPM abordó las recomendaciones del IAP para reforzar el revestimiento del túnel y aumentó la capacidad nominal de la IDG de los 450 m³/s anteriores, correspondientes al flujo ambiental requerido, a 750 m³/s. El IAP acepta la decisión que agrega una capacidad de descarga muy necesaria al Proyecto.

El régimen hidráulico corriente arriba y corriente abajo de las compuertas es el mismo que en el diseño original; respectivamente, flujo de canal presurizado y abierto. Se ha aumentado la altura de dos muros verticales del canal corriente abajo y se han reforzado los muros con anclajes de roca. El IAP asume que el Diseñador ha verificado que el flujo más alto es compatible con los resultados de las pruebas del modelo físico y le gustaría tener confirmación al respecto.

Se están finalizando las medidas estructurales a lo largo del revestimiento de la IDG². El IAP considera que tales disposiciones son adecuadas, también con base en la visita realizada a las obras en curso. Al mismo tiempo, el IAP desea subrayar que el aumento de la capacidad nominal determina una mayor carga hidrodinámica, lo que implica una mayor atención a los detalles, en particular al acabado superficial del revestimiento.

EPM aún está evaluando diferentes opciones para el diseño del tramo del túnel entre el portal de entrada y el tapón existente. La opción de utilizar revestimiento de acero es obviamente la más conservadora y es recomendable en este componente crítico del Proyecto.

Las siguientes reglas de operación de compuerta se aplican a la IDG actualizada:

² Re. Presentación VP Proyectos e Ing EPM _ Misión BID marzo 2019.

Elevación del embalse	Apertura de compuertas	Descarga nominal desde la IDG
Por encima de 405 msnm	Compuertas cerradas. Descarga a través del aliviadero de superficie.	cero
405 msnm	80 %	750 m ³ /seg
390 msnm	90 %	750 m ³ /seg
350	Completamente abiertas.	750 m ³ /seg

Con el diseño actual, la parte corriente arriba de la IDG no sería accesible para su inspección durante la operación del proyecto. Además, las compuertas operan bajo una carga estática superior a 150 m, es decir, en el lado alto del rango de operación para este tipo de compuertas. La posibilidad de acceder a todas las obras de control es recomendable dado el nivel de problemas que ha experimentado Ituango.

El portal de entrada de la IDG será construido por un rover acuático, lo que hace que la adición de un dispositivo de cierre adicional sea un trabajo desafiante. El IAP recomienda considerar esta posibilidad y señala que, recientemente, una necesidad similar surgió en la represa de Mosul (Irak). Aunque extremadamente compleja en su operación, la disponibilidad de compuertas de mamparo almacenadas durante aproximadamente 50 años bajo el agua demostró ser efectiva.

4.3 Salidas de nivel medio adicionales en estudio

El aumento de la capacidad hidráulica de la IDG es una medida de diseño positiva que mejorará el funcionamiento del Proyecto. Al mismo tiempo, dicha medida es insuficiente para garantizar un control adecuado de los niveles del embalse en todas las condiciones previsibles durante la vida del plan.

El IAP reiteró su recomendación de dotar a Ituango de una salida de nivel medio (MLO) adicional por, al menos, dos razones:

- Seguridad: la parte superior del embalse debe bajarse en condiciones de emergencia (por ejemplo, después de un terremoto o por manifestaciones de erosión interna).
- Operación: para acceder a las áreas de la compuerta de entrada, para mantenimiento o reparaciones extraordinarias.

Durante la visita de marzo, al IAP le complació saber que el Diseñador está estudiando opciones para añadir una instalación de MLO. El IAP desea revisar tales opciones, incluida la opinión del panel de expertos sobre ellas.

La construcción de la MLO adicional no es esencial para la entrada en operación del Proyecto, pero su implementación debe cumplir con un plan de acción con plazos de unos pocos años después del inicio de la operación del Proyecto.

5 Estabilidad de la orilla derecha

Las pendientes de la orilla derecha se encuentran en condiciones críticas de estabilidad. Parte de la zona fue desestabilizada por los acontecimientos en la zona por encima de los túneles de desvío, que siguió al colapso de la GAD principal.

Estas inestabilidades afectan la cubierta y la zona de roca desgastada, que no ha sido eliminada ni modelada. Dichos movimientos se verán reforzados por la fluctuación del embalse durante su funcionamiento, o durante la reducción del nivel del embalse.

En su informe de septiembre de 2018, después de revisar y comentar el análisis de estabilidad realizado por el Diseñador, el IAP recomendó proteger dichas pendientes extendiendo el tratamiento y la protección corriente arriba de las pendientes del aliviadero, hasta el área desestabilizada sobre los dos túneles de desvío.

La extensión cuesta arriba de las medidas de protección de pendientes es necesaria para salvaguardar la entrada hacia la sala de máquinas (zona “El Romerito”), así como la entrada de la galería de descarga intermedia.

El IAP recomendó que los trabajos de protección deberían tener como objetivo eliminar la mayor cantidad posible de la zona desgastada y proceder con el uso de excavación en destroza. El anclaje con cables se utilizará según corresponda. Afortunadamente, la morfología de la pendiente se aplana pronto cuesta arriba donde está presente una concavidad, probablemente asociada a un antiguo desprendimiento de tierra.



Figura n.º 12: Pendiente sobre las estructuras de entrada y trabajos de tratamiento iniciados cuesta arriba.

Durante esta misión, el panel visitó las obras en curso en la parte alta de la pendiente, las cuales cuentan con reperfilado con bancos y estabilización mediante anclajes del desprendimiento en “El Romerito”; se prevén drenajes superficiales y drenajes perforados. Tanto el diseño como la implementación se consideran satisfactorios. Este tratamiento también contribuirá a la estabilidad del reperfilado extendido de pendientes recomendado por el IAP.



Figura n.º 13: La parte superior del desprendimiento en el “El Romerito”, en tratamiento con hormigón proyectado y anclajes. Excavación escalonada en la fotografía de la derecha.

El IAP entiende que se está desarrollando el diseño de la extensión recomendada de los trabajos de estabilización.



Figura n.º 14. El área desestabilizada por encima de los dos túneles de desvío. En el extremo superior, se aprecia la forma del desprendimiento de tierra en "El Romerito".

El monitoreo remoto de pendientes (por satélite) alrededor de la represa comenzó en julio de 2018, y debe extenderse en el área corriente arriba. El IAP recomienda añadir objetivos geodésicos, piezómetros e inclinómetros en todos los bancos del tratamiento extendido.

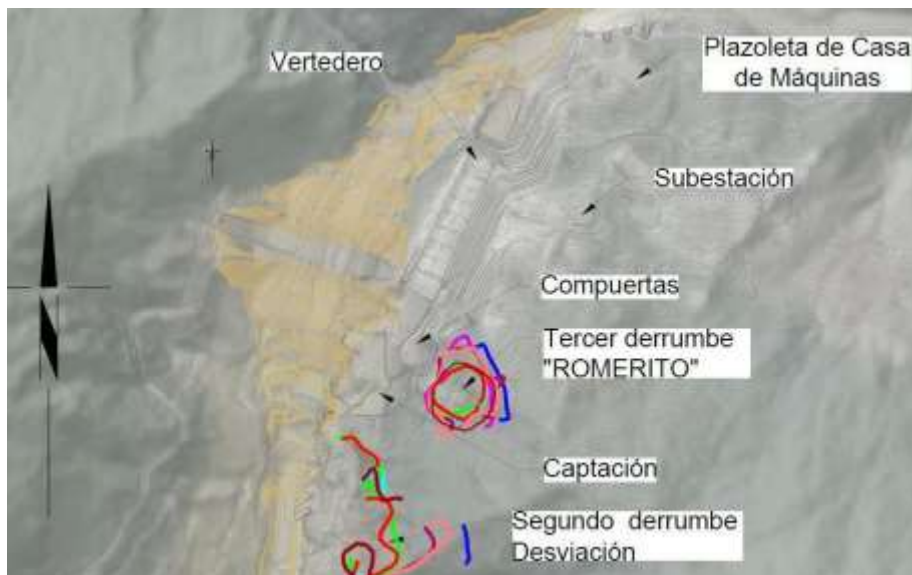


Figura n.º 15: Monitoreo satelital de la orilla derecha (de Integral 2019)

Se detectaron fisuras en las pendientes permanentes por encima del aliviadero. Los extensómetros de unión se usan para monitorear la evolución de los movimientos. El Diseñador debe reevaluar la estabilidad del área para identificar la necesidad de posibles medidas de fortalecimiento.

6 Represa

La elevación de la represa al nivel final de la cresta avanza según lo planeado y el francobordo es completamente satisfactorio. La pared de corte de plástico en la parte superior ha reducido la filtración de 35 a 7 litros por segundo (l/seg). El contacto de la pared y la roca en el estribo izquierdo estaba enlechado.

La necesidad de trabajos adicionales de inyección de lechada en la orilla izquierda se analizó en el informe del IAP de septiembre de 2018. El origen de dicha filtración es la galería de drenaje izquierda en el nivel +250, donde los orificios iniciales de lechada de cortina no estaban orientados para interceptar las uniones subverticales. En este estribo, la filtración total alcanzó los 80 l/seg. Aunque no es excesivo, se identificaron medidas correctivas y se ejecutaron lechadas adicionales. Sin embargo, la filtración general hoy en día no ha cambiado sustancialmente. Actualmente, se informan unos 50 l/seg, y sigue los niveles del embalse. Se recomienda una inyección de lechada multidireccional adicional. Toda el agua filtrada está limpia, según el informe.

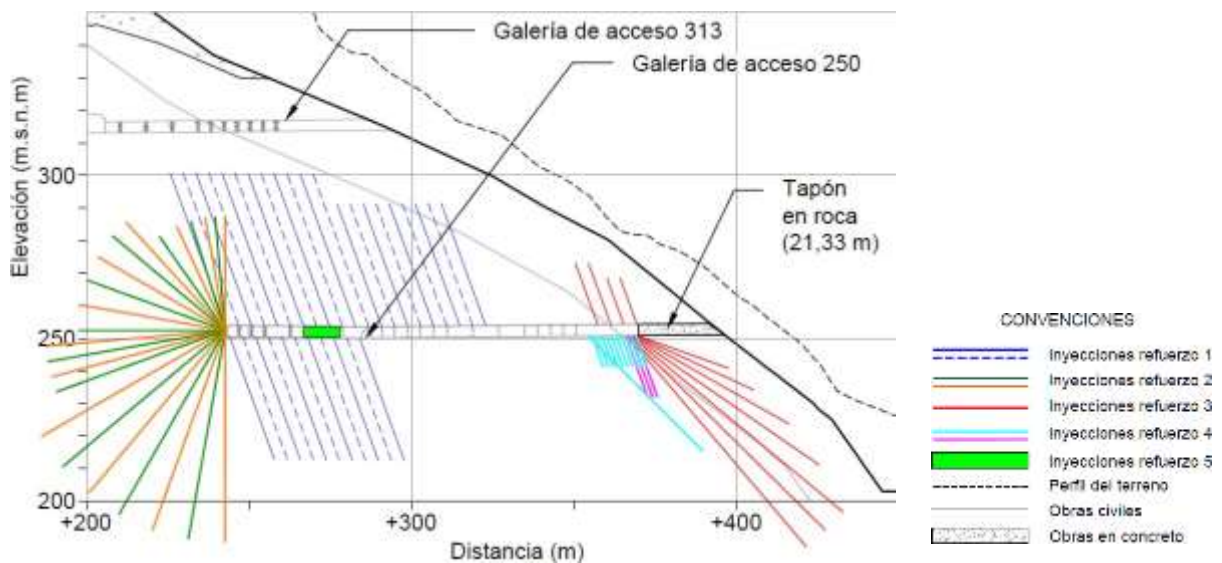


Figura n.º 16: Lechada adicional en estribo izquierdo (de Integral 2019)

Los niveles piezométricos en la cimentación muestran cambios significativos solo en un área confinada en el estribo izquierdo. El diseño del contacto entre el núcleo y el aliviadero es satisfactorio: el filtro de tres capas corriente abajo se ensancha en las áreas de contacto del estribo. Se ha aumentado el índice de plasticidad del núcleo en la zona de contacto para mitigar el agrietamiento.

7 Aliviadero

Actualmente, y hasta que se complete la IDG, el aliviadero superficial constituye la única instalación de descarga de Ituango. Se está operando de manera muy juiciosa, regulando las aperturas de las compuertas para cumplir con los siguientes criterios:

- Garantizar un caudal fluvial gestionado de no menos de 450 ³/s, para la salud del río y los usos del agua corriente abajo;

- Mantener el efecto de rampa para evitar el impacto prolongado del agua en la pendiente escalonada debajo del borde corriente abajo.

Las compuertas radiales están diseñadas para fines de regulación y están haciendo su trabajo de forma notoria.

Durante la visita de marzo, el aliviadero estaba descargando $650 \text{ m}^3/\text{s}$ y el patrón de flujo era de acuerdo con el diseño. Las dos líneas de aireación proporcionaban el arrastre de aire requerido (consulte la figura a continuación).



Figura n.º 17: Aliviadero en funcionamiento

Los estudios del área de la piscina de inmersión serán necesarios durante la operación y después de eventos de alta descarga, para verificar la evolución de los límites de la piscina.

Las pendientes sobre el área de la piscina de inmersión están saturadas por la niebla y desgastadas en los pies. 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. Al mismo tiempo, es necesario hacer un seguimiento de su evolución.

8 Embalse

8.1 Estabilidad de los bordes

El IAP realizó un vuelo en helicóptero dedicado sobre todo el embalse para detectar posibles inestabilidades y desprendimientos de tierra a gran escala.

No se reconocieron características geomorfológicas que denotaran grandes desprendimientos 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 antecedentes estables en términos de retención de pendientes. No pueden generar desprendimientos de tierra significativos.



Figura n.º 18: Formas de erosión en la cuenca del embalse, con antecedentes estables a nivel general

La erosión alimenta afluentes formando pequeños deltas de material fino en la confluencia con el embalse. Dichos deltas solo contribuyen a la sedimentación del embalse y no pueden generar olas.

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 desprendimientos de tierra de tamaño reducido y pequeña escala, rotacionales o planares, y pueden generarse otros nuevos por el funcionamiento o las fluctuaciones del embalse. No pueden generar olas de preocupación.



Figura n.º 19: Desprendimientos a pequeña escala en el borde del embalse. Se producen desprendimientos similares con frecuencia.

Los estudios existentes insinuaron 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 fuertes en la geomorfología y las 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 desprendido no es compatible con la morfología cuesta arriba. Toda el área se caracteriza por la erosión persistente.



Figura n.º 20: El área de Guasimo, con la hipótesis de ser un antiguo megadesprendimiento. No se encontraron evidencias fuertes en la forma y las características geomorfológicas.

Incluso en la hipótesis extrema de que se trataba de un antiguo desprendimiento de tierra, no hay características que permitan pronosticar su futura reactivación.

8.2 Gestión de escombros

La emergencia de abril de 2018 no permitió completar la materia vegetal producida por las operaciones de limpieza del embalse. Los troncos flotantes han formado una base sobre la cual ha crecido la vegetación produciendo varias islas en áreas cóncavas de los bordes del embalse. En algunos lugares, donde el embalse se estrecha, la "alfombra verde" cubre todo el ancho del embalse (consultar fotografía).



Figura n.º 21: Residuos vegetados flotando en el embalse

Inevitablemente, la próxima gran inundación moverá dichos escombros hacia el aliviadero. Se debe preparar una sección dedicada del plan de preparación para emergencias (EPP) para gestionar esa eventualidad.

8.2.1 Tendencias de sedimentación

Siguiendo el discurso iniciado durante su primera visita, el IAP recomienda planificar estudios de embalse destinados a proporcionar elementos tempranos para fines de gestión de la sedimentación. Se recomiendan dos tipos de estudios:

- Estudios batimétricos del embalse, y
- Distribución granulométrica de los depósitos del delta que comienzan a acumularse en el límite corriente arriba del lago.

Estos últimos son importantes para evaluar la esperanza de vida del embalse, como se muestra en la siguiente figura³.

³ Adaptado de Morris, G. y Fan, J. (1998) "Reservoir Sedimentation Handbook" McGraw-Hill. ISBN: 007043302X.

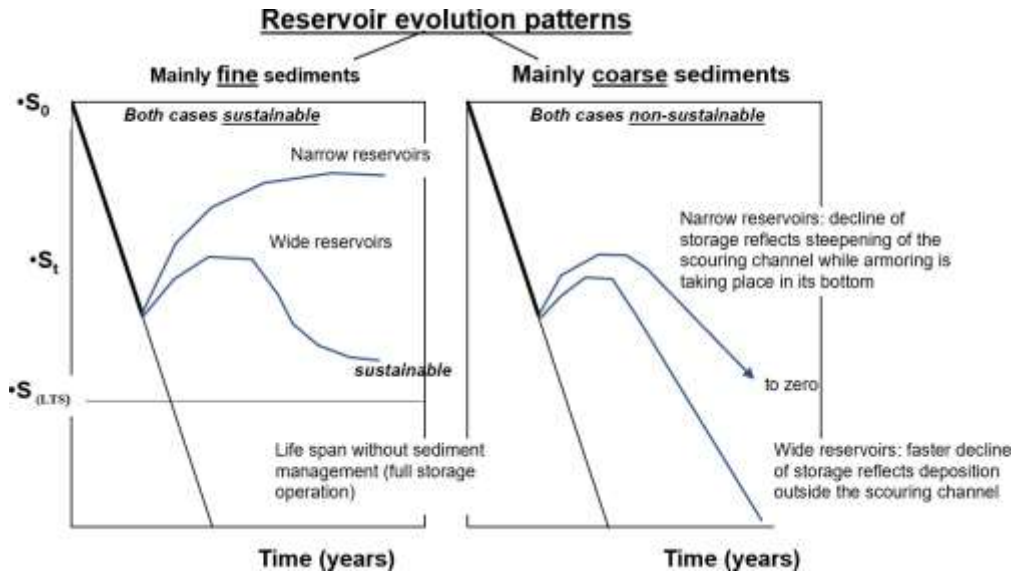


Figura n.º 22: Patrones de evolución del embalse

Los dos gráficos representan la disminución de la capacidad de almacenamiento (" S ") en el tiempo. La disminución continúa hasta que se implementa el lavado de sedimentos. El lavado de sedimentos podría ser una opción a largo plazo para Ituango, que podría realizarse a través de la MLO adicional que se está planificando.

Si los sedimentos son principalmente finos (diagrama de la izquierda), se puede obtener una recuperación significativa de la capacidad de almacenamiento a largo plazo y se puede lograr una capacidad sostenible. La curva superior representa el caso de embalses estrechos, en los que el canal de surcos durante el lavado representa una parte significativa de la capacidad del embalse. La curva inferior se refiere a embalses anchos, donde el canal de surcos solo ocupa una fracción de la capacidad del embalse.

El diagrama de la derecha ilustra el caso de sedimentos principalmente gruesos. La diferencia clave es que no se puede alcanzar una capacidad de almacenamiento sostenible a largo plazo, y solo se puede extender la vida útil del embalse con operaciones de lavado. De hecho, cuando el delta de sedimentos gruesos llegue a las obras de descarga, la erosión y el desgaste serán tales que dañarán rápidamente cualquier estructura de ingeniería, lo que desalentará las operaciones periódicas de lavado.

9 Finalización del Proyecto

9.1 Cronograma

El cronograma proporcionado por EPM antes de la misión, y con fecha del 18 de febrero de 2019, se mantiene sustancialmente sin cambios con respecto al de septiembre de 2018.

De acuerdo con el calendario actual, EMP ha adoptado una estrategia de finalización con las mismas dos fases planificadas en septiembre de 2018:

- Unidades 1-4 (sala de máquinas norte), finalización a fines de 2021.
- Unidades 5-8 (sala de máquinas sur), finalización a fines de 2023.

Tentativamente, las cuatro primeras unidades se pondrán en servicio, en orden inverso, en mayo, julio, septiembre y diciembre de 2021.

EPM confía en alcanzar el hito de 2021 y ha presentado la garantía financiera pertinente al regulador para obtener derechos de acceso al mercado (dicha garantía financiera ya se perdió una vez a finales de 2018).

Con base en el estado actual de la evaluación de los daños a las obras subterráneas, queda claro que las obras de reparación son el factor de control de cronograma. Esto también se debe a que todo un conjunto de equipos electromecánicos, originalmente asignados a las unidades 5 a 8 (sala de máquinas sur), ya está disponible en el almacén de EPM.

A pesar del estado inicial de las actividades de investigación subterránea, EPM ilustró partes seleccionadas del cronograma como se describe a continuación.

Actividad	Observaciones
Tapones en el ADT y el RDT	Las dos intervenciones se encuentran en la ruta crítica para garantizar la posibilidad de que las familias reubicadas regresen a sus casas y que EPM inicie la reconstrucción de las infraestructuras, entre ellas los cuatro puentes arrasados por la descarga repentina de más de 4000 m ³ el 12 de mayo de 2018. La consolidación del pretapón 1 del RDT debe completarse en abril de 2019, mientras que las otras actividades, no en la ruta crítica, deben completarse entre noviembre y enero (2020). La instalación de las compuertas de desvío del ADT y el sellado final de hormigón deben completarse en julio de 2019, y las demás actividades, no en la ruta crítica, deben completarse dentro del final del año.
Galería de descarga intermedia	Operativa en los primeros meses de 2020.
Salida de nivel medio adicional	Actualmente en estudio, la construcción debe completarse en dos o tres años.
Sala de máquinas norte	Los canales 1 a 4 y todas las obras civiles se rehabilitarán dentro del 2021 a tiempo para la puesta en marcha de las unidades correspondientes (las unidades 4 y 3 se completarán primero). El cronograma para la instalación, la prueba y la puesta en marcha del equipo, actualmente establecido en 13 meses, es razonable.

Por el momento, hay dos actividades para completar las unidades 1 a 4 que plantearon motivos de preocupación:

- Revestimiento de acero de los pozos verticales

El diseño original preveía el revestimiento de acero solo en la sección horizontal entre el codo inferior y la caja en espiral de las unidades. Dados los severos daños al macizo rocoso en la zona de los pozos de presión (consulte la sección 2.5), se debe asumir que el suelo ha perdido su capacidad de colaborar con el revestimiento en cuanto al soporte de las presiones internas. La adopción de un revestimiento de acero autónomo parece inevitable y es recomendada por el IAP. La decisión debe tomarse rápidamente para evitar retrasos en la puesta en marcha de la primera unidad. El tiempo para el diseño, la fabricación, el transporte, la instalación y la prueba del revestimiento debe incluirse en un cronograma revisado.

- Reemplazo del tubo de aspiración

Todavía no se sabe si el hormigón de segunda fase para los tubos de aspiración 1 y 2 requiere reemplazo. Al ser el primer componente de las unidades en instalarse, su adquisición, fabricación, transporte e instalación pueden afectar el cronograma de las unidades 1 y 2.

Hasta que un mejor conocimiento informe una planificación confiable, la gestión adaptativa será el principio rector para la implementación de obras de reparación subterráneas. Dicho esto, la decisión de EPM de mantener el cronograma anterior parece sólida, y EPM podrá emitir una actualización en los próximos meses después de completar el desagüe de las obras subterráneas y la evaluación de las obras de rehabilitación necesarias.

9.2 Costes

Las estimaciones de costes son aún más inciertas que el cronograma. Por el momento, hay muy pocos elementos disponibles para actualizar de forma fiable las estimaciones que se realizaron en septiembre de 2018.

Con base en el conocimiento actual, es seguro mantener las estimaciones de septiembre para fines financieros. Una vez disponible el diseño de las obras de rehabilitación subterráneas, se actualizarán las estimaciones de costes. Previsto para el tercer trimestre de 2019.

10 Conclusiones y recomendaciones del IAP

Para comodidad del lector, el presente capítulo resume las principales conclusiones del IAP que se encuentran dispersas en los capítulos anteriores.

10.1 Progreso desde julio de 2018

La situación del Proyecto ha evolucionado considerablemente desde agosto de 2018.

- Se detuvo la descarga de emergencia a través de los canales de alimentación.
- Se están evaluando las condiciones de las obras subterráneas a través de las cuales se realizó la descarga de emergencia durante nueve meses, lo cual es una tarea muy desafiante.
- La creación de grandes cavidades entre los pozos de presión 1 y 2, y entre la caverna de la sala de máquina y la cámara de carga del lado norte, ha sido un hallazgo negativo, aunque explicable dado el extenso período de carga dinámica de los canales.
- El hallazgo más satisfactorio ha sido el techo intacto de la sala de máquinas.
- En general, a la espera de una evaluación completa de las condiciones del macizo rocoso, el balance parece ser positivo.
- El diseño y la metodología para el taponamiento del DT2 y la GAD han demostrado ser más exigentes de lo esperado, y se están movilizando contratistas especializados.

10.2 Evaluación de la seguridad

- La seguridad hidrológica ya no es un problema, el corte de la cresta de la represa se ha completado y el dique de la represa está progresando rápidamente hasta su elevación final.
- Se están evaluando las condiciones de seguridad de las obras subterráneas; esta es una tarea crítica porque controla el cronograma del proyecto y la posibilidad de tapar definitivamente la GAD y el DT2 para eliminar las condiciones de alerta a la población corriente abajo.

- Las investigaciones subterráneas requieren una mayor atención a la salud y la seguridad de los trabajadores.
- El rendimiento de la represa es tan bueno como el observado en agosto.

10.3 Estabilidad de las pendientes

Se están ejecutando obras de refuerzo de las pendientes en la parte alta de la orilla derecha en la zona afectada por el desprendimiento en “El Romerito”. Tanto el diseño como la implementación se consideran satisfactorios. El IAP entiende que se está desarrollando el diseño de la extensión corriente arriba recomendada de los trabajos de estabilización.

10.4 Implementación de la descarga intermedia

La capacidad de descarga de la IDG se ha incrementado a 750 m³/s. Se están finalizando las medidas estructurales a lo largo del revestimiento de la IDG. El IAP considera que tales disposiciones son adecuadas, también con base en la visita realizada a las obras en curso. El aumento de la capacidad nominal determina una mayor carga hidrodinámica, lo que conlleva una mayor atención al acabado superficial del revestimiento.

EPM está evaluando diferentes opciones para el diseño del tramo del túnel entre el portal de entrada y el tapón existente. La opción de utilizar revestimiento de acero es obviamente la más conservadora y es recomendable en este componente crítico del Proyecto.

Durante la visita de marzo, al IAP le complació saber que el Diseñador está estudiando opciones para añadir una instalación de MLO. El IAP desea revisar tales opciones, incluida la opinión del panel de expertos sobre ellas.

10.5 Entradas de alimentación y conductos de presión

Los daños más graves que se han identificado hasta la fecha se encuentran en los pozos de entrada. Los colapsos de las paredes laterales han causado grandes vacíos y ciertamente han creado una masa rocosa suelta e inestable en sus límites. Claramente, es necesaria una reconstrucción. El relleno y la lechada para consolidar el suelo circundante deben preceder a la reconstrucción del pozo. Se debe instalar un refuerzo de roca adecuado, dado que los pozos están derrumbados. Será necesario un revestimiento de acero autónomo, porque no se puede contar con la colaboración del macizo rocoso para soportar la presión interna durante el funcionamiento de la planta. El Diseñador tendrá que comprobar si se requiere un revestimiento de acero completo también en todos los demás pozos. Dado el alcance de la perturbación del macizo rocoso en el área, ese puede ser el caso.

Otra zona donde podrían haberse originado cavidades es la de los pozos de entrada 3 y 4. Esos canales de agua estuvieron expuestos a descargas de emergencia durante 10 días y tuvieron que cerrarse después de un ruido intenso y vibraciones intensas en el área. Se planean perforaciones para investigar el área.

10.6 Complejo de cavernas de la sala de máquinas

La caverna de la casa de máquinas parece haber mantenido su geometría y no se evidencian daños irreparables. Al mismo tiempo, puede haber partes en condiciones metaestables que necesitan tratamiento. Se planea una inspección detallada para definir las medidas de refuerzo necesarias para garantizar la seguridad a corto plazo y la estabilidad a largo plazo de esta parte vital del Proyecto.

10.7 Cámaras de carga

Se han producido fallas extensas en el límite más septentrional de la “almenara norte” con clara conexión a la caverna de la sala de máquinas. Lo más probable es que las aguas embravecidas encontraran su camino hacia el túnel de fuga a través de la almenara norte. Esto resultó en el colapso local del pilar de roca de 30 m de ancho que separa el la sala de máquinas y la cámara de carga. Las investigaciones están en curso.

10.8 Planta y maquinaria

También se está evaluando el daño a la planta y al equipo; por el momento, el IAP no tiene elementos para revisar el cronograma y las implicaciones de los costes; por lo tanto, se mantienen los supuestos de agosto de 2018.

10.9 Calendario y costes de finalización del proyecto

El cronograma de fecha 18 de febrero de 2019 se mantiene sustancialmente sin cambios con respecto al de septiembre de 2018. Con base en el estado actual de conocimiento, las reparaciones a las obras subterráneas son el factor de control del cronograma. Hasta que un mejor conocimiento informe una planificación confiable, la gestión adaptativa será el principio rector para la implementación de trabajos de reparación subterránea. EPM podrá emitir una actualización del cronograma en los próximos meses, después de completar el desagüe y la evaluación de las obras de rehabilitación necesarias.

Las estimaciones de costes son aún más inciertas que el cronograma. Por el momento, hay muy pocos elementos disponibles para actualizar de forma fiable las estimaciones que se realizaron en septiembre de 2018. Con base en el conocimiento actual, es seguro mantener las estimaciones de septiembre para fines financieros. Se espera que las estimaciones de costes se actualicen en el tercer trimestre de 2019.

Anexo 2: Listado de documentos puestos a disposición del IAP

- DECISIÓN DE CIERRE DE LA COMPUERTA No. 1 - Informe ejecutivo
 - [Anexo 1] Informe No. 19 de la Junta de Asesores, Medellín, enero 2019
 - [Anexo 2a] ANÁLISIS DE CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA DE CAPTACIÓN, INTEGRAL, 2019
 - [Anexo 2b] Flujo por la Casa de Máquinas, Cierre Compuerta No. 1, Integral, 4 de febrero de 2019
 - [Anexo 3] Escenarios de cierre de compuerta considerando aportes de Salvajina, Unidad Hidrometría y Calidad Generación Energía, 04/02/2019
 - [Anexo 4] Análisis de riesgos de los escenarios para el cierre de la compuerta No. 1 en el Proyecto Hidroituango, VPE Finanzas Corporativas, Gestión de Riesgos e Inversiones, Dirección Ingeniería de Riesgos, 4 de febrero de 2019
- Presupuesto y cronograma de construcción actualizados para el Proyecto Ituango, EPM
- Cronograma Ituango Feb 25 _ 2019, EPM
- Respuesta para el BID (4 de marzo de 2019) V2, EPM.
- Reporte de resultados de la simulación CFD-FSI-FEA de maniobra de cierre de las compuertas de aducción en condiciones de contingencia, INTEGRAL, septiembre de 2018
- Avance informativo N.º 124 / Medellín, 1 de marzo de 2019, EPM
- Resultados de subasta de energía firme 2022 -2023, EPM, Gerencia Mercado de Energía Mayorista, 07/03/2019
- RESULTADOS DE TRABAJOS DE EXPLORACIÓN DIRECTA ZONA NORTE CONDUCCIÓN, INTEGRAL, 03 03 2019
- RESULTADOS DE TRABAJOS DE INYECCIÓN DURANTE LA CONTINGENCIA EN LA PRESA, INTEGRAL, 03 2019
- ANÁLISIS DE INSTRUMENTACIÓN DE LA MARGEN DERECHA, INTEGRAL, 02 2019
- Cronograma de recuperación y puesta en operación del Proyecto Ituango, Presentación gráfica y línea de tiempo de fechas de la última versión del cronograma, EPM, 21 de febrero de 2019
- COSTO DE EQUIPOS CASA DE MÁQUINAS EN INUNDACIÓN, inventarios, registro fotográfico, presentación BID, EPM, 2019.
- Subestación 500 kV Fotos, EPM.
- Presentación VP Proyectos e Ing EPM _ Misión BID marzo 2019.
- INFORME DE AVANCE DE LAS OBRAS DURANTE LA CONTINGENCIA EN EL PERÍODO MAYO DE 2018 A FEBRERO, INGETEC, 28 de febrero de 2019.