



**ACTUALIZACIÓN DE LOS PLANOS DE CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO DE
INGENIERÍA DE LA PEQUEÑA CENTRAL HIDROELÉCTRICA CHORRERITAS**

Camilo Andrés Benítez Peláez

Informe final de semestre de industria para optar al título de Ingeniero Civil

Asesora interna

Derly Estefany Gómez García

MSc en Ingeniería Hidráulica y Sanitaria

Asesor Externo

Juan Sebastián Velásquez Trujillo

MSc en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Pregrado

Medellín

2023

Cita

(Benítez Peláez, 2023)

Referencia
Estilo APA 7 (2020)

Benítez Peláez C. A. (2023). *Actualización de los planos de construcción y diseño de ingeniería de la Pequeña Central Hidroeléctrica Chorreritas, 2018 – 2023* [Semestre de Industria]. Universidad de Antioquia, Medellín.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio Cesar Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi familia por su apoyo incondicional, y a mis amigos por darme el coraje para lograr lo que a veces veía distante.

Agradecimientos

Doy gracias a todo el cuerpo docente de la UdeA por todo el esfuerzo y dedicación que ponen para formar las nuevas generaciones de ingenieros. A mi asesora Derly por guiarme en este último peldaño de mi carrera. A Energo-Pro Colombia por darme la oportunidad de empezar a ejercer la ingeniería Civil, especialmente a mi asesor Juan Sebastián por incentivar no solo mi crecimiento profesional sino personal.

Tabla de contenido

Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
1 Objetivos	11
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos específicos	11
2 Marco teórico	12
2.1 Centrales hidroeléctricas	12
2.1.1 Esquemas de aprovechamiento hídrico	12
2.1.2 Estructuras típicas de una central al filo del agua	14
3 Metodología	17
4 Resultados	18
4.1 Estructuras principales de la PCH Chorreritas	18
4.2 Inspección de planos de construcción	20
4.2.1 Obras de derivación	20
4.2.2 Planos de la conducción	22
4.3 Modificaciones de diseño de las obras de derivación	22
4.3.1 Azud o vertedero de crecientes	26
4.3.2 Descarga de fondo	27
4.3.3 Muros de cierre	29
4.4 Modificaciones de diseño de la conducción	31
4.4.1 Ventana de construcción	32
4.4.2 Túnel superior	35
5 Conclusiones	38

Lista de Tablas

Tabla 1	<i>Clasificación de hidroeléctricas de acuerdo a su capacidad (UPME, 2015).</i>	12
Tabla 2	<i>Planos del proyecto por frente principal</i>	20
Tabla 3	<i>Planos de las obras de derivación.</i>	21
Tabla 4	<i>Planos de la conducción.</i>	22
Tabla 5	<i>Ejemplo de bitácora de revisión de planos del azud.</i>	24
Tabla 6	<i>Lista de planos modificados del azud.</i>	26
Tabla 7	<i>Lista de planos modificados de la descarga de fondo.</i>	28
Tabla 8	<i>Lista de planos modificados de los muros de cierre.</i>	31
Tabla 9	<i>Lista de planos modificados de la ventana de construcción.</i>	32
Tabla 10	<i>Lista de planos modificados del túnel de conducción superior.</i>	35

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Central hidroeléctrica Hidrosogamoso (Isagen, 2022).</i>	13
Figura 2 <i>Central hidroeléctrica “San Andrés de Cuerquia” (Celsia, 2022).</i>	14
Figura 3 <i>Obras de derivación del proyecto San Gabán III (Sandoval, 2018).</i>	16
Figura 4 <i>Esquema general de la PCH Chorreritas.</i>	19
Figura 5 <i>Obras de derivación PCH Chorreritas.</i>	21
Figura 6 <i>Modificaciones principales de las obras de derivación.</i>	23
Figura 7 <i>Modificaciones en planos del Azud. a) Plano original, b) Plano modificado.</i>	27
Figura 8 <i>Ejemplo de modificación de planos de la descarga de fondo a) Plano original, b) Plano modificado.</i>	29
Figura 9 <i>Ejemplo de modificación de planos del muro de cierre a) Plano original, b) Plano modificado.</i>	30
Figura 10 <i>Ejemplo 1 de modificación de planos de la ventana de construcción. a) Plano original, b) Plano modificado.</i>	33
Figura 11 <i>Ejemplo 2 de modificación de planos de la ventana de construcción. a) Plano original, b) Plano modificado.</i>	34
Figura 12 <i>Ejemplo de modificación de planos del túnel superior. a) Plano original, b) Plano modificado.</i>	36

Siglas, acrónimos y abreviaturas

OD	Obras de derivación
AZ	Azud
CO	Conducción
DF	Descarga de fondo
GRP	Glass fiber Reinforced Plastic
EM	Elementos metálicos
IE	Instalaciones eléctricas
MC	Muros de cierre
OC	Obras civiles
PCH	Pequeña central hidroeléctrica
PL	Plano
RF	Refuerzo
VC	Ventana de construcción
XT	Excavaciones
ZODME	Zona de Depósito de Material de Excavación sobrante

Resumen

En el presente informe se condensan las actividades principales realizadas con objeto de semestre de industria en la empresa generadora de energía Energo-Pro Colombia. El objetivo principal del semestre de industria fue apoyar la actualización de planos de construcción asociados a las modificaciones de optimización realizadas en las obras de derivación y conducción de la pequeña central hidroeléctrica (PCH) Chorreritas. Para la actualización de los planos se realizó un proceso de reconocimiento del proyecto por medio de reuniones técnicas con el equipo de ingeniería, así como con el proceso de inspección de los diseños previos de las principales estructuras de la central. Por otro lado, por medio de la revisión del modelo general 3D se identificaron las modificaciones realizadas en el proceso de optimización de las obras de derivación, con lo cual fue posible actualizar los planos correspondientes a esta estructura. En el caso de las estructuras de conducción, la actualización se realizó utilizando prediseños, y modificaciones sobre planos por parte del equipo técnico. De esta manera fueron actualizados tanto los diseños del vertedero de crecientes, perteneciente a las obras de derivación, como los diseños de la ventana de construcción del túnel, y el túnel superior, pertenecientes a la estructura de conducción de la PCH Chorreritas,

Palabras clave: central hidroeléctrica, vertedero de crecientes, túnel de conducción, planos de construcción, CAD.

Abstract

This report summarizes the main activities carried out during the industry semester at the power generation company Energo-Pro Colombia. The main objective of the industry semester was to support the updating of construction drawings associated with the optimization modifications made to the intake and conduction structures of the small hydroelectric power plant (SHP) Chorreritas. In order to update the drawings, a reconnaissance process of the project was carried out through technical meetings with the engineering team, as well as the inspection process of the previous designs of the main structures of the power plant. On the other hand, through the review of the general 3D model, the modifications made in the intake optimization process were identified, which made it possible to update the drawings for this structure. In the case of the conduction structures, the update was carried out using pre-designs and modifications to the drawings by the technical team. In this way, the designs of the flood spillway, belonging to the intake, as well as the designs of the tunnel construction window and the upper tunnel, belonging to the Chorreritas SHP conduction structure, were updated,

Keywords: hydropower plant, flood spillway, conduction tunnel, construction drawings, CAD.

Introducción

Energo-Pro A.S. es una empresa especializada en el sector hidroeléctrico fundada en 1994 en la República Checa, la cual inició sus operaciones en Colombia en el año 2019. Actualmente se encuentra desarrollando el proyecto Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) Chorreritas a través de la empresa Generadora Chorreritas S.A.S. E.S.P. La PCH Chorreritas es un proyecto de generación de energía ubicado en Río San Andres, Municipio de San Andrés de Cuerquia, departamento de Antioquia, con capacidad de 20 MW cuya construcción se inicia en enero de 2023 y se espera su culminación en diciembre de 2025.

A partir de los diseños originales para construcción de cada una de las estructuras más importantes de la central hidroeléctrica: las obras de derivación, la conducción y la casa de máquinas. Los cuales están clasificados de acuerdo con su categoría, en obras civiles, refuerzo, estructuras metálicas, e iluminación. Estos planos inicialmente elaborados han sido revisados y modificados con el fin de verificar y optimizar los diseños de cada una de estas estructuras.

Por lo anterior, en este trabajo se presenta la actualización de los diseños originales de la PCH, haciendo énfasis especialmente en las obras de derivación y conducción. Para este fin, se realizaron una serie de reuniones de inducción al proyecto hidroeléctrico con el equipo de ingeniería, en las cuales se detalla la configuración y el funcionamiento general de la PCH. Posteriormente, se realizó un proceso de inspección de los planos originales de las obras de derivación y de la conducción identificando sus componentes, localización espacial e interrelación. Finalmente, para el caso de las obras de derivación, se identificaron los cambios realizados en los procesos previos de verificación de las estructuras, para luego realizar la actualización de los planos correspondientes al vertedero de crecientes. Para el caso de la conducción, se recibieron las modificaciones planteadas por medio de diseños preliminares y correcciones sobre planos, los cuales fueron utilizados como insumos para realizar los diseños definitivos de algunas de sus subestructuras. La actualización de los planos de las obras de derivación y de la conducción fueron realizadas en software CAD junto con software de sistemas de información geográfica.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Actualizar los planos de construcción asociados a las modificaciones de optimización realizadas en las obras de derivación y conducción de la pequeña central hidroeléctrica Chorreritas.

1.2 Objetivos específicos

Para desarrollar el objetivo general del informe, a continuación, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las estructuras principales que componen la PCH Chorreritas.
- Comparar los diseños originales con los diseños optimizados del vertedero de crecientes, muros de cierre y descarga de fondo.
- Comparar los diseños originales con los diseños optimizados de la ventana del túnel y del túnel superior.
- Actualizar los planos de las obras de derivación y de la conducción de la PCH Chorreritas por medio de software CAD.

2 Marco teórico

2.1 Centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas son un conjunto de estructuras cuyo objetivo es convertir la energía cinética y potencial del agua para producir electricidad por medio de unas turbinas acopladas a generadores (Osorio, 2008).

De acuerdo a la capacidad de generación de energía, las centrales hidroeléctricas pueden clasificarse en picocentrales, microcentrales, minicentrales, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) y centrales hidroeléctricas (CH). En la **Tabla 1** se listan los tipos de centrales y su capacidad instalada. La clasificación utilizada fue adoptada por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía (UPME, 2015). De acuerdo a esta clasificación el proyecto Chorreritas corresponde a una PCH con capacidad instalada de 20000 kW.

Tabla 1

Clasificación de hidroeléctricas de acuerdo a su capacidad (UPME, 2015).

Tipo	Capacidad instalada kW
Picocentral	0.5 - 5
Microcentral	5 - 50
Minicentral	50 - 500
PCH	500 - 20000
CH	> 20000

2.1.1 Esquemas de aprovechamiento hídrico

El aprovechamiento hídrico para generación de energía eléctrica usualmente se basa en la construcción de una presa o mediante la derivación del cauce de un río (Sandoval, 2018). En el primer esquema se construye una presa con la cual se puede originar una carga o caída de agua artificialmente, que a su vez permite el almacenamiento de un volumen importante de agua que asegura su funcionamiento por cierto tiempo. Un ejemplo de este tipo de centrales es la

hidroeléctrica “Hidrosogamoso” de Isagen con capacidad de 820 MW, tal como se muestra en la **Figura 1** (Isagen, 2022).



Figura 1
Central hidroeléctrica Hidrosogamoso (Isagen, 2022).

Dentro del sector de la energía hidráulica, las centrales de embalse se configuran como unas de las más importantes, las cuales han sido posible construir debido a las condiciones topográficas e hídricas del territorio nacional. Sin embargo, este tipo de proyectos con embalse han estado rodeados de grandes controversias por los impactos ambientales y sociales que pueden generar. Bacca-García & Toro (2021) realizan un estudio de vulnerabilidad para las centrales hidroeléctricas de gran escala, en cual concluyen que este tipo de centrales presentan una vulnerabilidad moderadamente alta, cuando ocurren variaciones climatológicas como el Fenómeno del Niño debido a la disminución en el nivel de los embalses y la alta dependencia del país a este tipo de tecnología. Por otra parte, cuando se presenta el Fenómeno de La Niña, el incremento de precipitaciones en estos embalses puede generar la inundación de los territorios y en algunos casos la necesidad de abrir las compuertas para permitir el flujo de agua de exceso, generando impactos considerables en las comunidades aguas abajo de las hidroeléctricas.

Respecto al esquema de aprovechamiento por medio de la derivación de cauces, la concentración de la carga hidráulica se realiza por medio de la conducción del agua a gravedad a

través de un cauce artificial (Sandoval, 2018). Un ejemplo de este tipo de centrales es la PCH “San Andrés de Cuerquia” de Celsia (**Figura 2**) con capacidad instalada de 20 MW (Celsia, 2022).



Figura 2
Central hidroeléctrica “San Andrés de Cuerquia” (Celsia, 2022).

La PCH Chorreritas es una hidroeléctrica al filo del agua, por lo cual se discutirán los principales componentes de este tipo de instalaciones.

2.1.2 Estructuras típicas de una central al filo del agua

Este tipo de centrales se compone usualmente de las siguientes estructuras: captación, desarenador, sistema de conducción (canal, tubería o túnel), tanque de carga, tubería forzada o de presión, casa de máquinas, y patio de transformadores (INEA, 1997). Cuando los caudales superan las necesidades de la central, el agua excedente se evacúa por medio de vertederos de pequeña alturas llamadas azudes. A continuación, se realiza una breve descripción de estas:

- **Captación:** permite desviar una parte del caudal de un cauce para que sea utilizado en la producción de energía eléctrica. La estructura usualmente es de hormigón u otro material resistente al empuje y erosión del agua. Para realizar el diseño de una captación se tienen en cuenta principalmente tres criterios: principios hidráulicos y estructurales, aspectos

- operativos como el control de caudales, eliminación de residuos y deposición de sedimentos, y elementos ambientales como el caudal ecológico. Usualmente en las obras de captación se construyen aliviaderos o descargas de fondo para realizar la evacuación periódica de los sedimentos acumulados (Sandoval 2018).
- Sistema de limpieza de sólidos: antes de conducir el agua al tanque de presión es necesario eliminar los sólidos del flujo de agua entrante por la captación. Esto se logra por medio de un sistema de rejillas, desgravadores y desarenadores. La condición óptima de operación de una PCH se logra construyendo desarenadores que retengan partículas de entre 0.2 y 0.3 mm (IDAE, 2006).
 - Sistema de conducción: el agua puede ser conducida por medio de canales, túneles y tuberías, de acuerdo a la distancia a la que se encuentre la casa de máquinas respecto a las obras de captación. La solución más económica para conducir el agua es con el uso de canales, sin embargo, de acuerdo a la topografía del proyecto pueden utilizarse túneles. Independientemente del sistema, se suelen utilizar trampas de arena y grava en el trayecto de la conducción para evitar ingreso de sólidos a las turbinas, además de los sistemas de remoción de sólidos utilizados en la captación (Sandoval 2018).
 - Tanque de presión: cumple la función de estabilizar el nivel de presión requerido para las turbinas, y se localizan en la terminación de los canales o tuberías de flujo libre. Los tanques de presión están diseñados para establecer un nivel determinado de operación, utilizando vertederos para evacuar el agua excedente y no sobrecargar la central (Ortiz-Flórez, 2022).
 - Tubería de presión: esta tubería conecta el tanque de carga con las turbinas. La tubería de presión debe ser capaz de soportar la presión generada por la columna hidrostática generada por la operación normal de la central, además de la presión generada por posibles golpes de ariete debidos al cierre de la válvula de control al ingreso de la turbina (IDAE, 2006).
 - Casa de máquinas: Son las instalaciones en donde se localizan todos los equipos hidráulicos, mecánicos y electrónicos que permite la operación de las turbinas y de los generadores. Sus dimensiones dependen especialmente del tipo de turbinas utilizadas, y se debe localizar en lo posible cerca al cauce del río para disminuir lo máximo el volumen de las obras de descarga (RAP-E, 2020).
 - Patio de transformadores: En esta locación se establecen los niveles de tensión para la transmisión de la energía eléctrica. Sus principales componentes son los transformadores,

los cuales se encargan de elevar el voltaje para disminuir las pérdidas de energía en la transmisión (Sandoval 2018).

En la **Figura 3** puede observarse un ejemplo de las estructuras de captación, en las cuales se involucra el azud, compuertas, el canal de ingreso, y los desarenadores.

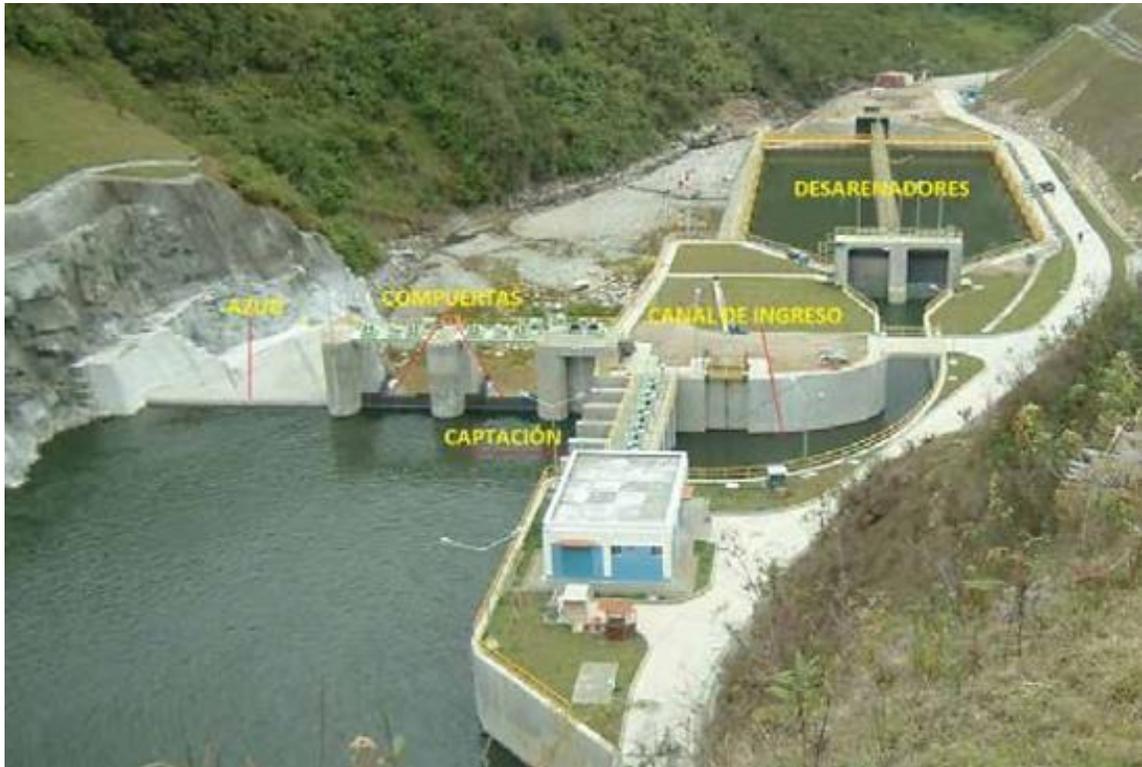


Figura 3
Obras de derivación del proyecto San Gabán III (Sandoval, 2018).

3 Metodología

El semestre de industria consistió en la actualización de los planos de construcción de las obras de derivación y de conducción de la PCH Chorreritas de acuerdo con los nuevos diseños de optimización. Para lograr este objetivo se plantean 3 etapas consecutivas, en cada una de las cuales se realiza un proceso de seguimiento y supervisión por parte del equipo técnico de Energo-Pro Colombia.

La primera etapa consiste en la familiarización con la información preexistente en las bases de datos referente a los diseños de la PCH, con la que se adquiere suficiente conocimiento de la información disponible y su proceso de búsqueda, además de la identificación de las principales estructuras que componen la central.

Teniendo clara la información preexistente, y el conocimiento de las principales estructuras, se procede a la segunda etapa en la cual se consolida un listado de los planos que es necesario modificar de acuerdo con los cambios planteados en el proceso de optimización de la PCH, estos planos involucran obras civiles, excavaciones, refuerzo, elementos metálicos, iluminación y demás componentes que se deben tener en cuenta durante la construcción.

Finalmente, en la tercera etapa se ejecutan todas las actividades referentes a la actualización de planos, incluyendo la verificación inicial de la información presentada (sistema coordinado, acotado, elevaciones, cotas, elementos presentes, entre otros), así como las modificaciones necesarias de acuerdo con los diseños finales, y el proceso de chequeo y cierre correspondientes.

El resultado final del semestre de industria es un paquete de planos actualizado, el cual es necesario para iniciar el proceso de licitación de las obras de derivación y ejecutar de una manera efectiva las obras actuales en el frente de la conducción.

4 Resultados

4.1 Estructuras principales de la PCH Chorreritas

Como primera actividad para cumplir con el objetivo del semestre de industria, se realizó un proceso de reconocimiento del proyecto hidroeléctrico, de modo que se tenga siempre presente los componentes de la central y su modo de funcionamiento.

La PCH Chorreritas se compone de tres frentes de obras principales: obras de derivación, conducción, y casa de máquinas. En la **Figura 4** se presenta la planta y el perfil general del proyecto con la localización de cada una de sus estructuras principales. Las obras de derivación se diseñan con el propósito de captar el flujo de agua desde el río San Andrés, asegurando un caudal ecológico para el río y un flujo de agua suficiente para la generación de energía. En esta central el potencial de agua para impulsar los generadores eléctricos se logra por medio de la conducción del agua a través de un túnel hasta una elevación que permita la suficiente columna hidrostática para activar de manera eficiente las turbinas. De esta manera se evita el uso de represas, y en consecuencia de los riesgos que implica su construcción y operación e impactos ambientales relacionados (Bacca-García & Toro, 2021).

Las obras de derivación están compuestas por el azud, el vertedero de aproximación, los muros de cierre y el tanque de carga. Estas estructuras se muestran en la sección **4.2.1**. Por otro lado, el frente de conducción permite el flujo de agua desde las obras de derivación hasta la casa de máquinas. Este está compuesto por la conducción superficial, involucrando tubería GRP y tubería metálica, un paso elevado por el río San Andrés y la vía a Ituango la ventana de construcción el túnel superior, el pozo de presión, el túnel inferior y la ventana de construcción (ver **Figura 4**).

Finalmente, el frente de casa de máquinas está subdividido en las obras del patio de transformadores, el distribuidor, el edificio de control y tableros, la zona de unidades, la descarga de la central y los muros de cierre.

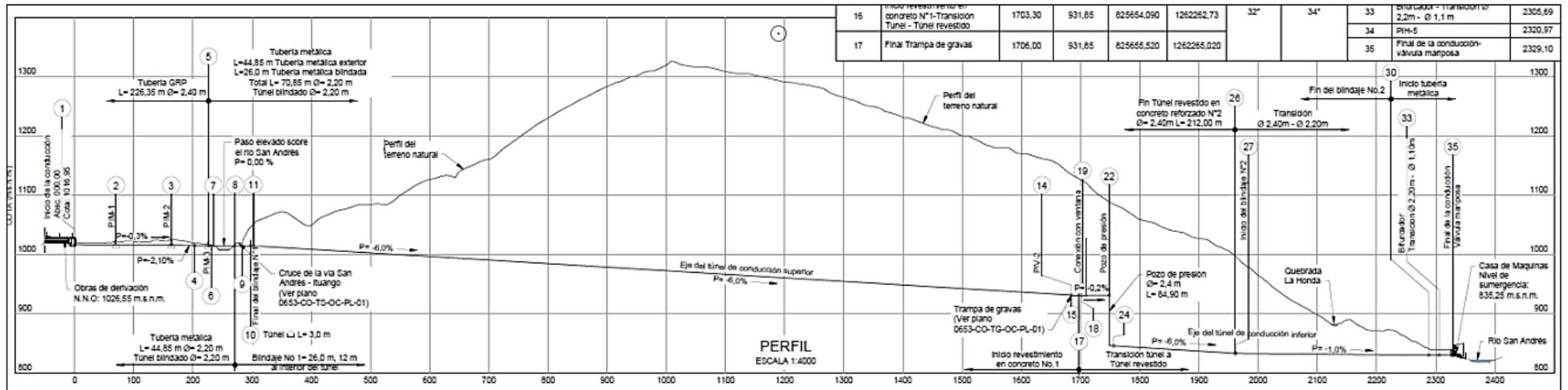
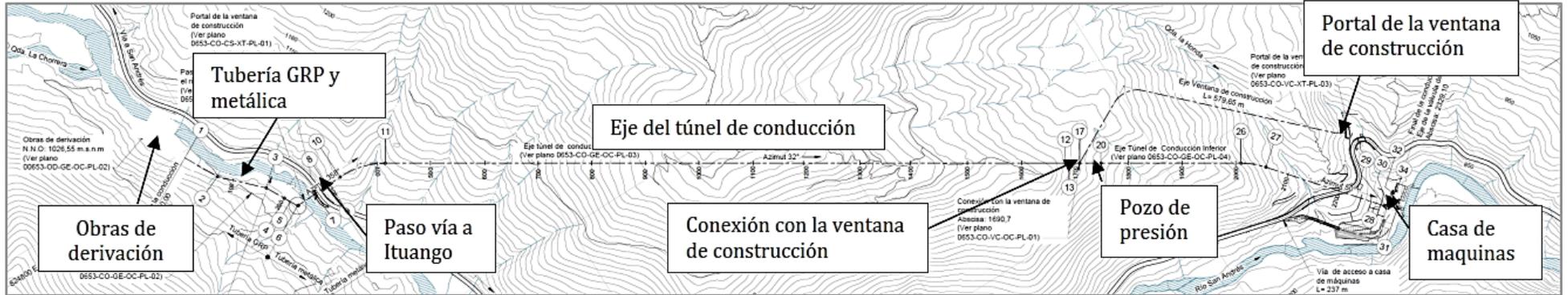


Figura 4
Esquema general de la PCH Chorreritas.

4.2 Inspección de planos de construcción

Teniendo presente los componentes principales de la PCH Chorreritas y su funcionamiento. Se realizó una revisión del banco de planos del proyecto. En la **Tabla 2** se presentan las categorías presentes en el banco de planos.

Tabla 2
Planos del proyecto por frente principal

No	Frente principal	No de planos
1	Geología	13
2	Infraestructura	43
3	Obras de derivación	132
4	Conducción	107
5	Casa de máquinas	152
	Total de planos	447

El banco de planos se compone de diseños de diseños de geología, infraestructura, obras de derivación, conducción, y casa de máquinas. En los planos de geología se presentan los perfiles geológicos para el trayecto del túnel de conducción, con lo que es posible diseñar con anterioridad los tratamientos geotécnicos probables para cada una de las zonas. Respecto a las obras de infraestructura, estas se relacionan al diseño de puentes y el diseño geométrico de las vías de acceso a las obras de derivación y casa de máquinas.

4.2.1 Obras de derivación

Las principales estructuras de las obras de derivación son el vertedero de crecientes (azud), la captación, el cuenco disipador, los muros de cierre izquierdo y derecho, los desarenadores, el tanque de carga y las obras anexas. Estas últimas involucran los diseños de las 2 casetas de operación **Figura 5** se presenta un esquema de las obras de derivación de la PCH Chorreritas.

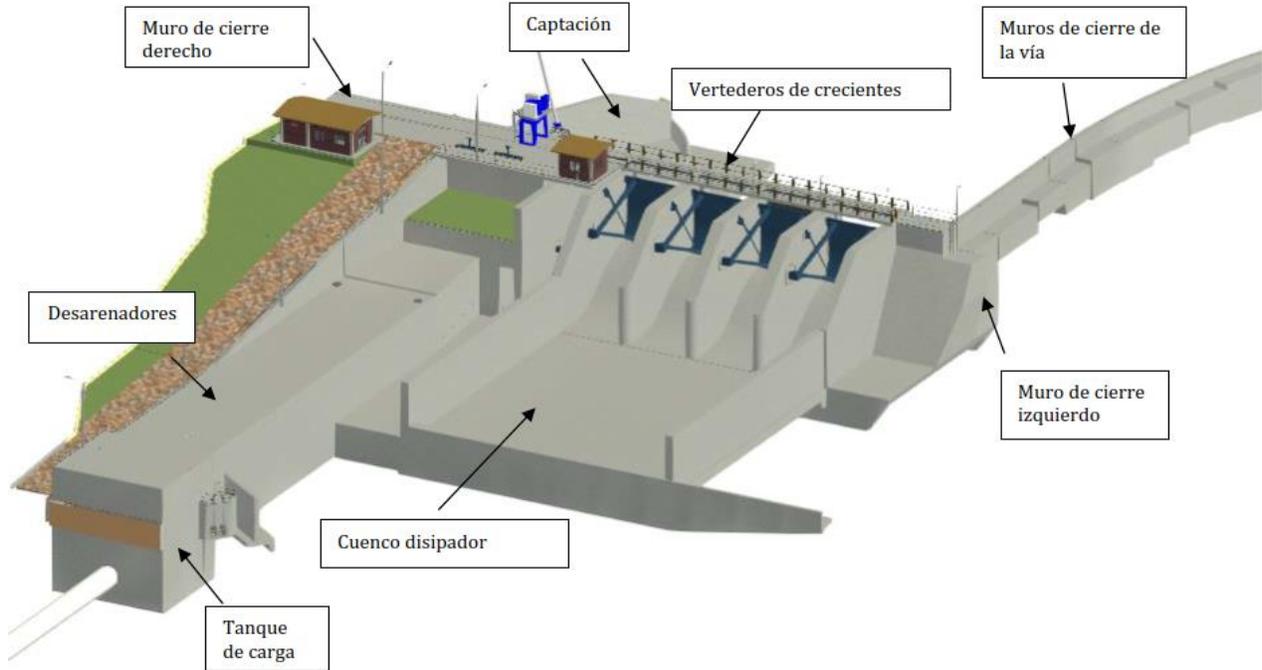


Figura 5
Obras de derivación PCH Chorreritas.

Los diseños de cada una de las estructuras de las obras de derivación involucran planos de obra civil, de refuerzo, de excavaciones, de elementos metálicos y de instalaciones eléctricas. En la **Tabla 3** se listan las principales categorías de los planos de las obras derivación junto con su cantidad. Cabe resaltar que en esta etapa se realizó una inspección rápida de todos los planos de las obras de derivación, mientras que se hizo una revisión más detallada de los planos de los muros de cierre, del azud y de la descarga de fondo.

Tabla 3
Planos de las obras de derivación.

No	Categoría	No de planos
1	General	31
2	Muros de Cierre	8
3	Azud	20
4	Descarga de fondo	12
5	Desarenador	19

6	Captación	14
7	Tanque de Carga	14
8	Obras anexas	14
Total de planos		132

4.2.2 Planos de la conducción

Respecto a los planos de la conducción, en la **Tabla 4** se presenta la cantidad de planos por categoría. En este frente principal se hizo énfasis en la revisión de los planos del túnel superior y de la ventana de construcción en sus subcategorías de planos de obra civil, excavaciones, refuerzo, elementos metálicos, e instalaciones eléctricas.

Tabla 4
Planos de la conducción.

No	Categoría	No de planos
1	General	7
2	Conducción superficial	35
3	Túnel superior	24
4	Trampa de Gravas	5
5	Pozo de presión	5
6	Túnel inferior	10
7	Ventana de construcción	21
Total de planos		107

4.3 Modificaciones de diseño de las obras de derivación

Una vez se conoce el banco de planos del proyecto, se procede a identificar las modificaciones realizadas en los procesos de verificación y optimización de las estructuras. Para el caso de las obras de derivación, el equipo técnico de Energo-Pro Colombia, realizó las

modificaciones en un modelo central 3D. Sin embargo, se hace necesario plasmar estas modificaciones en los planos 2D, que son pieza clave para la etapa de construcción.

Las principales modificaciones de las obras de derivación residen en la eliminación del sistema de filtro y drenajes en la parte inferior de la fundación de toda la estructura, en la eliminación de la losa de aproximación del azud y de las llaves aguas arriba y aguas abajo del azud. En la **Figura 6** se presenta un esquema de estos elementos.

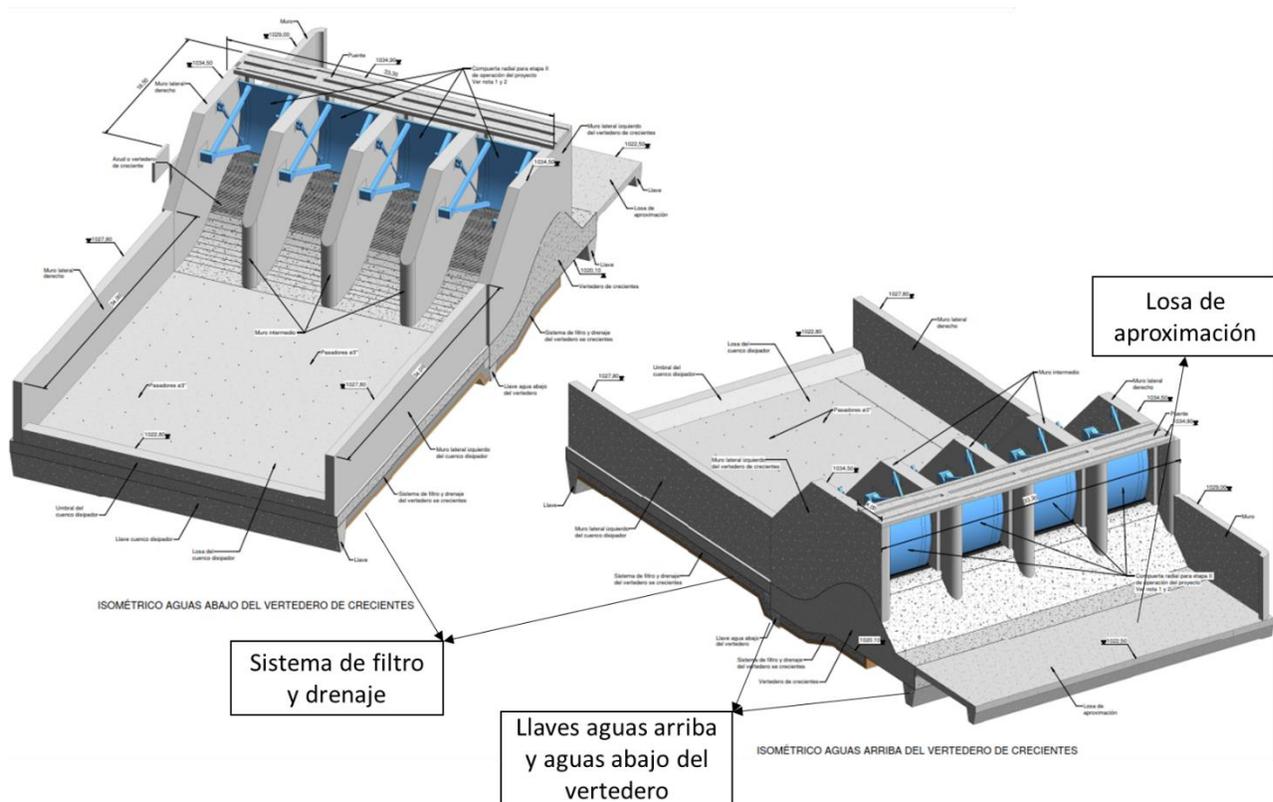


Figura 6
Modificaciones principales de las obras de derivación.

El sistema de filtro y drenajes se eliminó debido a la inclusión en el diseño de una cortina de impermeabilización extendida hasta el nivel de roca a lo largo del perímetro de toda la estructura. Con la cortina de impermeabilización se asegura que el flujo de agua subsuperficial se aleje en profundidad lo más posible de la fundación, evitando la posible desestabilización de las obras de derivación debido a incrementos de presión hidrostática. La losa de aproximación se eliminó ya que no se esperan grandes velocidades de flujo en el vertedero de crecientes por el incremento de

la cota de operación de la PCH, generando un pequeño represamiento de agua en esta sección. De acuerdo con el análisis de cargas de todas las estructuras, se determinó que no había necesidad de construir las llaves aguas arriba y aguas abajo del vertedero de crecientes. Sin embargo, se conservó la llave aguas abajo del cuenco disipador. Las llaves tienen la función de contrarrestar las fuerzas de arrastre por presión hidrostática y velocidad de flujo del agua, que intentan movilizar la estructura aguas abajo.

Una vez se identificaron las principales modificaciones del modelo 3D, se hizo una revisión detallada de los planos actuales para poder iniciar con su actualización. A modo de ejemplo de revisión detallada de los planos, en la **Tabla 5** se presenta una bitácora de revisión de los planos de obra civil del azud. Se revisó el acotado, achurado, elevaciones y georreferenciación de los planos del azud, descarga de fondo y muros de cierre, sumando un total de 51 planos. En las secciones siguientes se presentan ejemplos de actualización de diseños. Por políticas de la empresa no se muestran los planos actualizados a detalle, sin embargo, en los planos ejemplo se especifican las estructuras modificadas.

Tabla 5
Ejemplo de bitácora de revisión de planos del azud.

Plano	Comparación de versiones	Comentarios
OD-AZ-OC-PL-01-EP	Cambia la geometría del lleno de material común en la zona de parqueadero	Revisar cotas (elevaciones) faltantes, y achurado.
	Cambios en la losa de aproximación	
	Hay modificaciones incompletas en la sección de descarga de fondo	Revisar rejas de fondo en zona de descarga de fondo.
OD-AZ-OC-PL-02-EP	Cambia la geometría del muro de cierre izquierdo	
	Cambia la geometría del muro de cierre izquierdo	Revisar cotas (elevación) y acotado faltante.
	Se incluye el muro de aproximación	Revisar dimensiones de la compuerta deslizante de la descarga de fondo, ya que al parecer se cambia el vano de descarga.

	Cambia la geometría del muro de cierre izquierdo	Revisar achurado, hay nomenclatura sin la estructura correspondiente
	Se incluye el muro de aproximación	Revisar dimensiones de la compuerta deslizante de la descarga de fondo, ya que al parecer se cambia el vano de descarga.
	Se elimina la llave aguas arriba y aguas abajo del vertedero (3 llaves)	Acotado faltante, revisar plano original con errores de acotado.
	¿Se elimina sistema de drenaje?	Revisar achurado y elementos que no aparecen como la malla de cerramiento.
OD-AZ-OC-PL-03-EP	Cambia la geometría de la losa de aproximación, no sea aprecian sus nuevas dimensiones por fatal de acotado. Hay cambios en la losa del cuenco dissipador.	
	Se elimina la llave aguas arriba y aguas abajo del vertedero (3 llaves)	Acotado faltante, revisar plano original con errores de acotado.
	¿Se elimina sistema de drenaje?	Revisar achurado y elementos que no aparecen como la malla de cerramiento.
	Cambia la geometría de la losa de aproximación, no sea aprecian sus nuevas dimensiones por fatal de acotado. Hay cambios en la losa del cuenco dissipador.	
OD-AZ-OC-PL-04-EP	Modificación en la sección C	
	Se incluye el muro de aproximación, cambia la sección de descarga	Revisar cotas faltantes, achurado.
OD-AZ-OC-PL-05-EP	Se elimina la llave aguas abajo del vertedero de crecientes	Revisar cambios en muro lateral derecho.
	¿Se elimina la estructura de drenaje? ¿Existe la nomenclatura, pero no aparece la estructura, achurado desactivado?	Revisar acotado de "detalle 1" y la estructura de drenaje.
OD-AZ-OC-PL-06-EP	Se observan los cambios generales en losa de aproximación, muro de cierre izquierdo, llaves. Hay cambios en el sector de descarga por inclusión de muro de aproximación	

4.3.1 Azud o vertedero de crecientes

En la **Tabla 6** se presenta el listado de planos modificados del azud. En total se modifican 10 planos en las categorías de obra civil y refuerzo. Todas las modificaciones se hicieron bajo supervisión del equipo técnico de Energo-Pro Colombia.

Tabla 6

Lista de planos modificados del azud.

Plano	Descripción
OD-AZ-OC-PL-01	Planta
OD-AZ-OC-PL-02	Secciones I
OD-AZ-OC-PL-03	Secciones II
OD-AZ-OC-PL-04	Secciones III
OD-AZ-OC-PL-05	Cuenca disipador - Planta y secciones I
OD-AZ-RF-PL-01	Perfil del azud y detalles
OD-AZ-RF-PL-02	Muro izquierdo
OD-AZ-RF-PL-03	Muros intermedios
OD-AZ-RF-PL-04	Muro derecho
OD-AZ-RF-PL-05	Losa de aproximación planta y secciones
Total de planos	10

En la **Figura 7** se presenta un ejemplo de las principales modificaciones realizadas en el azud. Los círculos naranjas enumerados indican los cambios realizados. La modificación 1 corresponde a la eliminación de la losa de aproximación. Las modificaciones 2 y 3 corresponden a la eliminación de las llaves aguas arriba y aguas abajo del azud. La modificación 4 es la adición de una nueva caja de cizalladura para generar simetría en la estructura.

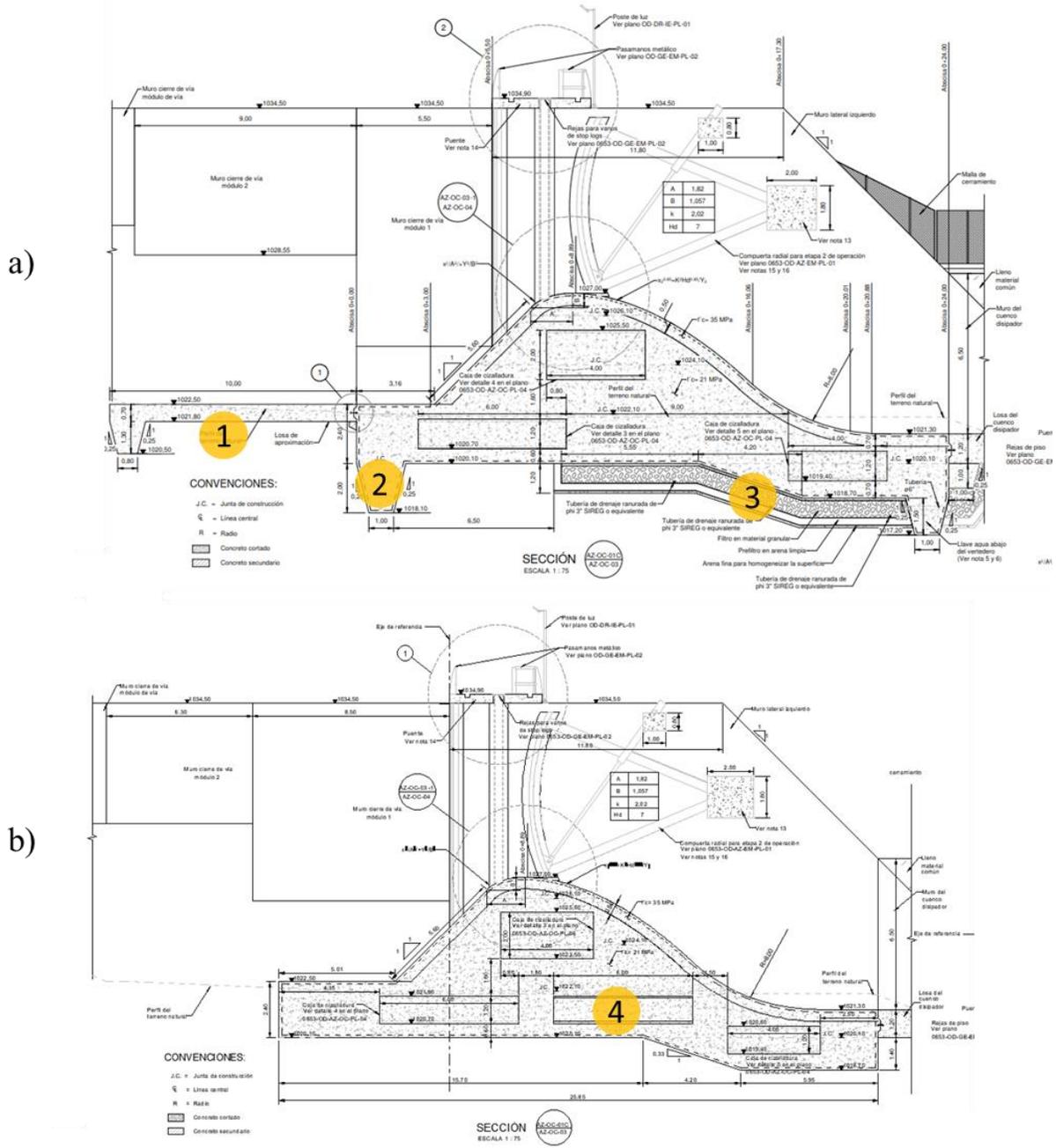


Figura 7
 Modificaciones en planos del Azud. a) Plano original, b) Plano modificado.

4.3.2 Descarga de fondo

Para la descarga de fondo se modifican un total de 9 planos en las categorías de obra civil y refuerzo. En la **Tabla 7** se presentan los planos modificados.

Tabla 7

Lista de planos modificados de la descarga de fondo.

Plano	Descripción
OD-DF-OC-PL-01	Planta, secciones
OD-DF-OC-PL-02	Secciones y detalle I
OD-DF-OC-PL-03	Secciones y detalle II
OD-DF-RF-PL-01	Losa de fundación
OD-DF-RF-PL-02	Muro longitudinal
OD-DF-RF-PL-03	Muros de compuertas
OD-DF-RF-PL-04	Losa de operación
OD-DF-RF-PL-05	Planta y secciones
OD-DF-RF-PL-06	Losa aguas abajo - Planta
Total de planos	9

En la **Figura 8** se observan las versiones original y modificada de las secciones y detalles de uno de los planos de la descarga de fondo (OD-DF-OC-PL-02).

De manera similar que el azud, las principales modificaciones radican en la eliminación de la losa de aproximación (1), la eliminación de las llaves aguas arriba y debajo de la descarga de fondo (2 y 4) y en la eliminación del sistema de filtro y drenaje de la fundación. Sin embargo, para cada plano se hizo también un ajuste de acotado, achurado y verificación de dimensiones y localización de cada subestructura respecto a los planos generales del proyecto. Estas verificaciones y posteriores correcciones evitan la ambigüedad entre planos y la posterior ejecución efectiva de las obras de construcción.

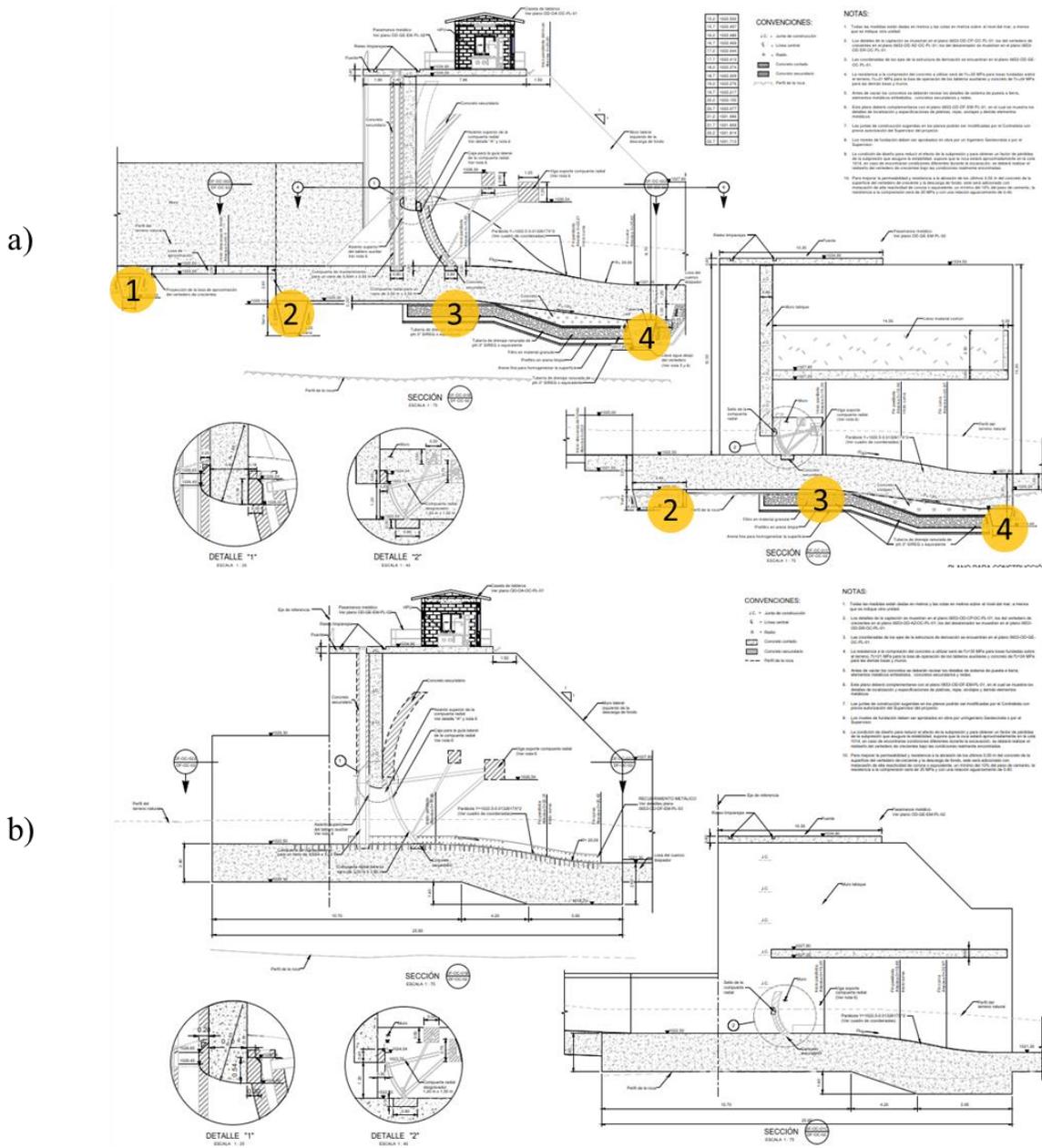


Figura 8
Ejemplo de modificación de planos de la descarga de fondo a) Plano original, b) Plano modificado.

4.3.3 Muros de cierre

Los muros de cierre son estructuras en concreto reforzado construidas en los extremos laterales de la captación, las cuales conectan las obras de captación con las obras viales a lo largo del cauce del río. Respecto a la actualización de planos, se modifican un total de 4 planos en las

categorías de obra civil y refuerzo. En la **Figura 9** se presentan las modificaciones de refuerzo realizadas en el muro de cierre izquierdo y muro de cierre del cuenco dissipador (plano OD-MC-RF-PL-01), mientras que en la **Tabla 8** se presenta la lista de los 4 planos modificados.

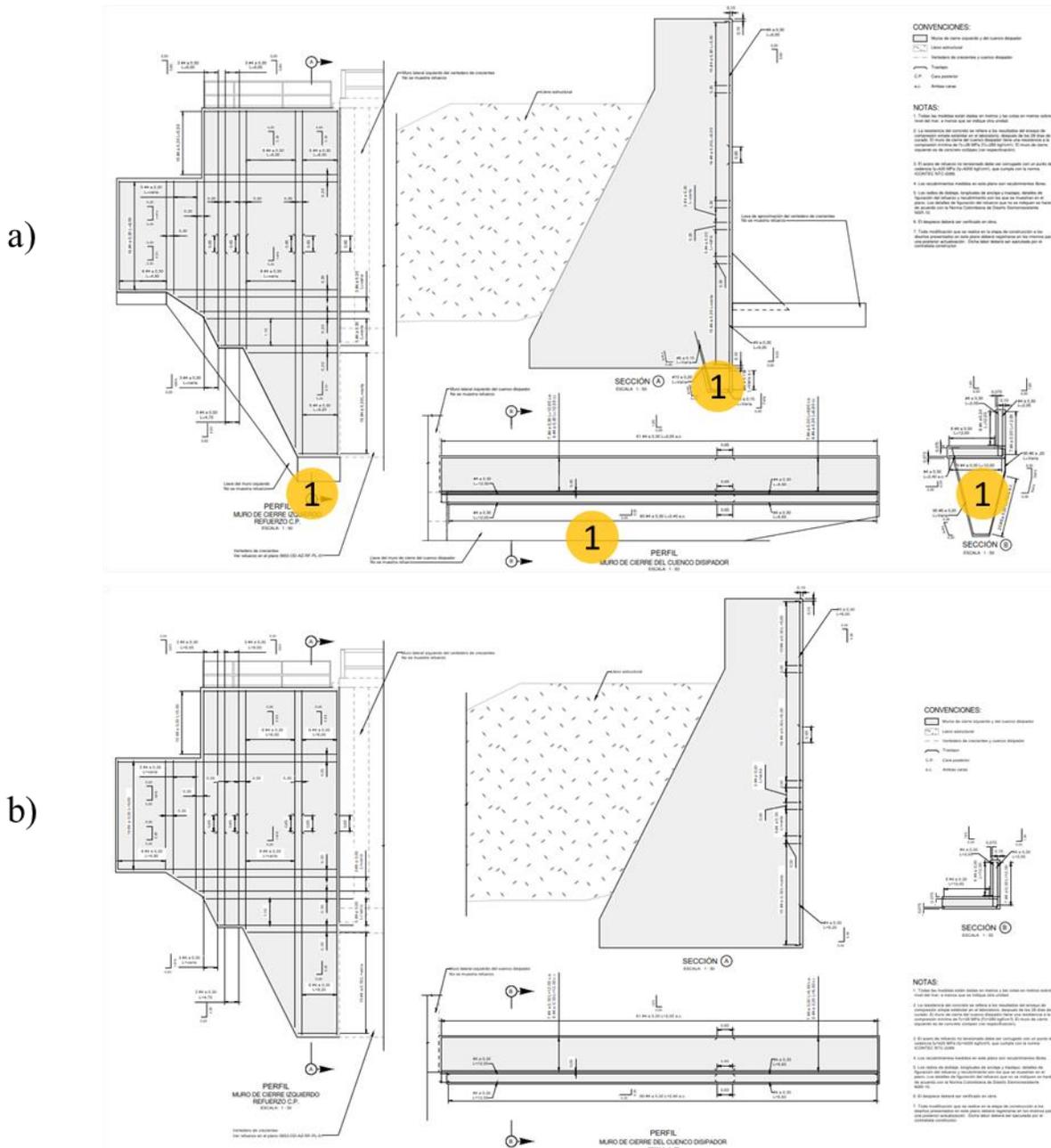


Figura 9
Ejemplo de modificación de planos del muro de cierre a) Plano original, b) Plano modificado.

Todas las modificaciones presentadas (1) corresponden a la eliminación de las llaves del muro de cierre, por lo tanto, el refuerzo relacionado a esta estructura se elimina, junto a su conexión con los muros.

Tabla 8

Lista de planos modificados de los muros de cierre.

Plano	Descripción
OD-MC-OC-PL-01	Planta, sección, detalles (Izquierdo)
OD-MC-OC-PL-02	Planta, sección, detalles (Derecho)
OD-MC-RF-PL-01	Muro de cierre izquierdo y muro de cierre del cuenco disipador
OD-MC-RF-PL-02	Muro de cierre derecho
Total de planos	4

4.4 Modificaciones de diseño de la conducción

Los diseños de las obras de la conducción fueron optimizados de acuerdo a la experiencia técnica del equipo de construcción de Energo-Pro Colombia. En general se realizaron 3 principales modificaciones.

La primera modificación corresponde al cambio del alineamiento horizontal y vertical de la ventana de construcción, por una parte, para facilitar el acceso al punto inicial del túnel, ya que originalmente se encontraba en una zona inestable y de difícil acceso, y además para reducir la longitud del túnel y reducir costos. La segunda modificación corresponde al diseño de la excavación tanto de la ventana de construcción como del túnel superior estandarizando la geometría de la excavación y la estrategia de sostenimiento del túnel, de manera que se facilite el proceso constructivo. La tercera modificación radica en la modificación de los tratamientos geotécnicos en el proceso de estabilización del túnel, eliminando y adicionando estrategias de estabilización de acuerdo al tipo de roca encontrado durante la excavación.

4.4.1 Ventana de construcción

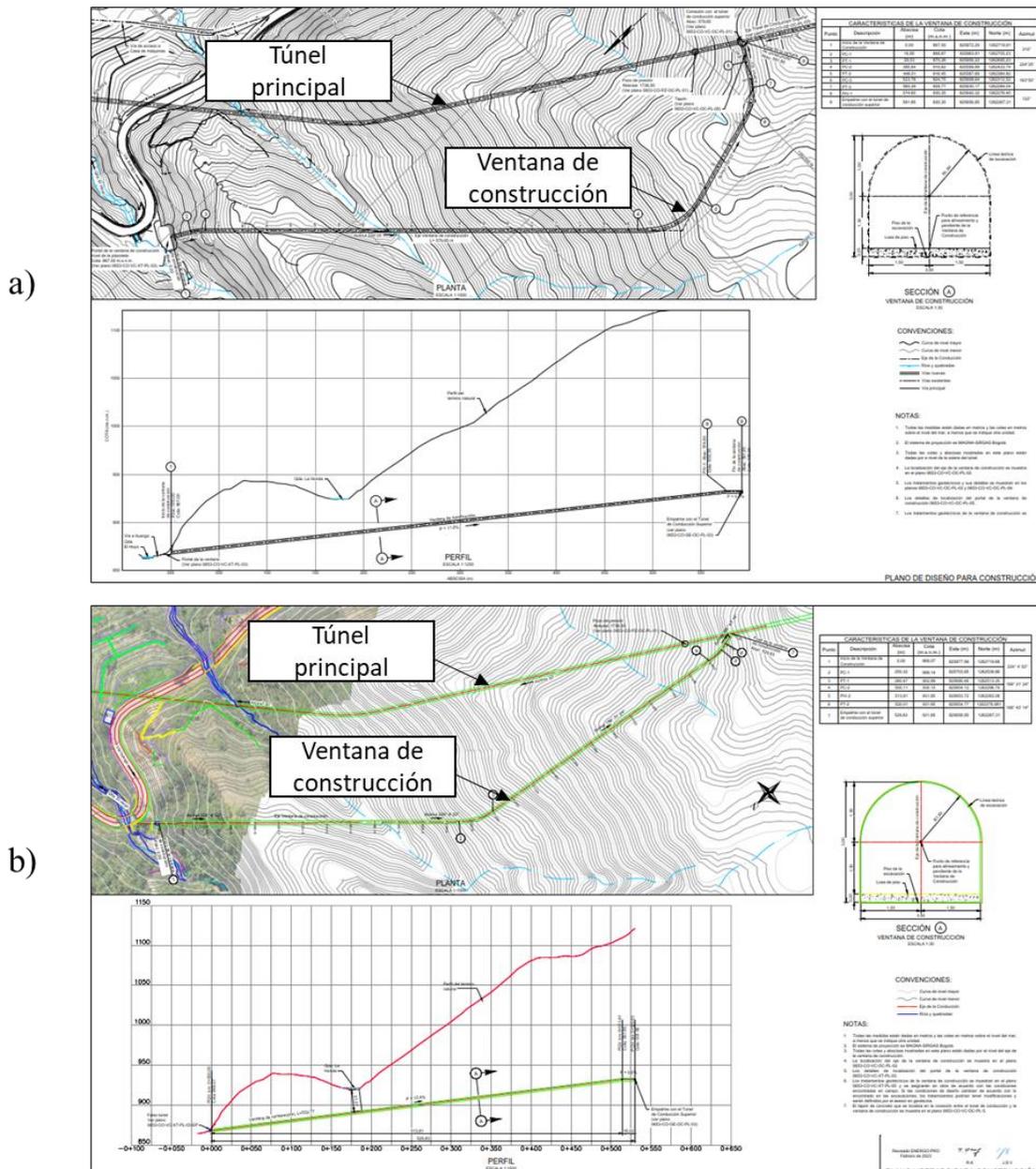
En la **Tabla 9** se presenta el listado de planos modificados de la ventana de construcción. La ventana de construcción es utilizada como canal de acceso para realizar las obras y el mantenimiento posterior si es necesario del túnel de conducción principal. En total se modifican 17 planos en las categorías de excavaciones, obra civil, refuerzo, elementos metálicos e instalaciones eléctricas.

Tabla 9

Lista de planos modificados de la ventana de construcción.

Plano	Descripción
CO-VC-XT-PL-02	Portal de entrada-Detalles tratamiento geotécnicos
CO-VC-XT-PL-03	Portal de entrada-Planta de localización
CO-VC-XT-PL-05	Secciones típicas y soporte de construcción
CO-VC-XT-PL-06	Detalles de soporte de construcción
CO-VC-XT-PL-07	Entibado metálico - Perfil, secciones y detalles I
CO-VC-XT-PL-08	Entibado metálico - Perfil, secciones y detalles II
CO-VC-OC-PL-01	Planta y perfil
CO-VC-OC-PL-02	Localización del eje
CO-VC-OC-PL-03	Cerramiento de la plazoleta
CO-VC-OC-PL-04	Rampa para manejo de carga
CO-VC-OC-PL-05	Tapón-Planta-Perfil
CO-VC-OC-PL-06	Tapón-Sistema de inyecciones de contacto
CO-VC-RF-PL-01	Cerramiento de la plazoleta
CO-VC-RF-PL-02	Tapón Planta y Perfil
CO-VC-RF-PL-03	Tapón Secciones
CO-VC-IE-PL-01	Iluminación ventana de construcción
CO-VC-IE-PL-02	Instalaciones eléctricas ventana de construcción
Total de planos	17

En la **Figura 10** se presenta un plano modificado de la ventana de construcción (plano CO-VC-OC-PL-05). La imagen a) corresponde a la versión original del plano, mientras la imagen b) corresponde a la versión modificada. En este caso se cambió el alineamiento horizontal y vertical de la ventana de construcción, de esta manera se acorta la longitud del túnel y se modifica el ángulo de entrada al túnel principal.



En este plano modificado se incluyó topografía actualizada e imágenes aéreas. Además, se diseñó un portal de entrada nuevo al túnel, con el cual se reducen los volúmenes de excavación y concreto lanzado necesarios respecto al diseño del portal original.

En la **Figura 11** se presenta la versión original y modificada del tapón hidráulico entre la ventana de construcción y el túnel principal (plano CO-VC-OC-PL-05).

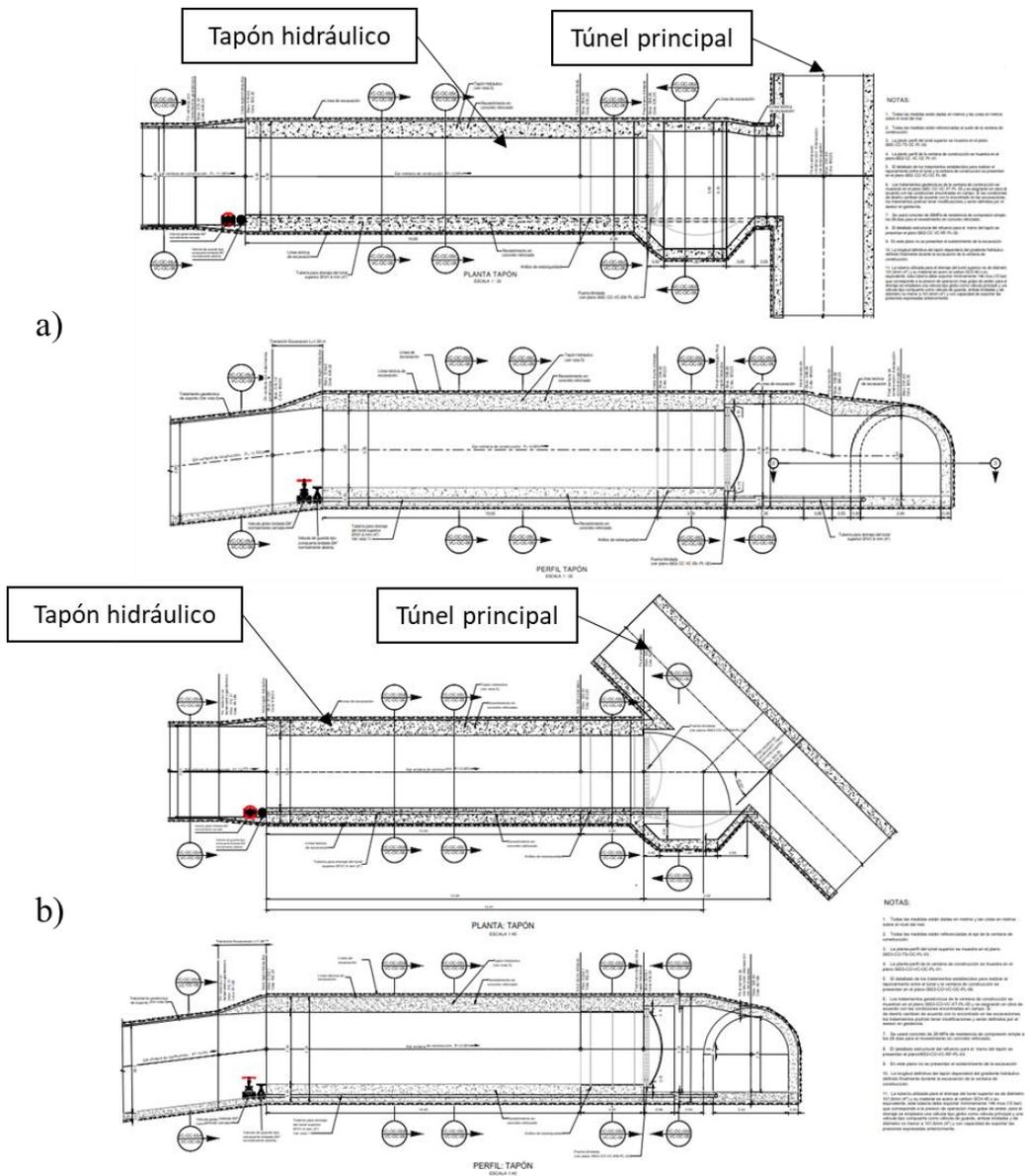


Figura 11
Ejemplo 2 de modificación de planos de la ventana de construcción. a) Plano original, b) Plano modificado.

En este caso se redujo la longitud del tapón, se cambió la pendiente de entrada entre la ventana de construcción y el tapó, y se cambió la geometría del empalme con el túnel superior dado que se cambió el ángulo de contacto entre los dos túneles por las modificaciones en el alineamiento horizontal de la ventana (**Figura 10**).

4.4.2 Túnel superior

En la **Tabla 10** se presenta el listado de planos modificados del túnel superior, el cual corresponde a la primera sección del túnel principal comprendida desde el paso bajo la vía a Ituango hasta el pozo de presión, tal como se observa en la **Figura 4**. En total se modifican 14 planos en las categorías de excavaciones, obra civil, refuerzo, y elementos metálicos. Los principales cambios se relacionan a la estandarización de la geometría del túnel superior y de los tratamientos geotécnicos dependiendo del tipo de roca que se encuentre durante la excavación.

Tabla 10

Lista de planos modificados del túnel de conducción superior.

Plano	Descripción
CO-TS-XT-PL-01	Secciones típicas y soporte de construcción
CO-TS-XT-PL-02	Detalles de soporte de construcción
CO-TS-XT-PL-03	Entibado metálico - Perfil, secciones y detalles I
CO-TS-XT-PL-04	Entibado metálico - Perfil, secciones y detalles II
CO-TS-XT-PL-05	Blindaje - Secciones y soportes de construcción
CO-TS-XT-PL-06	Sección en blindaje-Detalles de soporte de construcción
CO-TS-XT-PL-07	Entibado metálico - Perfil, secciones y detalles I
CO-TS-XT-PL-08	Entibado metálico - Perfil, secciones y detalles II
CO-TS-OC-PL-05	Cruce vía Ituango-Etapa 2 - Perfiles etapas 2A y 2B
CO-TS-OC-PL-06	Transición blindaje N°1 a Túnel-Concretos-Perfil y secciones
CO-TS-OC-PL-07	Transición túnel a revestimiento en concreto N°1 - Concretos-Perfil y secciones
CO-TS-RF-PL-03	Transición blindaje N°1 a Túnel-Perfil y secciones

CO-TS-EM-PL-01	Blindaje N°1-Distribución general
CO-TS-EM-PL-02	Blindaje N°1-Detalles de Montaje
Total de planos	14

En la **Figura 12** se presenta la modificación de una de las secciones de blindaje del túnel superior (plano CO-TS-OC-PL-05).

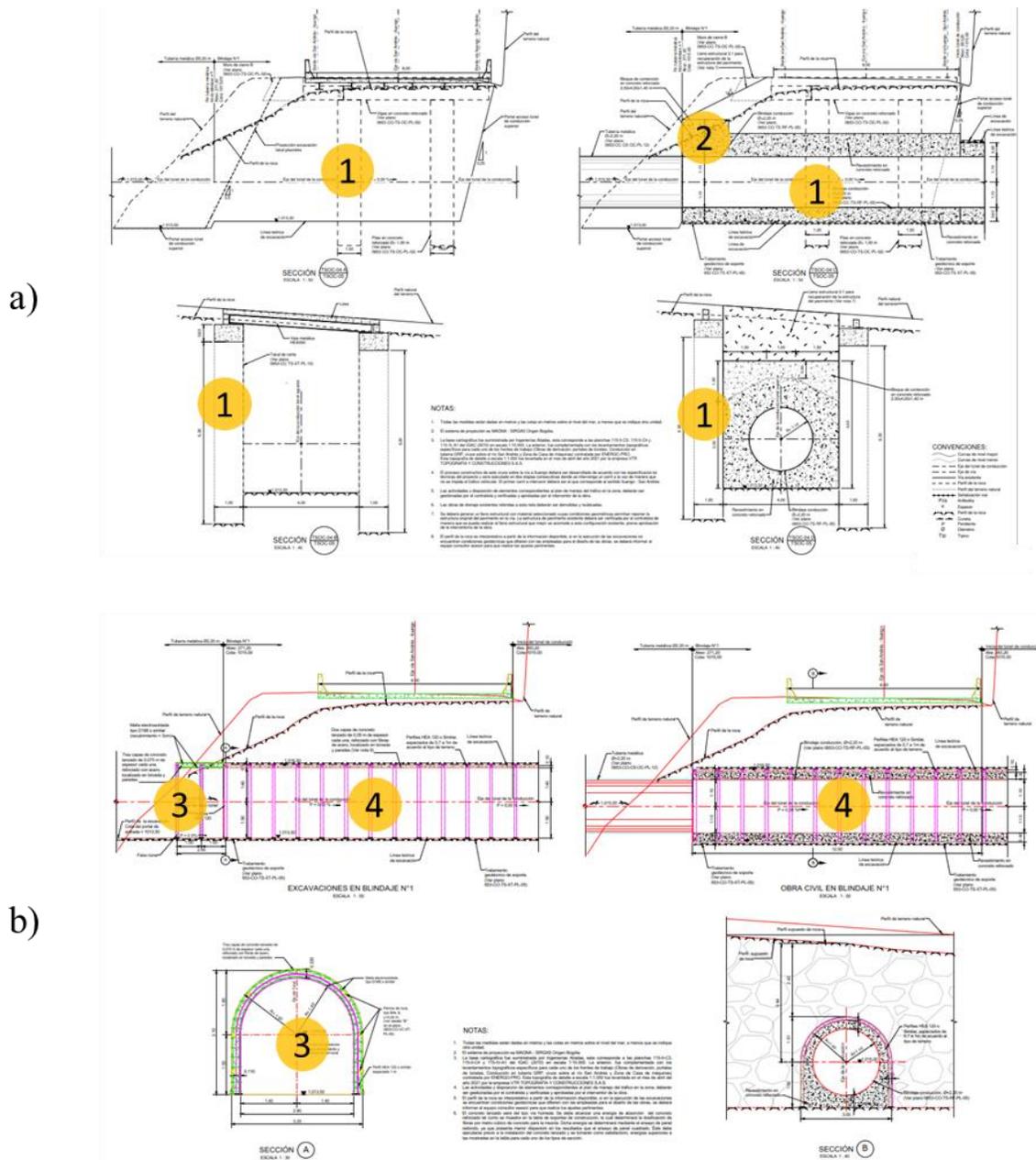


Figura 12
Ejemplo de modificación de planos del túnel superior. a) Plano original, b) Plano modificado.

La modificación 1 corresponde a la eliminación de un viaducto que sirve de soporte a una vía principal, bajo la cual pasa el túnel. La modificación 2 corresponde a la modificación de la geometría de excavación y espesor de concreto hidráulico. La modificación 3 corresponde a la adición de un falso túnel para el inicio de la excavación del túnel bajo la vía. Finalmente, la modificación 4 corresponde la inclusión de cerchas de sostenimiento durante la excavación para asegurar la estabilidad de la roca.

5 Conclusiones

- Se realizó la inspección de los planos de construcción de la PCH Chorreritas relacionados a cada uno de sus frentes principales: obras de derivación, conducción y casa de máquinas. En total se tienen 447 planos en las categorías de geología, infraestructura, obras de derivación, conducción y casa de máquinas.
- Se identificaron los principales cambios en los diseños de las obras de derivación y de la conducción. Respecto a las obras de derivación los principales cambios radican en la eliminación del sistema de filtro y drenaje de la estructura de fundación, la eliminación de las llaves aguas arriba y aguas abajo tanto del vertedero de crecientes como de la descarga de fondo, y la eliminación de la losa de aproximación al vertedero de crecientes. Respecto a la conducción, los principales cambios radican en los diseños de excavaciones y tratamientos geotécnicos y en el alineamiento horizontal y vertical de la ventana de construcción.
- Se actualizaron 23 planos de construcción de las obras de derivación correspondientes a las estructuras del vertedero de crecientes o azud, muros de cierre y descarga de fondo, especialmente en las categorías de obra civil y de refuerzo.
- Se actualizaron 31 planos de construcción de la conducción correspondientes a la ventana de construcción y del túnel superior especialmente en las categorías de excavaciones, obra civil y de refuerzo.

Referencias

- Bacca-García, J. O. y Toro, J. (2021). *Análisis de la vulnerabilidad de la hidroelectricidad en Colombia*. *Gestión y Ambiente*, 24(Supl2), 27–45.
<https://doi.org/10.15446/ga.v24nSupl2.92923>.
- Celsia. (2022). *Centrales hidroeléctricas*.
<https://www.celsia.com/es/centrales-hidroelectricas/?country=colombia-centrales-hidroeléctricas>.
- ESHA. (2006). *Guía para el Desarrollo de una Pequeña Central Hidroeléctrica*. Comunidad Europea: European Small Hydropower Association.
- IDAE. (2006). *Minicentrales Hidroeléctricas*. Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.
- INEA. (1997). *Guía de Diseño para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Bogotá, Colombia. Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas.
- Isagen. (2022). *Generamos energía*.
<https://isagen.com.co/es/nuestro-negocio/generamos-energía>.
- Ortiz-Flórez, R. (2022). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Segunda edición. Ediciones de la U.
- Osorio, J. F. (2008). *Energía hidroeléctrica*. Segunda edición. Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- RAP-E (2020). *Pequeñas Centrales hidroeléctricas (PCH's)*. Universidad distrital Francisco José de Caldas.
- Sandoval Erazo, W. R. (2018). *Diseño de obras hidrotécnicas*. Quito, Ecuador Sandoval Erazo, Washington Ramiro.
- UPME, IGAC. (2015). *Atlas Potencial Hidroenergético de Colombia*, pp 25-78.