



2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1 INTRODUCCION

En este capítulo se presenta una descripción de las obras que conforman el Proyecto Hidroeléctrico de Ituango, según los diseños de factibilidad adelantados a partir de la alternativa de desarrollo seleccionada en el proceso de investigación, estudio y análisis de alternativas. Esta descripción incluye la indicación de los criterios más sobresalientes tenidos en cuenta en el diseño de las obras principales.

El proyecto, comprende fundamentalmente una presa de enrocado localizada unos 600 m arriba de la desembocadura del río Ituango al río Cauca; cuenta con obras para descargas de fondo e intermedia y un vertedero en canal abierto para evacuación de crecientes, obras ubicadas sobre la margen derecha del río. Próximas a la presa, y también sobre la margen derecha, se localizan las obras para generación que comprenden ocho captaciones sumergidas conectadas a las conducciones a presión que alimentan los ocho grupos turbina – generador de eje vertical, que se alojan en la caverna de casa de máquinas, conectados por galerías de barras a ocho bancos de transformadores monofásicos situados en la caverna de transformadores. El agua turbinada llega a dos cavernas independientes que actúan como almenaras de aguas abajo, de donde se desprenden cuatro túneles de descarga mediante los cuales el caudal es devuelto al río Cauca.

El esquema, la disposición y los diseños de factibilidad adoptados para el proyecto, tienen en cuenta la posibilidad de que éste se realice en dos etapas. Es así como la modulación de la casa de máquinas, al igual que el dimensionamiento y ubicación relativa de la mayor parte de los componentes de la central, se han diseñado dando consideración a dicha posibilidad.

El diseño de factibilidad del proyecto ha comprendido, también, el diseño de las vías de acceso a los distintos frentes de obras, de las vías sustitutivas que reemplazarán las que serán afectadas por el embalse y de la línea de transmisión que suministrará la energía para la construcción de las obras. Así mismo, se han considerado las necesidades de campamentos para el alojamiento del personal de construcción.

2.2 PRESA Y OBRAS ANEXAS

2.2.1 Presa

2.2.1.1 Descripción

La presa, del tipo de enrocado con núcleo de tierra (ECRD), está localizada en el sitio del eje de aguas abajo (Eje 1), el mismo adoptado en los estudios de factibilidad de los años 1982 y 1999, y cuyas ventajas respecto al de aguas arriba fueron confirmadas en los presentes estudios. Su altura es de 220 m, con corona de 12 m de ancho y de 500 m de longitud, a la cota 430 (véanse Figura 2.1 y Figura 2.2). El talud de aguas abajo de la presa tiene una inclinación promedio del orden de 1,75H:1V, resultante de un talud básico 1,4H:1V, suavizado con la construcción de una vía de acceso a través del talud. Esta vía sobre el talud, cuyos objetivos fundamentales son facilitar la colocación de roca durante construcción y, posteriormente, permitir el mantenimiento y acceso a galerías de drenajes y a la descarga intermedia, se proyectó con un ancho de 10 m y una pendiente longitudinal del 15%, aproximadamente. El talud de aguas arriba de la presa es de 1,8H:1V, dispuesto en forma continua, esto es sin bermas.

Figura 2.1. Presa del proyecto hidroeléctrico Ituango

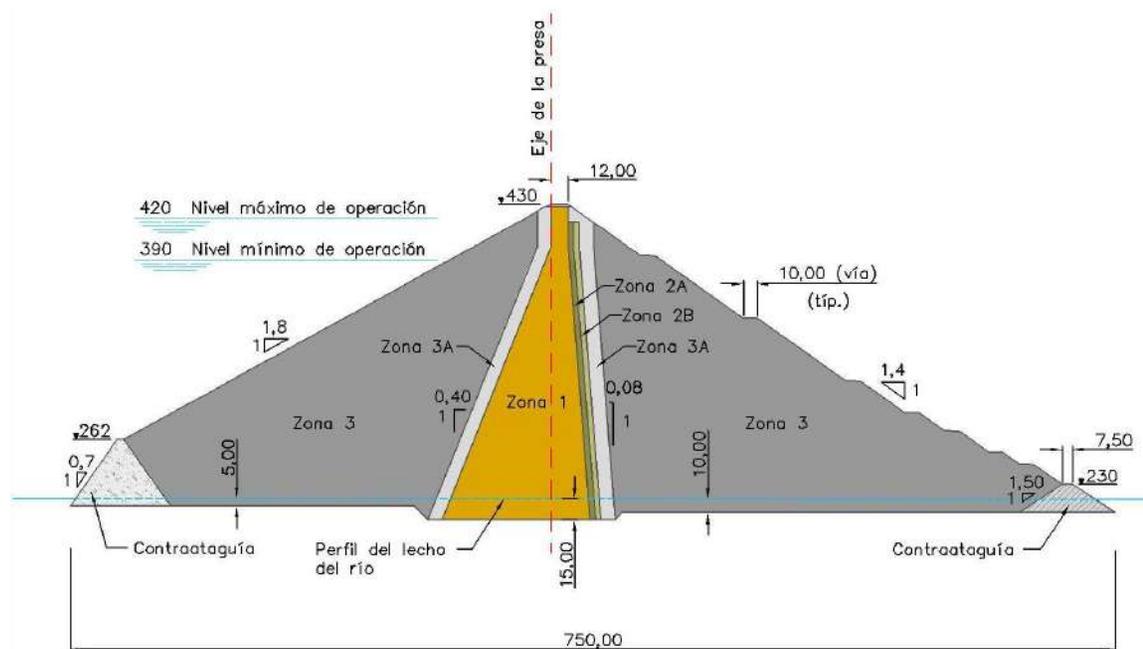
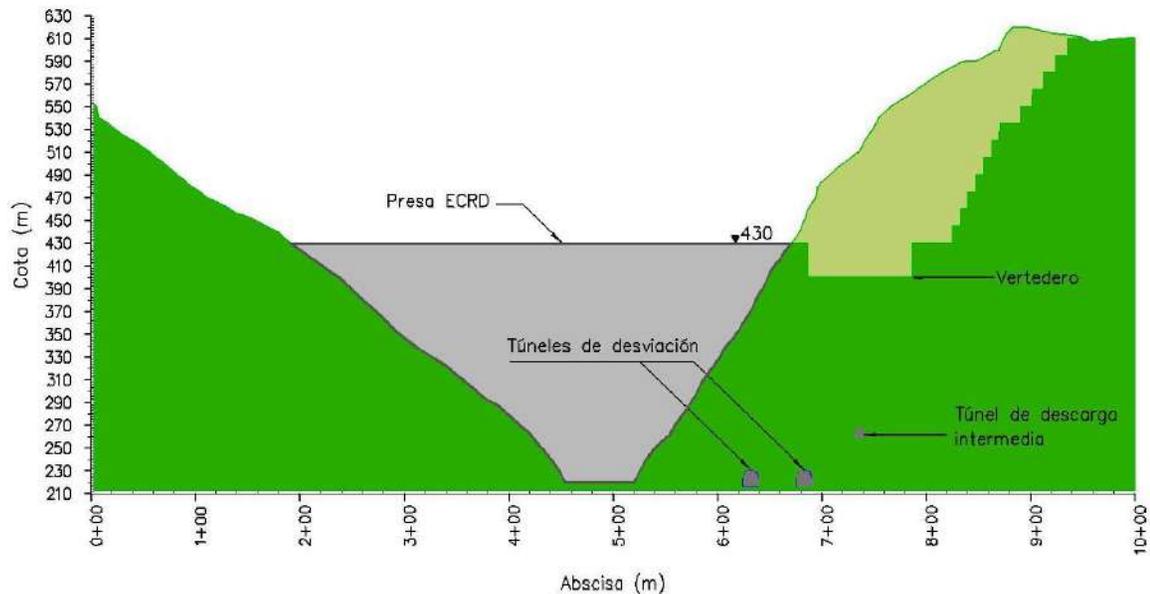


Figura 2.2. Vista frontal de la presa



La impermeabilidad del lleno de roca se logra mediante un núcleo de tierra con taludes 0,4H:1V en el lado de aguas abajo y 0,08H:1V en el lado de aguas arriba. Entre el núcleo de tierra y el lleno de roca se ha dispuesto, en la cara de aguas arriba, una zona de transición de 10 m de espesor, conformada por material con un tamaño máximo de 0,20 m y, en la cara de aguas abajo, una transición compuesta por dos filtros de 4 m de espesor, uno de arena y otro de cascajo.

Se ha previsto que la fundación del núcleo y de los materiales de filtro y transición se haga sobre material de roca tipo IIB, por lo cual será necesario excavar hasta encontrar esta calidad de roca en la fundación; los espaldones de roca serán fundados, principalmente, sobre roca tipo IIA.

Debajo del núcleo se planea efectuar una malla de inyecciones de consolidación. Sobre la zona que recibirá el núcleo se colocará una malla electrosoldada de refuerzo y se vaciará una capa de concreto de nivelación de aproximadamente 0,50 m de espesor.

Para la desviación del río Cauca, se ha dispuesto la construcción de una ataguía de 52 m de altura con corona en la cota 262; el desvío se hará a través de dos túneles, dimensionados conjuntamente con la ataguía, con el criterio de que permitan evacuar una creciente con un caudal de 4.700 m³/s correspondiente a un período de retorno de 50 años, sin que la ataguía sea desbordada. La ataguía será de concreto compactado con rodillo (CCR), incorporada a la presa, con taludes de 0.7H:1V en ambas caras.

La preataguía para la desviación del río tendrá 30 m de altura y corona en la cota 240; estará conformada por roca y suelo, con taludes de 1,5H:1V en ambas caras. La preataguía se diseñó con el criterio de que no sea sobrepasada al evacuar por los túneles



de desviación la creciente con un período de retorno de 2,33 años. Con el fin de moderar los riesgos y minimizar los posibles daños que pueda sufrir la preatagüa en el evento que sea sobrepasada por una creciente mayor que la de diseño mientras se construye la atagüa, se ha previsto que la cara de aguas debajo de la preatagüa sea protegida con una capa de concreto. El volumen total de la presa (incluyendo la atagüa y la contraatagüa que están incorporadas a ésta) es de aproximadamente 16.300.000 m³.

Como parte del sistema de impermeabilización de la fundación de la presa se ha previsto una cortina de inyecciones, construida con perforaciones profundas, ejecutadas desde la losa en la base del núcleo, que se extenderá por la losa del canal de aproximación del vertedero y por la base del muro de revestimiento de la zona derecha de dicho canal.

Para el sistema de drenaje se ha previsto la ejecución de una cortina de perforaciones profundas, ejecutadas a partir de galerías construidas a distintos niveles, en ambas márgenes.

En el lleno de la presa se distinguen las siguientes zonas, conformadas como se indica:

- **Zona 1.** Constituye el núcleo de la presa. Se conformará principalmente con materiales de baja permeabilidad, pero se admitirán tamaños de arenas y de guijarros de hasta 20-30 cm, los cuales aumentan la resistencia del núcleo.
- **Zonas 2.** Constituyen los filtros (Zonas 2A y 2B) que se construirán en la cara de aguas abajo del núcleo, conformados predominantemente con materiales de origen aluvial.
- **Zonas 3.** Comprenden las transiciones (Zonas 3A) y los espaldones (Zonas 3B) de la presa. El tamaño máximo y el espesor de colocación de las capas aumentan hacia el exterior de la presa. Se construirán con fragmentos rocosos procedentes de las excavaciones requeridas para la obra, principalmente de la excavación para el vertedero.

Los volúmenes de material requerido son: 2,0 millones de material para núcleo, 1,7 millones para las zonas de filtros y 12,4 millones para los respaldos de roca. Además, para la atagüa se requieren 190.000 m³ de CCR.

2.2.1.2 Atagüa

Teniendo en cuenta las características topográficas del sitio del proyecto, particularmente la estrechez del cañón en los niveles próximos al río, y las experiencias recientes en otros proyectos, se consideró en el caso de Ituango una atagüa del tipo de concreto compactado con rodillo. La atagüa sería del tipo de lleno duro por su costo favorable y la facilidad de ejecución.

Las principales razones para la adopción de este tipo de atagüa son las siguientes:



- Facilita que, sin incurrir en aumentos excesivos de tiempo o costo, su diseño atienda la evacuación a través de los túneles de desviación, de la creciente de 25 años de período de retorno, dejando un borde libre y de la creciente de 50 años a ras de la corona.
- No habría peligro de destrucción durante la etapa de construcción, aún en el evento de que sea sobrepasada por una creciente alta en el período de verano.
- Su incorporación a la presa como pata de aguas arriba, representa ventajas para la estabilidad de la estructura.
- Permite acortar los túneles de desviación, con las consiguientes ventajas en costo y tiempo de ejecución.

La altura de la ataguía es de 52 m, con corona en la cota 262; se ha diseñado con paredes simétricas, con inclinación 0.7H:1V, construida en capas de 0.30 m de espesor; con un CCR de 50 kg/m³ de contenido de cemento. Prácticamente no tendrá ningún tratamiento de juntas, excepto limpieza y retiro del mortero superficial, ni control de calor. Se construirá con agregados procedentes de los depósitos del río San Andrés, sin ningún procesamiento y utilizando tamaño máximo de 100 mm.

2.2.1.3 Estabilidad de la presa

La sección adoptada para la presa, particularmente su configuración geométrica y zonificación física, atiende criterios y ofrece una adecuada estabilidad estática y estabilidad dinámica acordes con el nivel de factibilidad de los presentes diseños.

La estabilidad estática tiene en cuenta las características geotécnicas de la fundación y la calidad de la roca para el enrocado, y se enmarca dentro de casos precedentes. La inclinación relativamente suave del talud aguas abajo es importante como factor que contribuye a disminuir las deformaciones del lleno; la disposición de una vía amplia en este talud es particularmente útil para el transporte de roca desde la excavación del vertedero hacia los sitios de colocación.

En la etapa de diseño detallado se deberá efectuar un análisis de verificación, basado preferiblemente en resultados de ensayos sobre muestras del enrocado. Para las muestras se usarían tamaños entre 0.30m y 0.50 m de diámetro, procurando una adecuada reproducción a escala del enrocado real, de acuerdo con técnicas actualmente empleadas y aceptadas para estos efectos.

En cuanto a la estabilidad dinámica, también se considera aceptable, teniendo en cuenta el análisis comparativo con otros proyectos, realizado en los estudios de 1982, y diseños de otros proyectos más actuales. En la etapa de diseño definitivo deberá efectuarse un análisis dinámico completo, con el fin de verificar que los taludes sean los adecuados.



En el diseño adoptado se han tenido en cuenta criterios cualitativos que, con base en estudios sobre modelos y en experiencias con prototipos que han sido afectados por sismos fuertes, han mostrado su eficacia y han dado lugar a un comportamiento satisfactorio. Entre estas medidas se tienen las siguientes:

- Borde libre amplio, por lo menos 10 m sobre el nivel máximo normal.
- Corona ancha, por lo menos 12 m en este caso. Además, dada la especial vulnerabilidad durante sismos fuertes de la parte superior de la presa, ésta deberá diseñarse con excelentes condiciones de drenaje, alta densidad y filtros de espesor y características conservativas en cuanto a su granulometría.
- Sistema de drenaje aguas abajo del núcleo, constituido por: i) un filtro arenoso con tamaño máximo de 25,4 mm en contacto con el núcleo, ii) filtro de cascajo procesado entre 0,30 mm y 100 mm, y iii) transición con tamaño máximo de unos 0,20 m.
- Capas de enrocado relativamente delgadas, con alto grado de compactación y con incorporación de agua durante el proceso.
- Capas de enrocado y condiciones de compactación tan estrictas aguas abajo como aguas arriba.

2.2.1.4 Instrumentación de la presa

Para el control y seguimiento del comportamiento de la presa durante su construcción y en su vida útil, en esta etapa de factibilidad se ha previsto un sistema de instrumentación que, básicamente, comprende los siguientes aspectos y componentes:

- Dado que uno de los aspectos más importantes en la evaluación del comportamiento de una presa de enrocado es el referente al caudal de filtraciones a través de la misma, para su medida y seguimiento se ha considerado la instalación de un vertedero ubicado en un muro de concreto en el pie de aguas abajo de la presa.
- Para la medida de presión de agua y de nivel freático se ha previsto la instalación de piezómetros en el núcleo y cuerpo de la presa, así como en la fundación y en los estribos. Así mismo, se han considerado instrumentos para medir desplazamientos verticales y horizontales dentro del cuerpo de la presa, y mojones en la superficie de los taludes para establecer mediante control topográfico, los desplazamientos horizontales y verticales que experimentarán los citados taludes.
- Se consideró además, la instalación de acelerógrafos en vecindades de la cresta de la presa y en la fundación de la misma.

En el plano F-PHI-310-IN-01 se muestra la disposición general de la instrumentación de la presa.



2.2.1.5 Sistema de inyecciones

La cortina de inyecciones para la impermeabilización de la fundación, se localizó en el tercio de aguas arriba de la base del núcleo de la presa y se construirá con perforaciones profundas efectuadas desde la losa de fundación del núcleo. Esta cortina se prolongará en el estribo derecho por la losa del canal de aproximación del vertedero y por la base del muro de revestimiento del costado derecho de este canal.

La cortina tiene una longitud de aproximadamente 720 m y constará de perforaciones primarias Ip1 de 70 m de profundidad con recuperación de núcleo, efectuadas cada 24 m y perforaciones primarias Ip2 con una profundidad de 50 m, también cada 24 m e intercalada cada 12 m con las Ip1. La cortina tendrá además perforaciones secundarias cada 6 m y terciarias cada 3; la ejecución y profundidad de estas se decidirá con base en los resultados de las inyecciones primarias. En la zona del azud del vertedero y en la margen derecha del canal de aducción del vertedero, la profundidad tentativa de las perforaciones es de 50 m.

A lo largo de la fundación del núcleo se tendrá un sistema de inyecciones de consolidación, compuesto por cinco filas de perforaciones paralelas al eje de la cortina de inyecciones, espaciadas cada 4 m en ambas direcciones y con profundidades variables de 6 a 10 m.

En la zona de los tapones de los túneles de desviación y de la descarga intermedia, así como en la parte superior del contrafuerte izquierdo de la presa, se efectuarán abanicos de inyecciones.

2.2.1.6 Sistema de drenaje

Para el sistema de drenaje se ha diseñado un sistema de galerías localizadas en ambos contrafuertes de la fundación del núcleo de la presa, en las cotas 206, 256, 306 y 356, con una sección de 2 m de ancho con hastiales verticales de 2 m de altura y bóveda semicircular de 1 m de radio. A estas galerías se accede desde la vía construida sobre el talud de aguas abajo de la presa, mediante galerías conectoras que suben hasta las galerías de las cotas 206 y 306. Además, se proyectaron galerías que comunican los distintos niveles.

La cortina de drenaje se construirá con perforaciones de 3" de diámetro y espaciadas cada 5 m, que se ejecutarán desde el piso y el techo de las galerías.

En el plano F-PHI-310-ID-01 se muestra la disposición del sistema de drenaje.

2.2.2 Vertedero

El vertedero de crecientes será en canal abierto, con un ancho variable entre 100 m en el azud de control y 60 m en el deflector, en una longitud de aproximadamente 495 m y con una pendiente de aproximadamente el 20% (véase Figura 2.3). Se ha localizado en el contrafuerte derecho, en donde se logra un favorable alineamiento para la descarga al río Cauca, gracias a la curva que éste presenta (véase Figura 2.4); además, este contrafuerte ofrece las mejores condiciones geológicas para la excavación de los altos taludes que requiere.

El vertedero se ha diseñado para evacuar la creciente máxima probable, cuyo caudal de entrada es de 25.300 m³/s y de salida de 23.250 m³/s. Es controlado por cinco compuertas radiales de 16 m de ancho y 21,50 m de altura, separadas por pilas de 5 m de ancho. La cresta del azud sobre el cual asientan las compuertas radiales se localiza en la cota 400, en tanto que el nivel del deflector, desde donde el agua es lanzada al pozo de disipación de energía, se ubica en la cota 320.

El canal del vertedero se ha prolongado de manera que en el sitio donde se origina el chorro ofrezca el menor riesgo posible para la descarga de la central y que la velocidad del flujo sea inferior a 40 m/s. En este sitio se ha proyectado un pozo de disipación preexcavado, que a su vez servirá como material de préstamo para parte del lleno de la presa, con fondo en la cota 200, y que recibirá las aguas lanzadas desde el deflector en la cota 320. Si bien es posible que al operar el vertedero se produzca alguna erosión en el fondo del pozo y en el cauce del río, se espera que con las dimensiones y el diseño adoptado para el pozo y el volumen excavado, la cantidad de material que se desprenda durante la operación del vertedero sea reducida y no se deposite en el lecho del río y afecte la sumergencia de la central.

Debido a lo empinado del contrafuerte derecho, los taludes resultantes de la excavación del vertedero, tanto en la zona de entrada donde se encuentran las compuertas, como en la salida, deflector y pozo de disipación, llegan a tener alturas superiores a los 250 m, dando como resultado un volumen de excavación de unos 11.500.000 m³. La excavación de estos taludes, para los cuales se contempla un tratamiento con pernos y concreto lanzado reforzado con fibra, se ha previsto realizarla considerando bancos verticales de 15 m de altura, separados por bermas, así: desde el fondo del canal o del pozo hasta la cota 535 bermas de 7,50 m, para una inclinación promedio de 0,5H:1V; entre las cotas 535 y 625 bermas de 11,25 m para una inclinación de 0,75H:1V, y de la cota 625 en adelante, bermas de 15 m para una inclinación de 1H: 1V. Las bermas en las cotas 330, 430 y 535 serán de 20 m de ancho, con la finalidad de contener eventuales desprendimientos de roca de las zonas superiores del talud. Las bermas se construirán con una pendiente transversal del 7% y una pendiente longitudinal del 3%.

Figura 2.3. Esquema del Vertedero

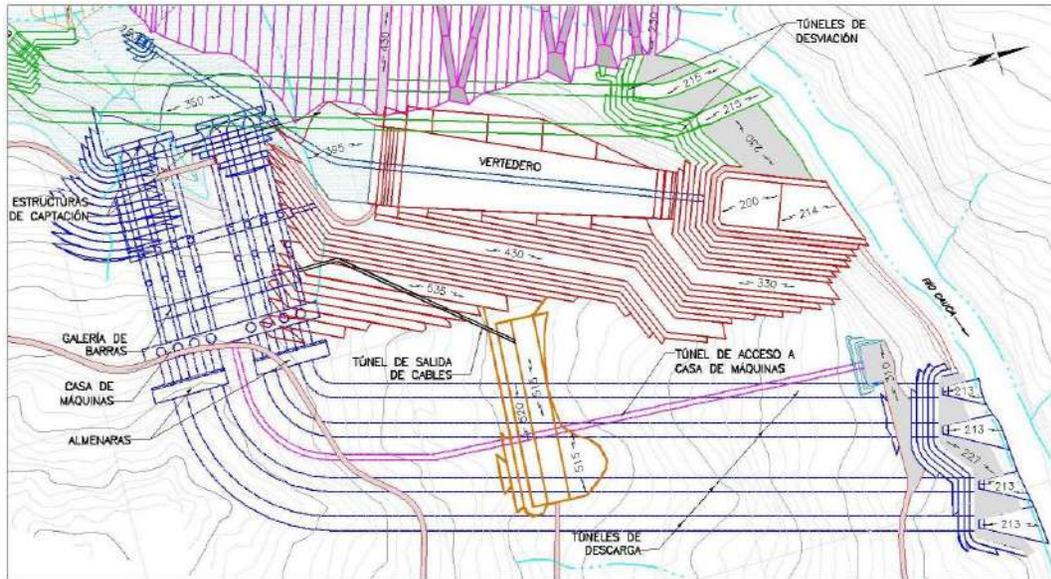
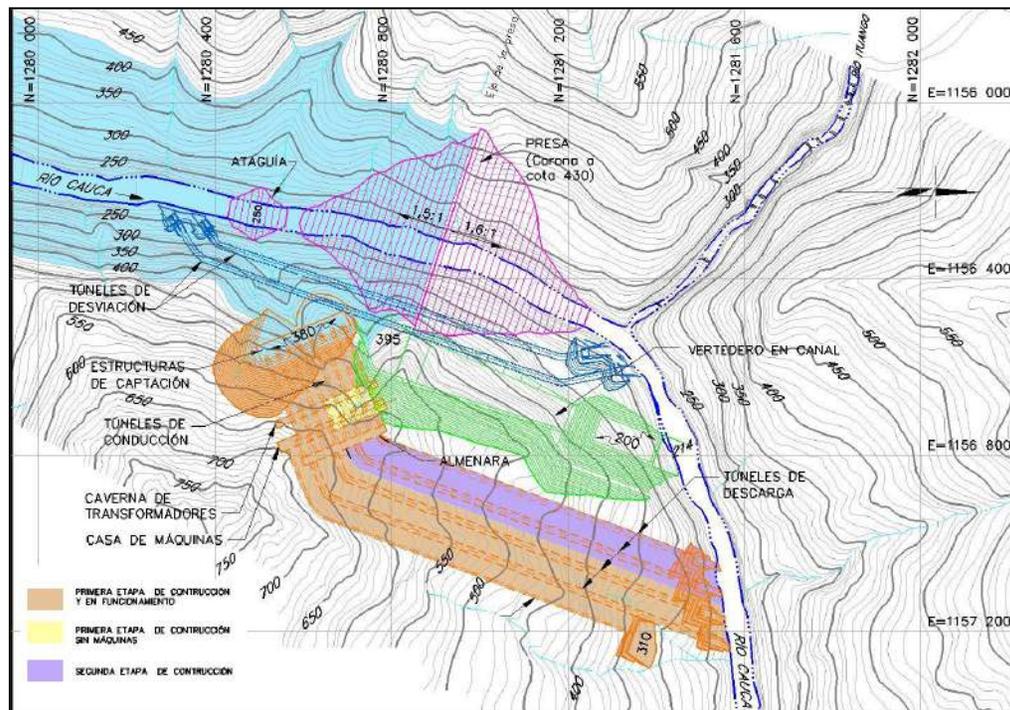


Figura 2.4. Localización del vertedero en el esquema general del proyecto





El canal del vertedero, debajo de la zona del azud, será atravesado por la prolongación de la cortina de drenaje de la presa, que se conectará con una galería de drenaje dispuesta a lo largo del vertedero, con descarga en el pozo de aquietamiento.

En los planos F-PHI-310-VE-01 y F-PHI-310-VE-02 se muestran la planta general y las secciones del vertedero de crecientes.

2.2.3 Obras de desviación y descarga de fondo

2.2.3.1 Desviación

Para la construcción de la presa, la desviación del río Cauca se ha dispuesto mediante dos túneles paralelos emplazados en la margen derecha, separados de modo que la distancia libre entre ellos fuera de al menos 2,5 veces su diámetro. Las entradas de los túneles se han localizado en un sitio tal que permitan ubicar la preatagüa de modo que entre ésta y la atagüa se cuente con un espacio libre suficiente para desarrollar los trabajos en la pata de la presa. Al final de la construcción de las obras, este espacio podrá servir como zona de depósito y a la vez contribuir a la impermeabilización de la cara de aguas arriba de la presa. Las estructuras de salida de los túneles de desviación se localizan en la zona conformada por el retiro del depósito aluvial “colgado” al frente de la desembocadura del río Ituango, de tal manera que no interfirieran con el pozo del vertedero.

Los túneles se han diseñado con una sección hidráulica de 14 m de ancho, hastiales verticales de 7 m de altura y bóveda de 7 m de radio, con capacidad de evacuar una creciente con un caudal pico máximo de 4.700 m³/s, que corresponde a la creciente con un período de retorno de 50 años, sin sobrepasar la atagüa. Las longitudes aproximadas de los dos túneles son 811 m y 1.065 m, respectivamente.

El alineamiento vertical de los túneles tiene una pendiente sostenida entre el 0,38% y 0,50% aproximadamente, la cual coincide bastante bien con la pendiente del río, o sea que se aprovecha la caída del río entre la entrada y salida de la mejor manera posible. La estructura de entrada de cada uno de los túneles cuenta con una pila central, de modo que cada túnel se cerrará mediante dos compuertas deslizantes de 7 m de ancho y 14 m de altura, las cuales permitirán la construcción de los tapones de concreto para el cierre definitivo de los mismos.

En los planos F-PHI-310-OD-01, 03, 04 y 05 se muestran secciones típicas de los túneles de desviación y sus estructuras de entrada y salida.

2.2.3.2 Descargas de fondo e intermedia

Con el fin de mantener permanentemente en el río Cauca, durante el llenado del embalse, un caudal por lo menos igual al mínimo registrado, tal como lo señalan requerimientos ambientales, se ha previsto la construcción de obras de descarga que garanticen la evacuación de unos 300 m³/s. Puesto que la magnitud del caudal medio del río y el volumen del embalse, hacen que la utilidad de la descarga de fondo sea casi nula para controlar el llenado del embalse o para el vaciado del mismo, el propósito de las obras de descarga es únicamente garantizar el caudal mínimo antes citado y, consecuentemente, no se considera práctico disponer una descarga de mayor capacidad.

Por razones prácticas de limitación de la cabeza máxima para el cierre y apertura de las compuertas, las obras de descarga se han proyectado a dos niveles: una descarga de fondo que aprovecha el túnel de desviación No. 1 (túnel izquierdo) y una descarga intermedia consistente en un túnel a la cota 260, que descarga en el pozo de disipación del vertedero.

La descarga de fondo tendrá dos compuertas planas de 3 m de ancho y 3,90 m de altura, operadas desde una cámara construida aguas arriba del sitio en donde se taponará el túnel de desviación No. 1. La descarga intermedia estará constituida por un túnel de 8 m de ancho, hastiales verticales de 4 m de altura y bóveda semicircular de 4 m de radio, con una longitud de 783 m aproximadamente. A la altura del eje de la presa se construirá un domo desde donde se controlarán dos compuertas radiales de operación y dos compuertas planas de mantenimiento, con dimensiones de 3 m de ancho y 3,90 m de altura.

Una vez las obras de la presa se encuentren a una altura que permita evacuar la creciente de diseño operando únicamente el túnel de desviación No.2 (túnel derecho), se procede a cerrar las compuertas del túnel de desviación No. 1, y a construir en éste las obras de la descarga de fondo. Cuando se terminen completamente estas obras, se debe haber terminado también la construcción del túnel y obras de la descarga intermedia de la presa y del vertedero de crecientes, de modo que se proceda al llenado del embalse y la construcción del tapón del cierre definitivo del túnel de desviación No. 2. Para ello, se abren las compuertas del túnel No.1, con las compuertas de la descarga de fondo abiertas, y se cierran gradualmente las compuertas de la entrada del túnel No. 2, de modo que se garantice la circulación permanente del caudal ecológico. Cuando el nivel del embalse alcance suficiente cabeza que garantice la evacuación del caudal ecológico por la descarga intermedia, se cierran definitivamente las dos compuertas de la descarga de fondo. Finalmente, cuando el embalse esté lleno y se tenga descarga de caudales por el vertedero de crecientes, se puede cerrar la descarga intermedia.

La descarga intermedia podrá abrirse durante la operación del proyecto, con el fin de garantizar la salida del caudal ecológico, en el caso eventual que se suspenda la generación completamente y que el nivel del embalse sea tal que no se tenga descarga de caudales por el vertedero de crecientes.



En los planos F-PHI-310-DF-01 y F-PHI-310-DI-01 se muestran detalles de las descargas de fondo e intermedia respectivamente.

2.2.4 Fuentes de materiales y zonas de depósito

2.2.4.1 Materiales para la presa

Para la obtención de los materiales que conforman las distintas zonas consideradas en el diseño del lleno de la presa se han previsto las fuentes que a continuación se indican:

- **Materiales para la Zona 1.**

Se han explorado tres fuentes de materiales. El denominado Préstamo 1, que corresponde al investigado en los estudios realizados en 1982. Está localizado en la margen izquierda del río Cauca, en vecindades del sitio de presa, aproximadamente entre las cotas 900 y 800. Está constituido por un depósito de coluvión, con materiales predominantemente finos (limos arcillosos de color carmelito **claro**); hay presencia de fragmentos granulares de tamaño variable de hasta máximo 50 cm, en superficie. La observación de las muestras tomadas durante los presentes estudios y los resultados de los ensayos realizados en los estudios de 1982, conducen a concluir que estos materiales son aptos para la construcción del núcleo. Se anticipa que se requeriría un procesamiento sencillo, consistente en la separación y retiro de materiales de tamaño mayor de 20 a 30 cm.

El Préstamo 2, localizado en la margen derecha del río Cauca, aguas arriba del sitio de presa, entre las cotas 1100 y 1300 aproximadamente. Está constituido por suelo residual de neiss, de color rojizo. La muestra observada en esta etapa de los diseños, permite considerar que este material también sería apto para la construcción del núcleo de la presa.

El Préstamo 4 está localizado en la margen izquierda del río Cauca, aguas arriba del Préstamo 1, cerca del sitio en donde se localizaron los campamentos empleados en los estudios de 1982. Está constituida por un depósito, aparentemente de origen coluvial, con características similares al Préstamo 1.

Los Préstamos 1 y 2, tiene una extensión aproximada de 300 hectáreas y presentan una cobertura vegetal de 0,30 a 0,40 m de espesor, que descansa sobre una capa de suelo, cuyo espesor se ha estimado en 3 m. Teniendo en cuenta que el material de núcleo requerido para la presa es del orden de 2.000.000 m³, se anticipa que se contará con volúmenes suficientes para su construcción.

- **Materiales para las Zonas 2.**

En los estudios realizados en 1982 se exploraron los depósitos aluviales del río San Andrés, que constituyen el Préstamo 3. Los materiales procedentes de esta zona se



emplearán para construcción de las Zonas 2 del relleno de la presa, y también para elaboración de mezclas de concreto. Las exploraciones efectuadas durante esta etapa de los diseños, permitieron establecer con un mayor grado de aproximación el volumen y características de materiales disponibles. El Préstamo 3 tiene una extensión aproximada de 157 hectáreas.

- **Materiales para las Zonas 3.**

La principal fuente de materiales para los enrocados de la presa está constituida por las excavaciones del vertedero, las cuales se han estimado en aproximadamente 11.500.000 m³. También se dispondrá para los llenos de la presa, de materiales provenientes de las excavaciones superficiales y subterráneas de las obras de generación.

En el plano F-PHI-150-GT-002 se muestra la localización general de las fuentes de materiales para la construcción de las obras del proyecto.

2.2.4.2 Zonas de depósito de materiales

Para el depósito temporal o permanente de materiales procedentes de las excavaciones que no se utilizarán directamente en el lleno de la presa, se hace necesario disponer de áreas adecuadas. Las áreas de depósito temporal servirían para almacenar materiales que se emplearán posteriormente en el relleno de la presa, como los procedentes de las excavaciones de los túneles de desviación y de acceso a la Central. En los estudios realizados en 1999 se identificó un área para depósito de materiales, vecina a la desembocadura del río San Andrés. Si bien esta zona es adecuada, dada su configuración topográfica favorable, la distancia al sitio de la obra, de unos 12 km, hace que el transporte de materiales resulte costoso. Por lo anterior, en el presente estudio, se buscaron algunas zonas de depósito más cercanas al sitio de presa.

Se evaluaron zonas de depósito en la margen derecha del río, sobre las cuencas de la quebradas Ticutá, aguas abajo de la descarga de la central y Tenche, aguas arriba de la presa y en un sitio aledaño a la plazoleta para la subestación, sobre el costado oriental del vertedero; además, otro sitio en cercanías a la desembocadura del río San Andrés en el río Cauca. En estos depósitos, que se describen a continuación, se dispondrán los materiales provenientes de las excavaciones de las obras, que no sean utilizados en los llenos de la presa.

Depósito Ticutá 1: Se localiza a una distancia de aproximadamente 2.600 m de las obras de descarga de la central, en la cuenca de la quebrada Ticutá, por debajo de la vía proyectada para el acceso a los túneles de descarga de la central, ocupando una zona entre las cotas 230 y 340. Este depósito se prediseñó con pendientes de 2H:1V y plazoletas en las cotas 320 y 330; su capacidad se estimó en 1.100.000 m³.



Depósito Ticuitá 2: Esta zona se localiza a unos 200 m al Este del depósito Ticuitá 1, y se sitúa también por debajo de la vía de acceso a los túneles de descarga de la central, ocupando el sector entre las cotas 300 y 430. Este depósito se prediseñó con pendientes de 2H:1V y una plazoleta en la cota 360; su capacidad se ha estimado en 1.300.000 m³.

Este depósito podrá ser parcialmente utilizado para almacenar alguna cantidad de material sobrante de las excavaciones de las vías de acceso al proyecto, en las zonas más cercanas a las obras principales, con el fin de facilitar el transporte de material en la fase inicial de la construcción del proyecto, en la cual las vías apenas estarían siendo construidas, y por lo tanto, los acarrees se tendrían que hacer por vías de bajas especificaciones. El volumen de este depósito que se ocupe con material proveniente de las vías, puede compensarse disponiendo material sobrante de las obras principales en los depósitos para vías 2 y 3, que se indican más adelante, en la descripción sobre vías de acceso. Para este entonces, la fase en que se encuentra la construcción facilitará el acarreo de este material, ya que las vías de acceso al proyecto, se encontrarán totalmente terminadas.

Depósito Tenche. Está ubicado unos 1.600 m aguas arriba del eje de la presa, adyacente a la vía de acceso a la presa, entre las cotas 330 y 440. El depósito se conformará con pendientes de 2H:1V, y su capacidad se estimó en 1 700 000 m³.

Depósito Subestación. Se localiza justo sobre el costado nor-oriental de la plazoleta de la subestación, entre las cotas 440 y 510. El depósito se conformará con pendientes de 2H:1V. La capacidad de este depósito se estimó en 700.000 m³.

Depósito Cuní. Está situado a una distancia de aproximadamente 9,4 km aguas arriba de la captación, adyacente a la vía de acceso a la presa, al frente de la desembocadura de la quebrada Cuní en el río San Andrés y sobre el costado norte de la quebrada Careperro, entre las cotas 580 y 810. El depósito se conformará con pendientes de 2H:1V. La capacidad de este depósito se estimó en 2.400.000 m³.

2.3 OBRAS DE GENERACIÓN

2.3.1 Características y criterios generales

Para el diseño a nivel de factibilidad de las obras de generación del Proyecto Ituango, se han tenido en cuenta las siguientes características y criterios de carácter general:

- Las condiciones geológicas y geotécnicas del macizo rocoso y la estabilidad de las laderas en la zona de las obras de la central, permiten disponer y orientar con relativa libertad las cavernas principales de la central, y en general, las diferentes obras; no obstante se prevé el requerimiento, cuando fuere necesario, de tratamientos locales de estabilización en cavernas, túneles y pozos, taludes exteriores. En desarrollo de este criterio, los ejes longitudinales de las estructuras de captación, de los pozos de presión y de las cavernas de la casa de máquinas se localizan en paralelo.



- Se considera una conducción para cada una de las unidades generadoras, con un espaciamiento definido por la separación entre estas últimas. Las conducciones serán lo más cortas posibles y de la misma longitud para que sus características hidráulicas sean las mismas y, por lo tanto, los saltos netos y potencias de las unidades generadoras, iguales.
- Con el fin de lograr la mínima longitud de conducción y descarga de la central, la plazoleta de captación se localiza lo más cerca posible al vertedero, y las estructuras de descarga de la central, lo más cerca posible aguas abajo de la descarga del vertedero.
- Las obras de generación, que se describen en detalle a continuación, están conformadas por un sistema de captación y conducción; las cavernas de transformadores y de casa de máquinas y sus obras anexas; y por último, un sistema de descarga con dos almenaras, de cada una de las cuales se desprenden dos túneles de descarga a presión que entregan el caudal turbinado al río Cauca.

2.3.2 Obras de captación

2.3.2.1 Generalidades

En la elaboración de los diseños de estas estructuras, se revisó el esquema de torre de aducción frontal con compartimiento de compuertas, considerado en los análisis de alternativas, y se estudiaron nuevas opciones teniendo en cuenta las siguientes características y criterios:

- La plazoleta para localizar las estructuras de captación se ubica lo más cerca posible al vertedero, respetando la configuración y aducción de este último, pero orientada con dirección norte - sur, es decir, paralela al río Cauca, procurando reducir el volumen de excavación.
- La plazoleta se define con un ancho mínimo en la sección más crítica, de manera que se logre la fundación de las estructuras de captación en roca de buena calidad.

Se estudiaron tres opciones técnicamente comparables:

- **Opción 1.** Consistente en torres de captación de aducción frontal, localizadas en una plazoleta a la cota 367,20 msnm., con una altura de 62,8 m y piso de operación en la cota 430 msnm., con rejas coladeras móviles, con guías y con pórtico grúa para instalar y accionar las compuertas.
- **Opción 2.** Conformada por captaciones sumergidas de aducción frontal, con rejas coladeras fijas, localizadas en una plazoleta a la cota 350 msnm. Cada una de las captaciones dispone de un pozo de compuertas, localizado en una plazoleta a la cota 430 msnm y en la abscisa 120 del túnel superior que tiene pendiente del 10%.



cota 460 msnm; de este nivel hacia arriba se continúa con cortes de 15 m de altura y bermas de 11,25 m de ancho, para alcanzar una pendiente promedio de 0,75 H:1,0 V; de la cota 520 msnm en adelante, se realizan cortes en suelo con pendiente 0,75 H:1,0 V, con bermas de 11,25 m cada 15 m. La carretera sustitutiva San Andrés – Ituango, que pasa por la corona de la presa, cruza el talud de la plazoleta sobre la cota 430 msnm, por lo que esta berma tendrá un ancho de 12 m. Será necesario además, construir un puente en la zona central del talud, de unos 80 m de luz, donde se presenta una depresión topográfica.

Como tratamiento de los taludes de la plazoleta se contempla lo siguiente:

- Toda la superficie del talud estará cubierta con una capa de concreto lanzado de 0,06 m de espesor, reforzada con fibra de acero.
- Entre las cotas 470 y 520 msnm, el talud tiene pernos de 6 m de longitud, espaciados cada 2 m y dispuestos a manera de tresbolillo. Además, tiene perforaciones de drenaje de 9 m de longitud en 3 filas espaciadas 4 m horizontal y verticalmente.
- Entre las cotas 430 y 470 msnm el talud tendrá el mismo sistema de refuerzo, pero con los pernos espaciados cada 4 m.
- En el primer banco a partir de la cota 350 msnm el talud tiene el mismo sistema de refuerzo recomendado entre las cotas 470 y 520 msnm pero con pernos de 9 m de longitud y perforaciones de drenaje de 12 m.
- En el resto del talud se tendrán pernos de 6 m de longitud espaciados cada 5 m y dispuestos a manera de tresbolillo; además, perforaciones de drenaje de 9 m de longitud espaciadas cada 5 m, dispuestas también al tresbolillo.

2.3.2.3 Estructuras de captación

Como se indicó, las obras de captación están conformadas por dos bloques de estructuras sumergidas, separadas e idénticas, cada uno de los cuales tiene cuatro bocatomas independientes, con rejas coladeras fijas. Igualmente hacen parte de la captación, ocho pozos de compuertas, uno por conducción, localizados bajo una galería subterránea a la cota 430 msnm, desde la cual se operan las compuertas sobre los túneles superiores de conducción, que permiten el cierre del sistema bajo presiones equilibradas.

Cada uno de los dos bloques de estructuras de captación tiene un ancho total de 92 m y una altura de 20 m a partir de la plazoleta en la cota 350 msnm. Las estructuras son sumergidas y consisten en cuatro bocatomas de aducción frontal, equipadas con rejas coladeras fijas, dispuestas sobre un mismo plano, que incluyen rejas con una separación entre barras determinada por el tipo de turbinas para impedir la entrada de basuras con tamaños que podrían hacerles daño. .



La separación entre ejes de las bocatomas del mismo bloque es de 23 m, igual a la separación de las conducciones, en tanto que la separación entre los ejes de las bocatomas contiguas y de bloques distintos (conducciones Nos 4 y 5), es de 55,1 m.

Las bocatomas se dimensionaron para un incremento gradual de la velocidad, desde las rejas coladeras hasta los portales de los túneles superiores donde confluyen, en una longitud de 21,5 m. Cada bocatoma está conformada por una losa de piso entre las cotas 352 y 353,2 msnm, paredes laterales y losa de cubierta a cota 370 msnm las cuales, mediante curvas amplias reducen el ancho de 21 m a 8,8 m y la altura de 17 m a 10 m, en un tramo de 14 m entre las rejas coladeras y el portal del túnel, respectivamente; en los 7,5 m finales del tramo, se desarrolla la transición de sección rectangular de 8,8 m por 10 m a sección circular de 6,6 m de diámetro. Por requerimientos estructurales y para facilitar la modulación de las rejas coladeras, a la entrada de las bocatomas se dispusieron tres pilas y una viga central de 1 m de espesor, lo cual permite obtener cuatro luces centrales y ocho módulos de rejas, con dimensiones libres de 4,5 m de ancho por 8 m de altura, para una velocidad bruta de 0,6 m/s.

2.3.2.4 Galería y pozos de compuertas

El cierre en cada conducción se hará mediante una compuerta, que operará bajo presiones equilibradas, dispuesta en un pozo de 82 m de profundidad. El manejo de todas las compuertas se hará mediante un pórtico grúa que se desplaza sobre rieles, ubicado en una galería localizada en la cota 430 msnm.

La separación entre ejes de los pozos de compuertas es de 23 m, excepto para los pozos de las conducciones No. 4 y No 5 que es de 55,10 m. El dimensionamiento de los pozos responde al de las compuertas, las cuales, para el caudal de 168,7 m³/s y 5,5 m/s de velocidad, son de 4,7 m de ancho por 6,6 m de altura, igual a la del túnel, lo que determina un pozo con diámetro interno de 6,9 m. El pozo será revestido en concreto, con un tabique central en toda su profundidad para separar el compartimiento de la compuerta del conducto de aireación, dispuesto aguas abajo, el cual suministra o evacua aire durante las operaciones de vaciado o llenado de la conducción después de cerrada la compuerta bajo presiones equilibradas (véase plano F-PHI-310-CO-08).

El tramo del túnel de conducción superior en donde es de sección rectangular, por lo que, hacia aguas arriba y aguas abajo de la compuerta se tienen transiciones, de sección rectangular a circular; la longitud de estas transiciones es de 8,0 m, suficiente para disminuir pérdidas de carga y evitar la tendencia a la cavitación a lo largo de las superficies.

La galería de los pozos de compuertas está localizada con su eje longitudinal, por el centro, en la abscisa 120, dispuesto en dirección norte – sur, paralelo al eje común de las estructuras de captación. Tiene su piso a nivel de la cresta de la presa, en la cota 430 msnm, lo cual facilita el acceso a ella desde la vía que pasa por la corona, mediante un túnel corto de ancho y altura iguales a 5,5 m. La aireación de la galería se



efectúa a través de un túnel de ancho y altura iguales a 2,5 m, con piso en la cota 440,5 msnm que sale a superficie sobre el talud de la captación desde el extremo sur de su pared longitudinal de aguas arriba.

La longitud de la galería es de 226,1 m, el ancho de 12,5 m y su altura de 16,15 m, medidos a la corona de la bóveda del techo que tiene un radio de 7,8 m; las paredes son verticales, con una altura de 13 m desde el piso. El desplazamiento del pórtico grúa a lo largo de la galería para operar la compuerta de cualquiera de los pozos, se hará sobre un par de rieles espaciados 8,25 m entre ejes, situados de modo que se facilite un corredor peatonal libre de la influencia del pórtico.

El siguiente es el sistema de soportes de excavación y drenajes previsto para la galería y el pozo de compuertas:

- **Pozos de compuertas.** Se ha previsto un tratamiento para la roca tipo 1 y 2, consistente en una o dos capas de concreto lanzado de 0,05 m de espesor cada una, reforzado con fibras de acero, y pernos de roca de 3 m de longitud, espaciados cada 2,1 m o 1,5 m respectivamente, dispuestos al tresbolillo.
- **Galería de los pozos de compuertas.** En esta galería, el macizo rocoso puede presentar un nivel de meteorización de moderado a bajo debido a su proximidad a la superficie.
 - **Paredes:** Pernos de roca de 4 m de longitud espaciados cada 1,3 m al tresbolillo y dos capas de concreto lanzado de 0,05 m de espesor cada una, reforzado con fibras de acero.
 - **Bóveda:** Pernos de roca de 6 m de longitud espaciados cada 1,3 m al tresbolillo y tres capas de concreto lanzado de 0,05 m de espesor cada una, reforzado con fibras de acero.
 - Como drenaje, en paredes y bóveda de la galería, se contemplan perforaciones de 51 mm de diámetro y 6 m de longitud, dispuestas de manera sistemática en planos cada 4 m. La recolección de las aguas de infiltración se hará mediante un sistema de tuberías a las cunetas, dispuestas a ambos lados de la galería en sentido longitudinal, sobre la losa del piso en concreto.

2.3.3 Obras de conducción

2.3.3.1 Generalidades

Los diseños adoptados para el sistema de conducción tienen en cuenta las siguientes características y criterios:



- La separación entre ejes de conducciones es de 23 m, igual a la separación requerida entre los ejes de las unidades generadoras, equivalente aproximadamente a 2,9 veces el ancho de la sección transversal de excavación de los túneles superiores y de los pozos de presión, y de aproximadamente 3,5 veces el ancho de la sección de excavación de los túneles inferiores. De esta manera, el ancho de roca “in situ” existente entre dos de los túneles o pozos excavados permite que la superposición de la distribución de esfuerzos de cada uno de ellos tienda asintóticamente al valor mínimo.
- La longitud del túnel superior se adopta lo más corta posible, de manera que el pozo de compuertas se localice en una abscisa tal que la galería del pozo de compuertas tenga una cobertura mínima de roca de unas 3 veces su altura.
- Los diámetros óptimos de las conducciones se determinaron con base en el análisis económico - relación entre beneficio energético y costo de construcción - de alternativas de diferentes diámetro y velocidad para cada una de ellas. Con base en estos análisis se adoptaron diámetros de 6,6 m para el túnel superior y el pozo de presión y de de 5,2 m para el túnel inferior.
- Por otra parte, se adopta una pendiente del 10% de tal manera que, con el embalse en su nivel mínimo, la línea piezométrica no intercepte la curva superior del pozo de presión.
- El pozo de presión se empalma con los túneles superior e inferior mediante curvas con radio equivalente a 2,5 veces el diámetro del pozo, procurando minimizar las pérdidas hidráulicas.
- La longitud total del túnel de conducción inferior, revestido con blindaje de acero, se define de manera que, en el tramo aguas arriba de la pared de excavación de la caverna de transformadores, la distribución de esfuerzos verticales tienda a minimizarse asintóticamente.

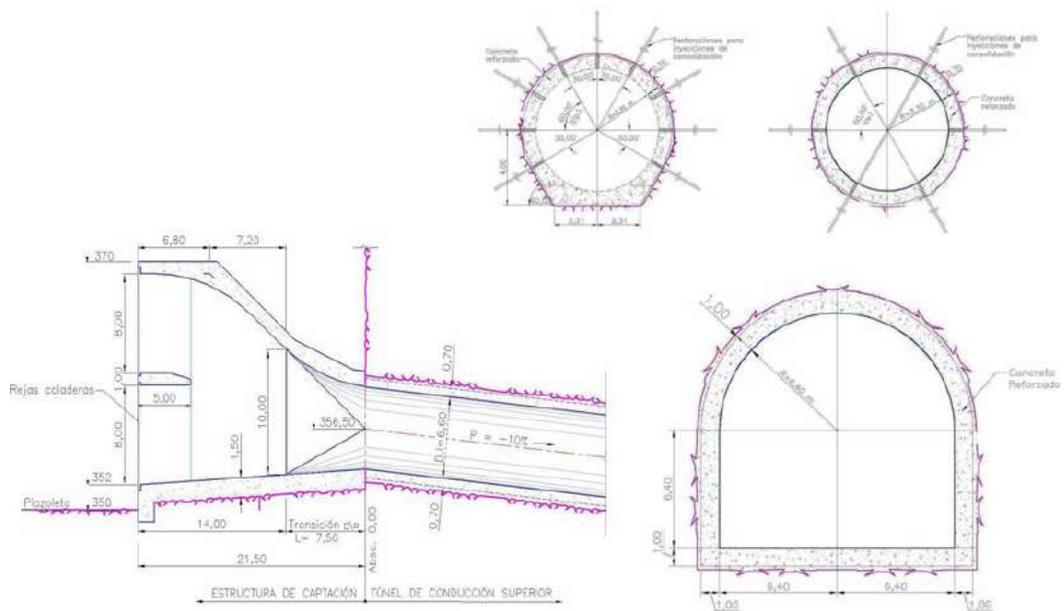
2.3.3.2 Conducciones

La localización y orientación establecidas en los diseños para las obras de captación y casa de máquinas, son tales que permiten reducir considerablemente la longitud de las conducciones, lo cual contribuye a mejorar las características de regulación de la central. Los alineamientos de los túneles y pozos de conducción son paralelos entre sí con una orientación oeste - este, y dispuestos en dos grupos que parten de sus correspondientes bloques de estructuras de captación: las conducciones Nos 1 a 4 se localizan al norte, más cerca del vertedero, y las conducciones Nos 5 a 8 al sur de las anteriores. Esta configuración tiene que ver con las condiciones topográficas y con la disposición de la caverna principal, con su sala de montaje en la zona intermedia, para facilitar el desarrollo por etapas.

Cada conducción está compuesta por el túnel superior de 144,4 m de longitud y 10% de pendiente, el pozo de presión vertical de 151,4 m de profundidad incluyendo los codos verticales de 16,5 m de radio y, finalmente, el túnel inferior que es horizontal con una longitud de 63,5 m, lo cual representa una longitud efectiva por conducción de 359,3 m.

Las secciones típicas de excavación para los túneles superiores e inferiores tienen bóveda en arco de 240° y 230°, paredes inclinadas 60° y 65° con la horizontal, radios de 4 m y 3,3 m respectivamente, y piso plano, con anchos de 4,62 m y 4,20 m, que posibilita las labores de construcción de los mismos (véase Figura 2.6). Esta sección logra economías en los volúmenes de excavación y concretos de revestimiento. Las secciones de los pozos tienen, para cualquier tipo de roca, un radio de excavación de 4 m.

Figura 2.6. Secciones de las obras de conducción



El túnel superior y el pozo de presión tienen sección hidráulica circular con diámetro de 6,6 m y velocidad de 5,0 m/s, revestida en concreto reforzado con un espesor de 0,7 m. Por su parte, el túnel inferior tiene sección hidráulica circular revestida en lámina metálica embebida en concreto de 0,7 m de espesor; su diámetro es de 5,2 m para una velocidad de 8 m/s. El tramo blindado presenta dos conos reductores de diámetro, que pasan de 6,6 a 5,2 m en el empalme con el codo vertical inferior, en una longitud de 7,5 m, y de 5,2 a 5 m al final, antes del paramento de la caverna principal, en una longitud de 5 m.

En los tramos revestidos en concreto, se tienen previstas perforaciones de 38 mm de diámetro y 4 m de longitud, para inyecciones de consolidación de la roca, dispuestas en todo el perímetro de la sección y utilizadas de manera sistemática. Para evitar infiltraciones hacia las cavernas, los túneles inferiores tienen una cortina de inyecciones localizada al final del primer cono reductor, que tiene continuidad con la cortina de la

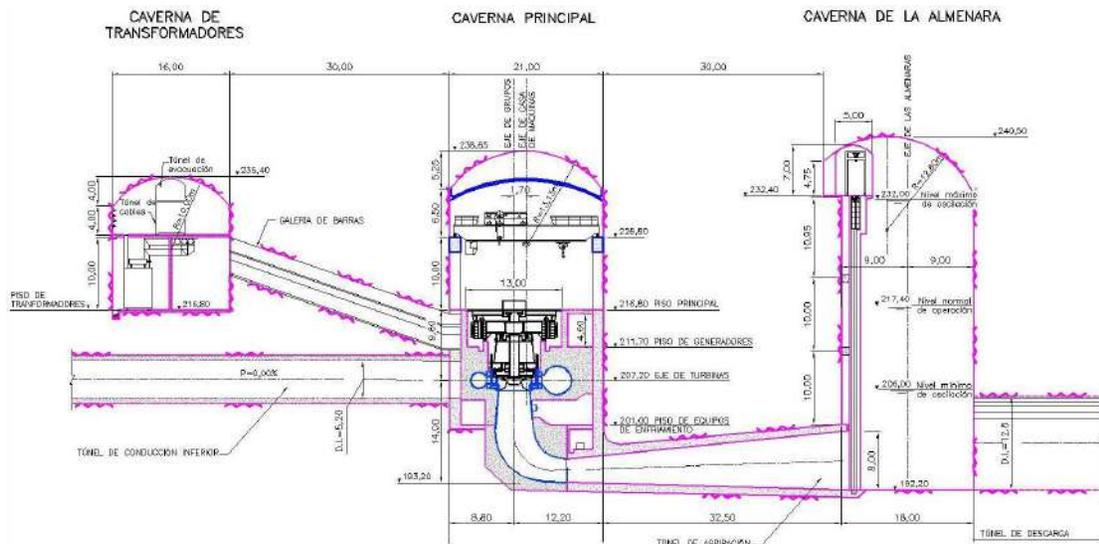
presa. La cortina está conformada por perforaciones de 38 mm de diámetro y 35 m de longitud cada una, dispuestas perimetralmente a 45° en la sección de cada túnel.

2.3.4 Casa de máquinas, caverna de transformadores y obras anexas

2.3.4.1 Características y criterios de las obras de las cavernas de la central

El esquema de las obras de la central, localizadas en el contrafuerte derecho, comprende la caverna principal de la casa de máquinas donde se ubican ocho unidades, de 300 MW de potencia nominal cada una, y una capacidad instalada total de 2.400 MW, con turbinas tipo Francis y generadores sincrónicos de eje vertical, los equipos auxiliares electromecánicos, equipos de control, la sala de montaje, oficinas. Aguas arriba de ésta se localiza la caverna de transformadores que aloja un banco de tres transformadores monofásicos por grupo y, aguas abajo las cavernas de las almenaras, una para cada cuatro unidades, que junto con los túneles de descarga conforman las obras de descarga (véanse Figura 2.7 y plano F-PHI-310-CM-01).

Figura 2.7. Esquema de la casa de máquinas

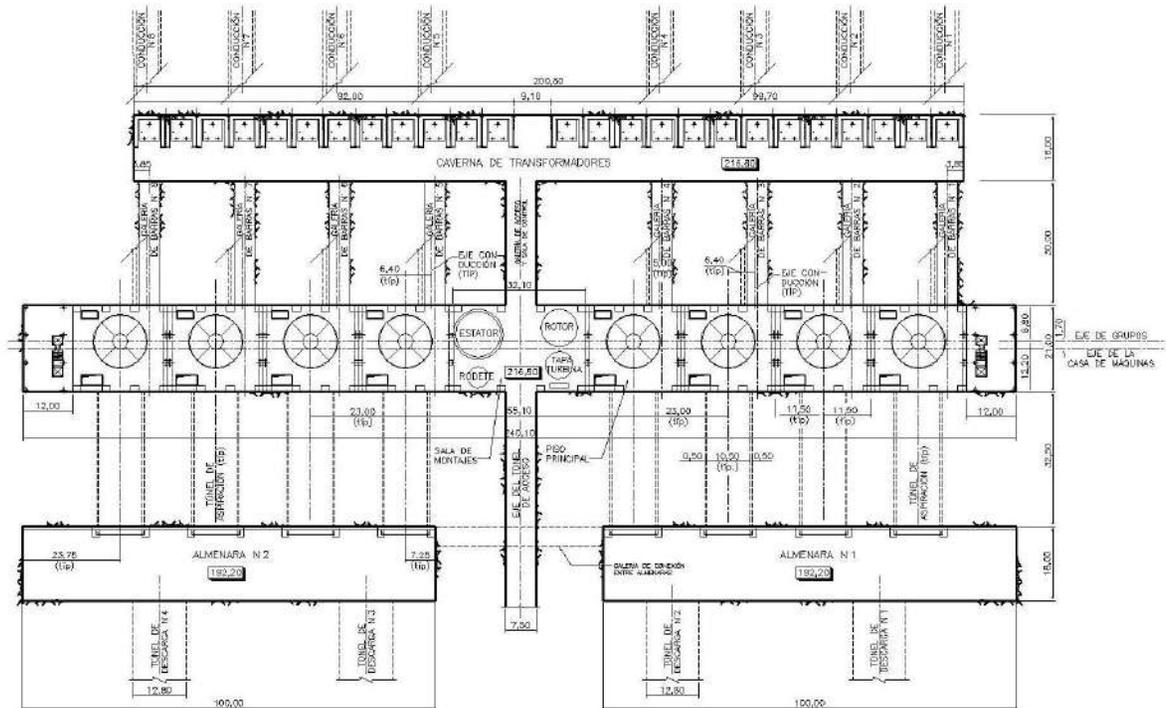


Las siguientes, son algunas de las características y criterios de los diseños:

- Siendo uno de los parámetros más importantes en las obras subterráneas, los anchos de las cavernas se optimizan de manera que sean los menores posibles. Teniendo en cuenta la distribución de esfuerzos en la roca, las separaciones entre la caverna de transformadores y la caverna de casa de máquinas y entre ésta y la almenara, son de 30 m cada una, equivalente a 1,43 veces el ancho de la caverna principal.

- Considerando el posible desarrollo por etapas de la central, la llegada del túnel de acceso, la sala de montaje y la galería de acceso a la caverna de transformadores se localizan en el centro de la casa de máquinas, disponiendo a lado y lado en las respectivas cavernas cuatro unidades generadoras y los correspondientes bancos de transformadores. También, la almenara se divide en dos partes, cada una de las cuales recibe los tubos de aspiración de cuatro unidades (véase Figura 2.8).
- El piso principal de la caverna principal y el piso de la caverna de transformadores se localizan en la misma cota. En el primer piso de la caverna de transformadores se localizan celdas de transformadores que tienen un corredor común por donde se movilizarán estos equipos, e igualmente, donde salen las galerías de cables. En el segundo piso se localizan dos corredores paralelos: uno, por donde salen los cables de los transformadores, que se comunica con el pozo de salida de cables; el otro, se utiliza como corredor que se comunica con el túnel de evacuación.

Figura 2.8. Distribución espacial de la casa de máquinas



El acceso a la casa de máquinas se hace mediante un túnel vehicular de doble vía, que llega a la sala de montaje dispuesta en su zona central. Para la excavación de las cavernas, se dispondrá de túneles de construcción superiores e inferiores, los cuales se derivarán del túnel de acceso.

La salida de los cables de potencia hacia la subestación en el exterior, se hace a través de un pozo inclinado 47,5° con la horizontal; por otro lado, la ventilación de las cavernas y



la evacuación de las mismas se hace a través de túneles dispuestos con pendientes que faciliten la posible salida de emergencia.

2.3.4.2 Caverna principal

El dimensionamiento de la casa de máquinas se encuentra asociado directamente al tamaño y características de las unidades generadoras, asociadas éstas, a su vez, con la capacidad instalada de la central y su posible desarrollo por etapas. Como se indicó, la caverna principal tiene su sala de montaje en el centro, a la llegada del túnel de acceso y, a cada lado se localizan cuatro unidades generadoras con sus pisos inferiores correspondientes. En los extremos norte y sur de la casa de máquinas, y en forma simétrica, se desarrollan sendos edificios de siete pisos, provistos de ascensor y escaleras. A la casa de máquinas llegan los túneles inferiores de las conducciones a presión con su eje a la cota 207,2 msnm y de ella salen los tubos de aspiración que descargan a las almenaras, con piso en la cota 192,2 msnm.

El dimensionamiento del grupo generador típico se determinó con la ayuda de métodos estadísticos disponibles en INTEGRAL S.A. y de información de otras centrales similares ya construidas. A partir de estas dimensiones, se procedió a determinar el ancho, la altura y la longitud de la caverna principal. Adicionalmente, para la separación entre ejes de unidades, definida en 23 m, se tuvo en consideración el ancho de la boca de salida del tubo de aspiración de cada unidad y la dimensión del bloque de roca mínimo que debe quedar entre dos tubos; así mismo, las dimensiones del transformador típico y el espacio requerido por un banco de tres transformadores monofásicos dispuestos en sus celdas, asociado a cada grupo generador.

La caverna principal tiene 240,1 m de longitud total, 21 m de ancho y 46,35 m de altura, medida desde el fondo de la excavación para los tubos de aspiración hasta la corona de la bóveda. En la primera etapa se construirá la sala de montaje y la parte correspondiente a los grupos generadores 1 a 4, con sus obras relacionadas, y un espacio adicional para adecuación de la protección de las obras y equipos, durante la construcción de la segunda etapa.

La casa de máquinas incluye varias zonas principales: la sala de montaje, las zonas de unidades y las zonas de oficinas y sala de control y equipos auxiliares.

- **Sala de montaje.**

Tiene 32,1 m de longitud; su piso, a la cota 216,8 msnm, va parcialmente apoyado sobre la roca, y en el resto en el costado este, sobre un recinto del piso de generadores, en la cota 211,7 msnm.



- **Zonas de unidades.**

Localizadas a ambos lados de la sala de montaje, corresponden a las ocho unidades generadoras; en la primera etapa se construirían las cuatro, ubicadas en el lado norte.

En las áreas de unidades se tienen cuatro pisos: el piso principal en la cota 216,8 msnm, que es el nivel de las tapas de los recintos de los generadores y de la sala de montaje; el piso de generadores, en la cota 211,7 msnm que presenta continuidad para ambas etapas de construcción ya que se comunica parcialmente por la zona central, debajo de la sala de montaje; la galería de la cámara espiral en la cota 206,05 msnm, y el piso de equipos de enfriamiento, en la cota 201 msnm; además existe una galería de drenajes común, localizada en el fondo sobre los tubos de aspiración, en la cota 197,7 msnm.

Las unidades de enfriamiento están dispuestas en las zonas entre los grupos generadores, en los extremos adyacentes al bloque de la sala de montaje; en el costado de aguas abajo, se tienen los huecos para la movilización de las bombas de drenaje y las escaleras que conducen al piso de la galería de drenaje, en la cota 197,7 msnm.

En este piso se tienen los accesos a las turbinas por un corredor de 2,0 m de ancho, acondicionado aguas abajo del tramo blindado por debajo de cada turbina, el cual incluye escaleras de concreto que llevan a las tapas de los accesos para inspección.

- **Estructura para el puente grúa.**

A nivel del piso principal, sobre la sala de montaje y las zonas de unidades, se tiene las estructuras para soporte del puente grúa, conformadas por dos pórticos de columnas de 1,5 m x 2,0 m de sección y una viga de 1,5 m de espesor, cuya cota superior es la 226,8 msnm, determinada de acuerdo con los tamaños y requerimientos para la movilización de los equipos.

La distribución de las columnas está asociada con la localización de las juntas de expansión entre módulos de unidades y, estas se apoyan en los muros de 1,50 m de espesor, al nivel del piso principal.

- **Zonas de oficinas y equipos auxiliares.**

Estas zonas se encuentran localizadas en los edificios conformados en los extremos norte y sur de la casa de máquinas, de siete pisos, a través de los cuales discurre un foso para el paso de ductos y cables; los edificios disponen de ascensor y escaleras, que también sirven para el acceso a los diferentes niveles de la casa de máquinas en las zonas de unidades. El piso superior está destinado a depósitos; los siguientes, en su orden, a oficinas y sala de reuniones, oficinas y servicios (dos pisos), sala de baterías y equipos auxiliares eléctricos, equipos de enfriamiento del aire acondicionado, y unidades de manejo de aire.

Para las oficinas se han previsto protecciones acústicas contra el ruido proveniente de las unidades generadoras.



A todo lo largo de la casa de máquinas se tiene un cielorraso de concreto semicircular, el cual se apoya en la roca, a ambos costados de la caverna.

2.3.4.3 Caverna de transformadores, galerías de barras y acceso y sala de control

- **Caverna de transformadores.**

Situada 30 m aguas arriba de la caverna principal, su piso está al mismo nivel del piso principal de la casa de máquinas, en la cota 216,8 msnm. El ancho de la caverna es de 16 m y su altura de 18,6 m, medidos a la corona de la bóveda del techo que tiene un radio de 10 m. Su longitud total es de 200,8 m, de los cuales se construirían 140 m en la primera etapa (.).

La caverna de transformadores está comunicada con la caverna principal por la galería de acceso y tiene dos pisos. Al primer piso llegan las ocho galerías de barras de fase aisladas que parten de los generadores y se desarrollan los deltas que distribuyen a los transformadores dispuestos en celdas con muros cortafuego. Para las cuatro unidades del costado norte de la casa de máquinas se tienen previstas 13 celdas que ocupan 99,7 m; 12 celdas corresponden a las cuatro unidades, 3 por unidad, y una celda para el transformador de reserva; para las cuatro unidades restantes se tienen 12 celdas que ocupan 92 m. Entre ambos grupos de transformadores se genera un espacio que permite la ubicación de unas escalas en concreto para acceder al piso superior.

El segundo piso en la cota 227,1 msnm, incluye dos corredores paralelos separados por un muro dispuesto en sentido longitudinal; en uno, se disponen los cables provenientes de los transformadores, el cual se comunica sobre la culata norte con el túnel y pozo de salida de cables; el otro, se utiliza como corredor de evacuación que se comunica también en la culata norte con el túnel de evacuación y aireación de la central.

El diseño de las celdas prevé la posibilidad de explosiones o incendio de los transformadores; es por esto que, los muros y losa del techo se calculan acorde con esta situación. Para controlar el aceite derramado de los tanques, se dispone de cascajo en el piso de las celdas y tuberías recolectoras que llegan a un tanque en la galería de drenajes de la casa de máquinas.

- **Galerías de barras.**

Las galerías de barras comunican los recintos de los generadores con la caverna de transformadores, con su piso entre cotas 211,7 y 221,3 msnm. La sección transversal es en herradura con bóveda semicircular de 2,83 m de radio y paredes rectas, de ancho y altura iguales, de 5 m. El piso lleva revestimiento de concreto y escalas en la zona central; a una altura de 3,5 m del piso de la galería, se tiene una losa que soporta, los tres conductos que llevan las barras de fase aisladas.



- **Galería de acceso y sala de control.**

La galería de acceso es una prolongación del túnel de acceso a casa de máquinas y comunica las cavernas de transformadores y de casa de máquinas. El ancho es el mismo del túnel de 7,5 m, pero la altura es de 12,5 m, medida a la corona de la bóveda del techo que tiene un radio de 4,7 m, con el fin de adecuar una galería superior, en la cota 223,9 msnm, correspondiente a la sala de control de la central, para la cual se han previsto protecciones acústicas. El acceso a este piso se hace desde el corredor de salida de cables y evacuación de la caverna de transformadores.

2.3.4.4 Almenaras

Las dos cavernas de las almenaras son independientes e iguales; están separadas de la caverna de la casa de máquinas por un bloque de roca de 30 m de espesor y separadas entre sí 40,6 m. Sus dimensiones son de 18 m de ancho, 48,3 m de altura medidos a la corona de la bóveda, y 100 m de longitud, con piso en la cota 102,2 msnm. En la parte superior de cada caverna, en el lado de aguas arriba, se tiene un ensanchamiento, para una galería que facilita las labores de operación de las compuertas de cierre de los tubos de aspiración, con piso en la cota 232,4 msnm. El rango de oscilación del nivel del agua se estima entre cotas 206 y 232 msnm (véase plano F-PHI-310-CM-01).

En cada almenara confluyen cuatro túneles de aspiración de las unidades, cuya altura en el empalme es de 8 m libres, con recubrimiento de concreto de 1 m de espesor. La separación entre ejes de los túneles de aspiración es igual a la de las unidades generadoras, o sea 23 m. De cada almenara salen dos túneles de descarga, correspondientes a cuatro unidades generadoras.

Sobre la pared de aguas arriba de cada almenara se tiene la estructura para las compuertas de cierre de los túneles de aspiración, consistente en un entramado de vigas y columnas entre el piso de la almenara y el de la galería de operación de la misma. Las compuertas se deslizan a lo largo de guías laterales, ayudadas por una grúa pórtico que se desplaza al nivel del pasillo superior, en la cota 232,4 msnm. Al final de los túneles de aspiración, y ya dentro de la almenara, en las zonas de compuertas, con sección de 10,5 m de ancho por 8 m de altura, se configuran unos marcos metálicos de guías laterales y asientos superior e inferior, sobre los cuales sellan las compuertas ante una operación de cierre de las mismas, bajo el efecto de la presión hidrostática del sistema aguas abajo.

Las dos almenaras están conectadas en la zona superior por una galería, que permite el paso de la grúa pórtico y la circulación de operarios de una a otra almenara. Las dimensiones de la galería son 5 m de ancho, por 7 m de altura, con bóveda semicircular y paredes rectas; su longitud es de 40,6 m.

Previsiones. A cada una de las dos almenaras llegan dos túneles de construcción, por la culata norte de la almenara No 1 y por la culata sur de la almenara No 2: un túnel superior



a la cota 232,4 msnm y un túnel inferior a la cota 192 msnm. Una vez terminada la construcción de las dos almenaras, los dos ramales inferiores de las almenaras y el ramal superior de la almenara No 2 se taponan en concreto; el ramal superior de la almenara No 1 se utiliza como acceso permanente para la zona de la galería de compuertas, la cual tendrá una puerta estanca con dimensiones que permitan entrar la grúa pórtico para manejo de las compuertas.

2.3.4.5 Sistema de aireación y evacuación de las cavernas

Para el sistema de aireación de la casa de máquinas se plantea un túnel lo más corto posible, pero con una pendiente tal que permita, a su vez, en caso de una eventual emergencia, la evacuación de personas que se encuentren dentro de la central. El portal de este túnel se localiza en una plazoleta junto al talud de aguas abajo de la presa, en la cota 292 msnm, con acceso desde la corona de la presa por la vía construida sobre dicho talud. El área de la sección del túnel se establece de manera que la velocidad del aire no sea mayor de 3,5 m/s, de modo que permita la salida de las personas sin mayor dificultad.

El túnel empalma con el túnel de construcción superior, sobre el costado norte de las obras, en un punto intermedio entre las cavernas principal y de transformadores, permitiéndose la distribución del aire hacia las dos, así como la salida desde cualquiera de las cavernas. Su longitud es de 400 m hasta el túnel de construcción superior y su sección transversal, en forma de herradura con bóveda de 2,5 m de radio y paredes rectas, de 4 m de ancho por 3,5 m de altura. Su pendiente es del 5,5% en los 172,7 m iniciales desde el portal y del 22,8% en los 227,3 m restantes (véanse planos F-PHI-310-CM-15 y 17).

Para la aireación de cada una de las dos almenaras, se plantean sistemas independientes, consistentes en pozos verticales que empalman con túneles superiores lo más cortos posible. El área de la sección se estima para una velocidad del aire no mayor de 5 m/s, teniendo en cuenta el caudal de aire desplazado o requerido durante el ciclo máximo de oscilación. El pozo y el túnel de aireación de cada almenara disponen de un conducto interior para la renovación del aire cada dos horas.

Los túneles superiores se han diseñado con pendiente del 10% para disminuir la profundidad de los pozos. El diámetro del pozo es de 5 m y la sección transversal del túnel en forma de herradura de 5 m de ancho por 4,75 m de altura, con paredes rectas y con bóveda de 3,13 m de radio. Los pozos se localizan cerca de la llegada de los túneles de construcción superiores a las almenaras, a la cota 232 m y se conectan en las cotas 414,8 msnm y 416,7 msnm para las almenaras Nos 1 y 2 respectivamente. El túnel de aireación de la almenara No.1 sale a superficie en la berma ubicada en la cota 430 msnm del talud del vertedero; el túnel correspondiente a la almenara No 2 sale a superficie en la berma ubicada en la cota 445 msnm (véanse planos F-PHI-310-CM-15 y 17).



2.3.4.6 Túnel y pozo de cables

Los cables de potencia salen desde la caverna de transformadores a través de un túnel horizontal y un pozo inclinado, $47,5^\circ$ con la horizontal, hasta la plazoleta excavada en la superficie, donde se encuentra la subestación encapsulada a 500 kV (véanse planos F-PHI-310-CM-15 y 16).

El túnel parte del costado aguas arriba de la caverna de transformadores, en línea con el corredor de salida de cables dispuesto en el segundo piso de esta caverna en la cota 227,10 m.s.n.m.; su longitud es de 69,35 m de los cuales 48,5 m hacen parte del túnel de construcción superior de la primera etapa. La orientación del túnel cambia de un azimut de $00^\circ 00' 00''$ a un azimut de $38^\circ 42' 00''$, poco después del túnel de construcción, hasta su empalme con el pozo inclinado.

El pozo inclinado, de una longitud real de 368,25 m, se inicia en la cota 227,1 msnm y llega a la cota 498,6 msnm, donde empalma con un cárcamo en concreto dispuesto en el sentido longitudinal de la subestación superficial

La sección, tanto del túnel como del pozo de salida de cables, es en forma de herradura de 4 m de ancho y 5 m de altura, con paredes verticales y bóveda con radio de 2,5 m. El piso del túnel tiene una losa de concreto; el piso del pozo tiene a lado y lado escalas en concreto y en la zona central de la sección tiene rieles para la operación del malacate de montaje e inspección, instalados sobre una losa de concreto.

En cada pared del túnel y del pozo se instalarán, en bandejas ancladas en la roca, los cables de potencia correspondientes a cada una de las etapas.

Los soportes de excavación se especifican de acuerdo con las secciones en roca sana y en roca fracturada, consistentes en una o dos capas de concreto lanzado de 0,05 m de espesor cada una, reforzado con fibras de acero, y pernos de roca BAL 8 espaciados cada 2,1 m o 1,5 m respectivamente, dispuestos al tresbolillo.

2.3.4.7 Túnel de acceso a la casa de máquinas

El túnel de acceso a la casa de máquinas se utiliza, durante la construcción, para el retiro de la roca proveniente de las excavaciones y el ingreso de los materiales para construcción de las diversas estructuras; durante la etapa de montajes, para la entrada de los blindajes y equipos de la central, En la etapa de funcionamiento hace parte del sistema de aireación de la central y permite la movilización del personal que tiene a su cargo la operación de la central (véase plano F-PHI-310-CM-01).

La plazoleta para el portal se localiza encima de la correspondiente a los portales de los túneles de descarga, cerca al vertedero. Tiene una longitud total de 943,0 m con tres tramos rectos y dos curvas horizontales. El trazado vertical incluye dos tramos



horizontales cortos, a nivel de la plazoleta y de la sala de montaje, y un tramo intermedio principal de 887,6 m con pendiente del 10,5%.

La sección de excavación del túnel es en herradura con paredes verticales, de 7,5 m de ancho y 6 m de altura; el radio de la bóveda es de 4,2 m. El piso es de concreto reforzado, con pendientes del centro hacia los lados. Para determinar su sección transversal, se consideró el transporte de los equipos principales, en especial los transformadores, y el tránsito de equipos y volquetas durante construcción.

Debido a la pendiente descendente, y a las probables infiltraciones durante la etapa de construcción del túnel, en la casa de máquinas se han previsto nichos laterales para subestación de energía y pozos recolectores y de bombeo de infiltraciones.

2.3.4.8 Túneles de construcción

Los túneles de construcción se plantean teniendo en cuenta que el proyecto podría ser ejecutado en dos etapas. Se utilizan dos túneles superiores, uno de ellos en la primera etapa y otro en la segunda, y un túnel inferior. Parten del túnel de acceso a casa de máquinas, muy cerca a su llegada a la sala de montaje, y llegan a las culatas de las tres cavernas, cerca a las bóvedas y a los pisos correspondientes. El túnel inferior se utiliza también para construir los pozos de presión y los túneles inferiores de las conducciones (véase planos F-PHI-310-CM-01).

- **Túnel de construcción superior para la primera etapa.** Con este túnel, y sus ramificaciones, se llega a las bóvedas, en las culatas norte, tanto de la almenara No1 como de la primera etapa de las cavernas principal y de transformadores. El tramo final del túnel de construcción superior, que llega a la caverna de transformadores, hace parte del sistema de aireación y evacuación de las cavernas y, así mismo, de salida de cables de potencia, hasta su empalme con el pozo correspondiente, según se describió anteriormente.
- **Túnel de construcción inferior para la primera etapa.** Con este túnel, y sus ramificaciones, se acomete la construcción de los pozos de presión y de los túneles inferiores de las conducciones; además, de este túnel se desprenden los ramales con los cuales se llega a las culatas norte de los bancos inferiores de las cavernas de almenara No1 y de la casa de máquinas y de transformadores.
- **Ramales de construcción del túnel inferior para segunda etapa.** Para la segunda etapa del proyecto se construirán algunos ramales, que parten del túnel de construcción inferior de la primera etapa:
 - Ramal superior, para llegar a las culatas sur de las bóvedas de la almenara No 2 y de la segunda etapa de las cavernas de casa de máquinas y de transformadores.
 - Ramal inferior, para llegar a los bancos inferiores de las culatas sur de la almenara



No.2 y de la segunda etapa de las cavernas de la casa de máquinas y de transformadores.

- **Características de los túneles.** La sección de los túneles es en herradura, de paredes verticales, de 5 m de ancho y 5 m de altura con 3,13 m de radio de la bóveda. El tramo de túnel inferior hasta los codos de los pozos de presión, tiene dimensiones mayores, de 6,60 m de ancho y de altura total, dado que se ha previsto utilizarlo para la entrada del blindaje de los túneles inferiores de las conducciones a presión.

2.3.5 Obras de descarga

2.3.5.1 Características y criterios de las obras de descarga

El esquema finalmente elaborado para los diseños de factibilidad tiene en cuenta las siguientes características y criterios:

- De cada almenara se desprenden dos túneles de descarga, uno por cada dos unidades generadoras; la opción de un solo túnel implicaría un caudal y un diámetro muy grandes.
- La separación entre ejes de los dos túneles de descarga de cada almenara se fija en 50 m, de manera que el ancho de roca “in situ” entre ellos permita que la superposición de la distribución de esfuerzos de cada uno de ellos tienda asintóticamente al valor mínimo.
- La operación de los túneles será a baja presión, para que el diámetro sea menor que operando a flujo libre.
- El nivel normal de operación en la descarga de los túneles será igual al nivel medio del río Cauca en el sitio de descarga y, con respecto a este, el nivel normal de operación de las almenaras se define teniendo en cuenta las pérdidas hidráulicas en los túneles y la cabeza de velocidad.
- La cota del piso de las almenaras se define con respecto al nivel normal de operación, teniendo en cuenta la altura de los túneles de descarga más la altura de sumergencia de las bocas de entrada de dichos túneles; igualmente, teniendo en cuenta que dichas bocas queden sumergidas con respecto al nivel mínimo de oscilación de las almenaras.
- La pendiente de los túneles de descarga es del 0,2%, para que durante construcción drenen por gravedad hasta el túnel auxiliar de construcción que los intercepta aguas abajo.
- El tramo final de cada túnel de descarga se empalma con un pozo inclinado con ángulo de 45° con la horizontal. Teniendo en cuenta el nivel medio del río en verano, se fija en



la cota 213 el piso del portal de salida del pozo. Por otro lado, la plazoleta superior se fija en la cota 227, teniendo en cuenta el nivel de la creciente de 500 años.

- Los canales de descarga al río Cauca se conforman en roca, con sección rectangular y con ampliación gradual en planta.

2.3.5.2 Túneles de descarga

Cada uno de los cuatro túneles de descarga, dos por cada almenara, evacúa un caudal de 337,50 m³/s, correspondiente al caudal turbinado por dos unidades generadoras cuando la central está trabajando a plena carga. En su alineamiento, orientado a que la longitud sea la menor posible, los túneles salen perpendiculares a las almenaras y manteniéndose paralelos y separados 50 m, se orientan para descargar en río Cauca, luego de un recorrido que varía entre 868,4 m para el túnel de menor longitud y 1.142,5 m para el de mayor longitud (véanse planos F-PHI-310-CO-12 y 15).

A partir de su inicio, en la pared de aguas abajo de la almenara, en la cota 192,2 msnm, los túneles tienen una pendiente del 0,2% y sección en herradura con bóveda en arco de 6,4 m de radio, paredes inclinadas y piso recto de 8,4 m de ancho; la sección será revestida en concreto lanzado, con excepción de la losa de piso que es en concreto de 0,10 m de espesor. En el tramo final de cada túnel de descarga se tiene una transición de 10 m, en la cual la sección cambia a una rectangular, de ancho y altura totales iguales, pero con bóveda semicircular, que empalma con un pozo inclinado de unos 32 m de longitud en promedio, que desarrolla un par de codos en sus extremos con ángulos de 45° con la horizontal, hasta llegar al portal de salida y plazoleta, con piso en la cota 213 msnm, asociada con el nivel promedio de verano del río. El sistema de descargas de la central, desde las almenaras hasta el río Cauca, opera a baja presión, pues incluso las bocas de los túneles quedan sumergidas con respecto al nivel mínimo de oscilación de las almenaras.

En los muros de las estructuras de descarga se han dispuesto guías laterales para la instalación de vigas que conformen un tablero de cierre en caso de requerirse una inspección de los túneles.

Para facilitar la excavación de los túneles de descarga, se ha previsto un túnel de construcción cuyo portal de entrada se encuentra en inmediaciones de la vía que accede a las estructuras de descarga, unos 180 m antes de llegar a su plazoleta. Este túnel pasa por debajo de la vía mencionada, a partir de la cota 224,40 msnm en el portal, y llega a nivel del piso de los túneles de descarga en la cota 190,11 msnm, muy cerca de los pozos inclinados, mediante un trazado recto y con pendiente del 14% (véase plano F-PHI-310-CO-15). Para proceder con la construcción de las dos etapas de desarrollo, se ha previsto colocar un tapón de concreto en el túnel de construcción que aisle de los túneles ya construidos en la primera etapa.



2.4 EQUIPOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS

2.4.1 Equipos mecánicos

2.4.1.1 Turbinas

De acuerdo con el salto bruto y caudal de diseño definidos, el proyecto constará de ocho turbinas Francis de eje vertical, con capacidad para procesar un caudal total de 1 350 m³/s. Los equipos mecánicos en general se han dispuesto en forma tal que se puedan instalar en dos etapas, cada una de cuatro unidades.

Para el dimensionamiento de la turbina se hizo previamente un estudio sobre la tendencia actual de la velocidad específica de referencia en función del salto neto, obteniendo la curva de tendencia que finalmente se utilizó en el dimensionamiento.

Las características principales de la turbina son: caudal: 168,8 m³/s; salto neto de diseño: 197,3 m; velocidad sincrónica: 180 min⁻¹; potencia nominal: 306,8 MW y velocidad específica: 134,8 min⁻¹.

Para el dimensionamiento de la turbina se emplearon los criterios de Siervo y Leva [1], de la USBR [2] y de EPDC [3];, se compararon estos criterios y, en la mayoría de los parámetros de dimensionamiento, se utilizó el promedio a partir de los datos obtenidos.

Las dimensiones se determinaron a partir de la ecuación obtenida para la velocidad específica de referencia, que corresponde a:

$$N_s = \frac{3730}{Hn^{0.622}}$$

N_s: velocidad específica en m.kW

H_n: salto neto en m

El proceso para determinar la eficiencia es iterativo, debido a que el diámetro de descarga se halla a partir de los parámetros básicos de funcionamiento de la turbina y la eficiencia está en función de este diámetro y del salto neto.

Las dimensiones del tubo de aspiración se determinaron a partir de la información obtenida del proyecto de la central canadiense La Grande 2, ya que el dimensionamiento normalmente empleado daría una salida con un ancho tal que haría que la distancia entre eje de unidades fuera mucho mayor por ser una central subterránea.



2.4.1.2 Puentes grúa de casa de máquinas

Se han previsto dos puentes grúa para operar en paralelo, mediante una viga de alce, para movilizar el rotor del generador. La selección de dos puentes grúas es conveniente cuando la central ha de alojar un elevado número de unidades y además si se requiere una capacidad puntual elevada. Con este arreglo se consigue agilizar el montaje de piezas y componentes de peso menor que el de la capacidad de las grúas.

La capacidad de las grúas es definida por el peso del rotor del generador, más el de la viga de alce y demás dispositivos de manejo necesarios. El peso del rotor se estima de conformidad con los criterios de Gordon¹. Las dimensiones de los puentes grúa y las áreas servidas por los ganchos se han definido con base en información de los planos. No se ha previsto gancho auxiliar en las grúas sino un monorriel que se desplaza adosado a una de las vigas del puente.

2.4.1.3 Sistemas de agua de enfriamiento

Para el enfriamiento del aceite de los cojinetes de las unidades generadoras, del aceite de los transformadores monofásicos y del aire de los generadores, se han considerado sistemas de agua en doble circuito: uno cerrado de agua tratada que circula por cada uno de los intercambiadores de la unidad y otro abierto de agua cruda que toma y descarga el agua de la almenara. Ambos circuitos circulan por un Intercambiador de calor común, del tipo de placas paralelas. El agua tratada retira el calor del aceite y del aire, y el agua cruda retira el calor acumulado por el circuito de agua tratada; de esta manera se preservan de suciedad y obturación los intercambiadores de la unidad pasando el trabajo de mantenimiento para el Intercambiador de placas común. El circuito de agua cruda también lleva un filtro autolimpiante antes del intercambiador de placas.

El sistema considerado se ha venido aplicando satisfactoriamente en centrales modernas, como una solución anticipada a los problemas que origina en estas aplicaciones una mala calidad del agua descargada por las turbinas.

El caudal de agua tratada se estimó teniendo en cuenta la información obtenida de los proyectos diseñados por INTEGRAL, que permite establecer una relación estadística entre la capacidad del generador, en MVA, y el caudal de agua de refrigeración. Además, Leyland² indica valores para esta relación, que se comparan con los aplicados.

¹ "Determining the hydro powerhouse crane capacity". By J. L. Gordon, Water Power & Dam Construction. Nov. 1978.

² "Cooling water systems for hydropower stations". By L. Leyland, Hydropower & Dams, May 1994.



2.4.1.4 Sistema de ventilación y acondicionamiento de aire

Con base en la experiencia en el diseño de sistemas similares para varios proyectos hidroeléctricos con casa de máquinas subterránea y teniendo en cuenta el nivel del estudio, se aplican criterios de costo específico para estimar los presupuestos requeridos, sin necesidad de efectuar prediseños del sistema.

Para la ventilación y acondicionamiento del aire se ha previsto instalar tres chillers situados en cada piso de refrigeración de los dos edificios que están en los extremos de casa de máquinas; uno será de reserva. Habrá manejadoras de aire independientes para alimentar el piso principal, el piso de generadores y los pisos de bomba y drenajes, instaladas de manera igual, en espejo, para las dos etapas. La caverna de transformadores es la excepción y solo lleva un grupo de manejadoras de aire. Cada celda de transformador cuenta con una unidad manejadora de aire para remover la carga termica generada por este. Los intercambiadores agua - aire de las distintas manejadoras de aire serán alimentados desde los chillers mencionados, como se indica en el diagrama de flujo respectivo. En los sistemas de ventilación y acondicionamiento de aire se tiene previsto renovar el 60% del volumen del lugar que se va a acondicionar.

Se ha previsto un sistema de extracción de humos de casa de máquinas, el cual está indicado en el diagrama de flujo de ventilación; además, se tendrán sistemas de extracción de aire independientes para la cocineta, sanitarios, cuarto de baterías y los recintos de los transformadores en los cuales se tendrá una renovación del 40% del volumen

2.4.1.5 Sistemas de protección contra incendio

Para la protección contra incendio de las diferentes zonas que conforman el proyecto hidroeléctrico se han considerado sistemas de extinción a base de agua para la protección de las edificaciones y a base de CO₂ para la protección de los generadores y de los tableros eléctricos. Para la protección de los transformadores de potencia se ha considerado la implementación de sistemas a base de agua pulverizada del tipo automático de diluvio. En todas las zonas del proyecto se contará con extintores portátiles distribuidos estratégicamente, y de detectores de incendio para supervisión y control.

Los sistemas a base de agua estarán conformados por sistemas rociadores automáticos (sprinklers) y gabinetes de mangueras, y estarán localizados en los diferentes niveles de la casa de máquinas y de la sala de control. Los sistemas a base de CO₂ serán del tipo inundación total en el recinto del generador o en el interior de los tableros eléctricos.

Cada uno de los sistemas que se implementarán en las diferentes zonas del proyecto, contarán con su propio tablero de control, y todo el control y supervisión de todos los sistemas de protección contra incendio estará centralizado en el cuarto de control de la central hidroeléctrica.



2.4.1.6 Compuertas para los tubos de aspiración

Para llevar a cabo la puesta en servicio de las unidades y posteriormente la inspección y el mantenimiento de las turbinas, sin afectar la operación de las otras, se han previsto un total de cuatro compuertas para ser instaladas en la salida de los tubos de aspiración a la almenara. En la puesta en operación se requerirán tres compuertas para la primera etapa e igualmente para la segunda. Posteriormente se tendrán almacenadas dos compuertas en cada almenara. No obstante, al utilizar solo cuatro compuertas, el alcance de fabricación debe incluir todo el sistema de guías y asientos para las ocho salidas de los tubos de aspiración

Por las grandes dimensiones de las compuertas 10,5 m de ancho x 8 m de altura, se previó la fabricación en dos cuerpos de 4 m de altura cada uno, para facilitar su manejo con la grúa pórtico y disminuir la altura requerida del túnel de acceso. Los cuerpos se manejarán con ayuda de una viga pescadora y serán almacenadas en los bolsillos dispuestos en cada sistema de guías de las compuertas

2.4.1.7 Sistemas y equipos auxiliares

Para los siguientes sistemas y equipos auxiliares no se han efectuado estudios de selección de características y capacidades, por razón de su costo relativamente bajo, sino que su aplicación y presupuesto se han definido siguiendo los correspondientes lineamientos establecidos en la fase de estudio de alternativas de este Proyecto, así como de diseños similares de otros proyectos:

- Sistema cerrado de agua tratada de enfriamiento con su correspondiente sistema abierto de agua cruda
- Taller de máquinas herramienta
- Paneles de cierre para las celdas de los transformadores
- Elementos metalmecánicos varios y equipos misceláneos
- Sistema de vaciado del foso de infiltraciones
- Vaciado de los tubos de aspiración
- Sistema agua de servicios generales con su planta de tratamiento de agua
- Sistema de aire comprimido.

Por otra parte, se ha previsto un malacate con cabina en el pozo inclinado de salida de cables para desplazamiento del personal de operación y mantenimiento en las labores de inspección de los cables.



2.4.2 Equipos hidromecánicos

2.4.2.1 Compuertas para túneles de desviación

El cierre de cada uno de los túneles de desviación se hará mediante dos compuertas, en paralelo, de 7,1 m de ancho y 14,6 m de alto, cuya presión de diseño es de 201 m.c.a. El tipo de compuerta es el denominado “ataguía”, aunque se proveerían con ruedas de guía, no de carga, para facilitar su colocación contra flujo. La operación de las compuertas se hará por medio de un servomotor de doble acción.

Como se señaló anteriormente al describir las obras civiles de desviación, antes del cierre definitivo de los túneles, el No. 1 (izquierdo) se cerrará provisionalmente para el montaje de dos compuertas adicionales que trabajarán como descarga de fondo inferior mientras se llena el embalse, de tal manera que permita evacuar durante el llenado del embalse y cuando se requiera durante la operación del proyecto, un caudal ecológico estimado en 300 m³/s. Este túnel será clausurado definitivamente cuando entre en operación la descarga de fondo intermedia.

2.4.2.2 Compuertas para descargas de fondo

- **Descarga de fondo inferior.** Como se indicó anteriormente, en el túnel de desviación No.1 se instalarán dos compuertas deslizantes, en paralelo; éstas serán de 3,0 m de ancho por 3,9 m de altura para una presión de diseño de 214 m.c.a, y serán utilizadas en la fase inicial del llenado del embalse para garantizar el caudal ecológico. Para la instalación de estas compuertas, se cerrará el túnel y luego después de instaladas, se abrirán nuevamente las compuertas de la desviación para que quede operativo.
- **Descarga de fondo intermedia.** A un nivel de unos 44 m por encima de los túneles de la desviación, se construirá el túnel para la descarga de fondo intermedia, el cual estará equipado con dos compuertas radiales y dos compuertas deslizantes de guarda de las radiales. Las compuertas deslizantes están previstas para que operen con presiones equilibradas, pero tendrán la capacidad de cerrar en contraflujo en caso de atoramiento o daño de la respectiva compuerta radial. El manejo de las compuertas será por medio de servomotores hidráulicos de doble acción.

Las dimensiones de las compuertas serán 3,1 m de ancho por 4 de altura y la presión de diseño de 170 m.c.a, tanto para las compuertas radiales como para las compuertas deslizantes

El caudal ecológico, de 300 m³/s, será proporcionado por medio de la descarga de fondo intermedia mientras entre en operación la central o cuando por cualquier motivo la central se salga del sistema. La operación de las compuertas deberá ser automatizada.



2.4.2.3 Rejas coladeras para la captación

Cada una de las captaciones estará provista de un sistema de rejas coladeras que forman un marco en un mismo plano, compuesto por ocho módulos de rejas de 4,6 m de ancho por 8,1 m de altura. La separación libre entre varillas verticales se ha estimado en 165 mm y la velocidad promedio a través de las rejas de 0,76 m/s.

2.4.2.4 Compuertas para la captación

De acuerdo con los correspondientes diseños de la obra civil, se construirá una galería para tener acceso a los ocho pozos de compuertas de las captaciones. En la galería se instalará un pórtico equipado con una viga pescadora para manejar las compuertas de cada conducción. Cada conducción se ha previsto con una sola compuerta de 4,8 m de ancho por 6,7 m de altura, en el respectivo pozo. Cada compuerta estará compuesta de dos cuerpos, cada uno de 3,35 m de altura, con el fin de facilitar su manejo y limitar la altura requerida del pórtico y así mismo la altura de la galería. Estas compuertas serán del tipo denominado “ataguía” o “stop-log”. Su operación será con presiones equilibradas ya que no se han previsto situaciones de cierre de emergencia puesto que se cuenta con las válvulas cilíndricas de la turbina.

2.4.2.5 Compuertas radiales para el vertedero

El vertedero contará con cinco (5) compuertas radiales, de 16,1m de ancho y 18,2 m de altura, con diseño del tipo de tendencia a la apertura por medio de un contrapeso. Dos de las compuertas estarán equipadas con una solapa superior, de accionamiento también hidráulico como la compuerta misma, para descargar periódicamente el material flotante del embalse. Así mismo, las compuertas desempeñarán funciones de control automático de nivel, en el caso de que se presenten crecientes de gran magnitud y controlar, así, su tránsito por el embalse.

2.4.2.6 Compuertas auxiliares para el vertedero

Para propósitos de mantenimiento de las compuertas radiales, se han previsto compuertas del tipo “stop-logs”, compuestas por varias secciones horizontales, provistas con ruedas de guía, no de carga, para facilitar su colocación en condiciones de presión equilibrada. Las dimensiones de esta compuerta son similares a las de las compuertas radiales, y se operarán mediante un pórtico.



2.4.2.7 Blindajes metálicos en los túneles de la conducción.

En el túnel inferior de cada una de las conducciones, en una longitud de 63,50 m, se ha dispuesto blindaje convencional, conformado por tubos de acero en contacto con el flujo de agua en su interior y en el exterior revestido con concreto. Como diámetro interno de diseño para el blindaje, se determinó el valor de 5,20 metros con una velocidad de flujo igual a 8 m/s.

El espesor de diseño obtenido fue de 43 mm, para todos los tubos que conformarán el suministro, incluyendo las dos reducciones concéntricas previstas al inicio y al final del blindaje. Esta última hará coincidir el diámetro de la conducción con el diámetro de entrada de la cámara espiral. La variación del diámetro interior será de 6,60 a 5,20 m y de 5,20 a 5,00 m para las reducciones previstas al inicio y al final del blindaje respectivamente.

2.4.3 Equipos eléctricos

2.4.3.1 Generalidades

El Proyecto comprende ocho unidades, configuradas en un esquema que posiblemente se desarrollará en dos etapas, cada una de cuatro unidades.

Cada unidad consiste en un grupo Generador - Banco de transformadores monofásicos, conectados entre sí con barras aisladas. Desde el lado de alta tensión de los transformadores, se tendrá la conexión con cables aislados en XLPE para 500 kV, instalados a través de un túnel de cables, hacia una subestación encapsulada en SF6, localizada en la plazoleta del túnel de salida de cables que será la subestación del STN.

Se ha seleccionado una configuración de interruptor y medio para la subestación del STN, de donde partirán las líneas aéreas que harán parte del Sistema Interconectado Nacional SIN. Como resultado del estudio de conexión, se recomienda la salida de cinco circuitos de 500 kV, atendiendo a criterios de flujo de cargas y de estabilidad en el sistema. Los circuitos recomendados son:

- Dos hacia la subestación Cerromatoso.
- Dos hacia la subestación Porce III.
- Uno hacia la subestación San Carlos.



2.4.3.2 Generadores

- **Características básicas**

La Tabla 2.1 muestra las características básicas de los generadores seleccionados para el Proyecto:

Tabla 2.1 Características básicas de los generadores

Número de generadores	8
Potencia activa, (MW)	302
Factor de potencia	0,90
Potencia aparente, (MVA)	336
Voltaje, (kV)	18
Velocidad (min-1)	180

Los generadores serán de eje vertical, con enfriamiento por aire en circuito cerrado con intercambiadores agua-aire. El circuito de agua de enfriamiento consiste en uno de ciclo cerrado de agua tratada, enfriada a su vez con un sistema de agua cruda de ciclo abierto.

La configuración de los cojinetes de la unidad comprende un cojinete de empuje soportado sobre la tapa de la turbina, un cojinete de guía superior en el generador y un cojinete de guía en la turbina. Esta configuración permite obtener una reducción de espacio para la ménsula del cojinete de empuje, con la consecuente reducción en la dimensión vertical de la unidad.

El equipo de excitación para cada unidad será estático a base de tiristores, alimentado por un transformador de potencia, trifásico, tipo seco y conectado a las barras principales de potencia. También se puede considerar la utilización de un sistema de excitación sin escobillas que, aunque tiene un desempeño y eficiencia un poco menor que el de tipo estático, posee la ventaja de no tener anillos deslizantes ni escobillas, lo que representa ventajas en mantenimiento y disminución de causas de fallas a tierra por efectos de la acumulación de polvo de las escobillas.

El neutro del generador será puesto a tierra a través de un transformador con resistencia en el secundario, para limitar la corriente de falla a tierra a un valor de 10 A.

- **Dimensionamiento**

Las dimensiones del generador seleccionado se presentan en la Tabla 2.2:



Tabla 2.2 Resultados del dimensionamiento de los generadores

GENERADOR SINCRÓNICO	
Potencia, (MW)	302
Factor de potencia	0,90
Potencia aparente, (MVA)	336
Velocidad (min-1)	180
Diámetro de rotor (Dg), m	9,0
Longitud del núcleo (Lc), m	2,45
Coefficiente de salida	8,6
Relación Y (Lc/Pp), (1.75<Y<4.0)	3,79
Diámetro exterior del recinto, m	14,5
Distancia entre tapas del generador, m	6,5
Peso estimado del rotor del generador, Mn	5,21
Momento de inercia de la unidad incluidos la turbina y el generador, GD2, MN-m2	306

2.4.3.3 Barras

Las barras de conexión entre cada generador y el banco de transformadores serán del tipo de fase aislada, con ductos y conductores de aluminio y con la capacidad continua y de cortocircuito, adecuada a la potencia de los generadores y del sistema.

Las barras de conexión entre el generador y el banco de transformadores tendrán las características presentadas en la Tabla 2.3, basados en un voltaje del generador de 18 kV.

Tabla 2.3 Características de las barras

Tipo	Barras de fase aisladas
Corriente/fase, (A)	15 000
Voltaje de aislamiento, (kV)	24
Corriente de cortocircuito estimada en barras principales, (kA)	80
Corriente de cortocircuito estimada en derivaciones, (kA)	150

Las barras se dispondrán sobre las galerías que comunican al frente de cada unidad, la caverna de los generadores con la caverna de transformadores. En la disposición se tiene en cuenta el espacio para la formación de la delta en la conexión de los bancos de transformadores y las derivaciones para la excitación y para los transformadores de servicios auxiliares.



2.4.3.4 Bancos de transformadores

Cada generador estará conectado a un banco de tres transformadores monofásicos, con la capacidad correspondiente a la potencia del generador y para un aumento de temperatura de 55°C. La razón principal para seleccionar un banco de transformadores monofásicos por generador en lugar de transformadores trifásicos, es la limitación de peso y dimensiones para su transporte.

En la Tabla 2.4 se presentan las características básicas de los bancos de transformadores monofásicos para cada generador.

Tabla 2.4 Características básicas de los bancos de tranformadores monofásicos

Potencia total del banco de transformadores, (MVA)	336
Potencia de cada transformador, (MVA)	112
Voltaje baja tensión (kV)	18
Voltaje alta tensión (kV)	500/ $\sqrt{3}$
Eficiencia estimada	0,995
Tipo de enfriamiento	FOW

Los transformadores serán instalados en la respectiva caverna, en celdas independientes separadas por muros cortafuegos y con paneles de cierre.

Para trasladar los transformadores entre la sala de montaje y las celdas y viceversa, se ha previsto el uso de orugas de rodillos o multi-tons.

Se ha previsto que se dispondrá, como parte de la primera etapa, de un transformador de repuesto, que se alojará en una celda localizada hacia el centro de la caverna, totalmente ensamblado.

Los bujes de baja tensión serán aislados en aire, para conexión a las barras provenientes de los generadores y los de alta tensión serán aislados en SF6, para la conexión de los cables secos aislados a 500 kV.

Cada transformador tendrá un cambiador de tomas en el lado de alta tensión, para operar en vacío, con posiciones para +/- 2 x 2,5%.

Peso de los transformadores. Para la capacidad seleccionada de 112 MVA de los transformadores monofásicos, se estima un peso para transporte de 75 toneladas, sin incluir el peso del vehículo.

Dimensiones de los transformadores. Tomando como referencia las dimensiones de transformadores similares, entre ellos los propuestos para la central de Porce III, en la Tabla 2.5 se presentan las dimensiones de los transformadores.



Tabla 2.5. Dimensiones de los transformadores

Dimensiones	Para transporte	Ensamblado	Celda
Largo	5,8	6,5	8,7
Ancho	3,6	5,5	7,3
Altura	4,5	6,0	10,0

En el dimensionamiento de las celdas se consideraron los espacios requeridos para montaje, mantenimiento y conexiones de barras de baja tensión y los terminales de alta tensión.

2.4.3.5 Cables aislados de 500 kV

Para la conexión entre los transformadores y la subestación encapsulada, se consideró la instalación de ocho circuitos en cable aislado para 500 kV, del tipo seco, dispuestos a través de un túnel diseñado para este propósito, que parte de uno de los extremos de la caverna de transformadores hasta un portal de salida, donde se tendrá la conexión de los cables aislados a la subestación encapsulada.

Los terminales interiores de los cables serán aislados en SF6 para acoplarse a los terminales de los transformadores, y los externos se acoplarán a los terminales en SF6 dispuestos en la subestación encapsulada.

Se ha considerado la instalación de un cable de repuesto, de la longitud del circuito más largo.

2.4.3.6 Subestación de 500 kV

De acuerdo con lo establecido por la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) y para obtener máxima confiabilidad, seguridad, flexibilidad, facilidades de mantenimiento y expansión, y teniendo en cuenta la cantidad de circuitos de generación y de salida, se analizaron inicialmente dos alternativas de configuración: doble barra con seccionador de “by-pass” mas barra de transferencia y con seccionamiento de barras y la de interruptor y medio; luego se estudiaron diferentes alternativas de subestaciones, de tipo convencional y encapsuladas en SF6 y en diferentes sitios de instalación.

El estudio de las alternativas dio como resultado que la de mínimo costo global para el sistema es disponer una subestación encapsulada en SF6, localizada en el portal de salida del túnel de cables, que a su vez sea la del STN y que permita la definición clara de fronteras de equipos y responsabilidades entre las bahías de conexión de los circuitos de la central y los del sistema de transmisión.



Se seleccionó la subestación de tipo encapsulada en SF6 debido a que, dadas las características topográficas de la zona, disponer de un área cercana para instalar una subestación del tipo convencional, implicaría costos excesivos para la adecuación de los terrenos o, en su lugar, obligaría a extender los circuitos de la central hasta un sitio donde se encuentre un terreno apropiado, lo que, igualmente, incrementaría los costos de las líneas y de las vías de acceso.

Aunque el costo de la configuración de doble barra con barra de transferencia y seccionador de “by-pass” es menor que la de interruptor y medio, se seleccionó esta última debido al número de circuitos, su alta confiabilidad, mayor flexibilidad y simplicidad en la operación para este sistema

La subestación consta de siete diámetros para la conexión de las ocho unidades y cinco salidas de línea hacia el exterior. Se ha previsto el espacio para una futura ampliación de dos circuitos, lo que se puede lograr con un diámetro adicional. En los espacios para la subestación, se han considerado los requeridos para la instalación de los reactores para las compensaciones reactivas de las líneas que lo requieran y para la construcción del edificio de control.

Para disminuir los volúmenes de excavación requeridos para la subestación encapsulada en SF6, se definió su instalación en dos niveles, uno para todo el equipo encapsulado y otro para la instalación de los reactores de las compensaciones de las líneas.

En la Tabla 2.6 se presentan las características generales de la subestación.

Tabla 2.6. Características generales de la subestación

Tipo	Encapsulada
Aislamiento	SF6
Número de diámetros	7
Número de circuitos de generación	8
Número de circuitos de líneas	5
Espacio previsto para ampliación	Para 2 líneas adicionales (un diámetro mas y espacio para pórticos, reactores y edificio de control)
Voltaje nominal	500 kV, rms
Voltaje máximo	550 kV, rms
Frecuencia nominal	60 Hz
Nivel básico de aislamiento	1 550 kV, pico
Corriente de cortocircuito	40 kA
Corriente nominal de barras	3 500 A, rms



2.4.3.7 Servicios auxiliares eléctricos

El sistema de los servicios auxiliares eléctricos será dividido en servicios auxiliares de las unidades, servicios generales de la central, servicios de corriente continua y servicios auxiliares exteriores.

Los servicios auxiliares de cada unidad estarán conectados a las barras de fase aislada de cada generador y a los servicios generales de la central, y tendrán capacidad para alimentar las cargas mecánicas y eléctricas requeridas para cada unidad.

Los servicios generales de la central estarán conectados a las barras de fase aislada de los generadores y a la subestación de construcción, mediante dos circuitos diferentes que alimentarán las cargas de la central, y respaldarán los servicios auxiliares de una unidad.

Los servicios de corriente continua estarán conectados a bancos de baterías de 125 V c.d. y a cargadores de baterías, cada uno con equipo de reserva. Las baterías tendrán capacidad para alimentar la excitación de una unidad en el arranque y el alumbrado de emergencia.

Los circuitos externos para los servicios auxiliares generales de la central, provenientes de la subestación de construcción, tendrán un respaldo de una fuente de emergencia alimentada con plantas diesel.

Para los sistemas de control y comunicaciones de la casa de máquinas se dispondrán alimentaciones confiables derivadas de fuentes de potencia ininterrumpibles (UPS).

Los servicios auxiliares exteriores estarán conectados a dos circuitos radiales; uno, proveniente de la subestación de construcción y, otro, de los servicios generales de la central, que alimentan los equipos y la iluminación en túneles, captación, presa y demás áreas exteriores.

2.4.3.8 Sistema de control

El sistema de control de la central será desarrollado con base en una filosofía del tipo distribuido, física y funcionalmente, con niveles jerárquicos, implementada a partir de tecnología digital.

Para el control y la supervisión de la casa de máquinas, subestación de 500 kV, presa y obras anexas se considerarán cuatro niveles jerárquicos de control, así:

- **Nivel cero de control.** En este nivel se realiza el control directo de equipos primarios, tales como válvulas, motores, interruptores de potencia y de servicios auxiliares, seccionadores e instrumentos requeridos para realizar el control y la supervisión de la central.



- **Primer nivel de control.** Este nivel está conformado por los automatismos necesarios para operar el equipo primario. Cada automatismo dispondrá de las secuencias, enclavamientos, señalizaciones, medidas y protecciones necesarias para la operación de los equipos primarios de un modo autónomo, desde dispositivos de control local o a través de órdenes exteriores provenientes de niveles superiores de control.
- **Segundo nivel de control.** Corresponde al control de los diferentes grupos funcionales existentes en la central (unidades de generación, servicios auxiliares, presa, obras anexas, etc.), los cuales deberán tener funcionamiento autónomo de todo el equipo e interfaz necesarios para realizar el control digital de los equipos del proceso desde los niveles superiores, de forma tal que en el caso de pérdida de comunicación con los niveles superiores, se pueda seguir operando el grupo en forma independiente.
- **Tercer nivel de control.** Este nivel corresponde al control general de la central. Desde él se deberá supervisar y monitorear en forma global y en tiempo real, la totalidad de la central y los subsistemas que la integran.

Estará conformado por las estaciones de operación (interfaz hombre-máquina), interfaces para integración al Centro Regional de Despacho (CRD) de EEPMP, Centro Nacional de Despacho (CND), y servidores para acceso a redes corporativas y para manejo de periféricos (impresoras, etc.), así como también por el software requerido para realizar las funciones de control y supervisión global de la central y de gestión de los equipos y sistemas.

Físicamente este nivel será instalado en el edificio de control de la central.

- **Cuarto nivel.** Es el nivel más alto de la estructura de control, el cual corresponde a la integración de la central al Centro Regional de Despacho (CRD) de EEPMP y al Centro Nacional de Despacho (CND), desde donde se supervisará la central según los requerimientos de la CREG. Teniendo en cuenta las buenas características de regulación de las unidades, podrán participar en el Control Automático de Generación (AGC), controladas desde el CND.

Para la interconexión con el CRD y el CND se requieren las interfaces de comunicaciones respectivas con los correspondientes protocolos, que serán coordinados, de acuerdo con la tecnología y sistemas utilizados en el momento de su implementación.

2.4.3.9 Sistema de protección

Para la protección del generador, del banco de transformadores y de los cables de conexión con la subestación, se adoptará el concepto de protección principal y de respaldo, diseñado con base en los criterios de fiabilidad, seguridad, selectividad y velocidad de operación.



Los relés de protección y relés auxiliares serán de estado sólido construidos de acuerdo con las últimas técnicas, del tipo digital y cumplirán con los requerimientos del anexo CC4 de la resolución 025 del 13 de julio de 1 995 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas.

Todos los relés de protección estarán provistos con interfaces de comunicación que les permitan su integración con el sistema de control de la central y para su gestión y supervisión local desde la sala de control de la central, y en forma remota desde las oficinas de EEPPM. De acuerdo con la tecnología disponible en el momento de la implementación, dicha integración se podrá hacer a través de la misma red del sistema de control o mediante una red de gestión independiente.

El sistema de protecciones incluirá los programas para prueba de los relés de protección y los programas de interfaz con el usuario, necesarios para la configuración y ajustes de los relés.

Los equipos de protección dispondrán de una supervisión continua y de autochequeo, con indicación local y remota, de indisponibilidad del relé.

Los relés de protección que requieran reposición tendrán la posibilidad para realizarla local o remotamente desde el sistema de control de la central.

Las transferencias de disparo y las señales permisivas se transmitirán con equipos de teledisparo a través de enlaces de fibra óptica entre la casa de máquinas y la subestación exterior.

Las redes de datos serán mediante fibra óptica.

2.4.3.10 Comunicaciones

Para atender las necesidades de comunicación de carácter operativo y administrativo de la central durante las etapas de construcción y operación, se implementarán enlaces de comunicación basados principalmente en sistemas de radio y sistemas de comunicación de fibra óptica.

Las comunicaciones requeridas para la integración de la central al Centro Nacional de Despacho se implementarán de acuerdo con los requerimientos de la CREG en la hoja 31/141 de su resolución 025 del 13 de julio de 1 995.

Para la interconexión de los diferentes sitios del proyecto como son: presa, vertedero, descargas de fondo e intermedia, captación, casa de máquinas, descarga de la central, subestación, zona de campamentos, almacén, laboratorio, se utilizará cable de fibra óptica, a través de los cuales se efectuarán las comunicaciones operativas y administrativas de la central.



Los sistemas de fibra óptica que se implementen durante la etapa de construcción serán integrados y utilizados en la etapa de operación de la central.

La comunicación de la zona del proyecto con Medellín podrá hacerse en forma directa, empleando enlaces de radio digitales con diversidad de frecuencias o espacio en casa de máquinas, o a través de los sistemas de comunicación existentes en las poblaciones cercanas, utilizando diversos medios de comunicación, los cuales serán evaluados en su momento.

Adicionalmente, en la línea de energía para construcción que parte del municipio de Yarumal hacia el proyecto, se instalará un cable del tipo OPGW, por el cual se podrán establecer las comunicaciones administrativas y operativas con los sitios remotos, integrándose a la infraestructura de comunicaciones que posee EEPPM en la subestación de Yarumal.

Para el diseño de las redes de voz y datos (red corporativa) del edificio de control de la central, de los edificios de oficinas y administración y almacenes se utilizará el concepto de cableado estructurado o redes inalámbricas, de acuerdo con el estado tecnológico.

El diseño del sistema se realizará con una topología tipo estrella y se utilizarán los mismos tipos de cables, conectores y adaptadores para los servicios de voz, datos e imágenes. Para la implementación del cableado estructurado se emplearán principalmente los siguientes materiales y equipos:

- Cables UTP y/o fibra óptica
- Cables terminales en conectores
- Elementos de administración
- Sistemas de distribución de cableado

Para las comunicaciones de voz requeridas para la central, durante las etapas de construcción y operación, se instalará una planta telefónica de tecnología digital mediante la cual, empleando módulos remotos, se prestará el servicio telefónico requerido para el proyecto. Utilizando un módulo de transmisión de datos, dicha planta será conectada, a través del sistema de microondas y/o fibra óptica, con la red telefónica de las Empresas Públicas de Medellín.

El diseño del sistema de comunicaciones se realizará teniendo en cuenta normas y publicaciones nacionales e internacionales aplicables y reconocidas para estos tipos de sistemas, tales como EIA/TIA, ANSI/ICEA, ASTM, ANSI/IEA/TIA, IEC, ITU-T, etc.



2.5 OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

2.5.1 Vías de acceso

2.5.1.1 Generalidades

En la zona del Proyecto solo se cuenta con la carretera que comunica a Medellín con el Municipio de Ituango. Esta utiliza un tramo de la Troncal Occidental (Medellín-Cartagena), hasta los Llanos de Cuivá, en donde se desprende un ramal de reducidas especificaciones que pasa inicialmente por el Municipio de San Andrés de Cuerquia y luego por el corregimiento de El Valle, para más adelante cruzar el río Cauca, en el sitio Pescadero y dirigirse finalmente a Ituango (Véase Plano F-PHI-EAM-CB-LG-LOC). Los tramos de esta carretera próximos al río serán inundados por el embalse, por lo que será necesario construir una vía sustitutiva.

Los estudios y trabajos realizados en esta etapa, han comprendido los diseños a nivel de factibilidad de las vías sustitutivas y de acceso requeridas para la construcción y posterior operación del Proyecto Ituango, la fijación de los parámetros de diseño correspondientes y la determinación de sus aspectos más relevantes, como volúmenes, estructuras y obras de arte y zonas de depósito de materiales. En los siguientes numerales se presenta un resumen del trabajo realizado.

El diseño de las vías se realizó con base en topografía obtenida por restitución aerofotogramétrica suministrada en julio de 2 006, utilizando los datos en escala 1:10.000 complementados en algunas zonas aledañas a la presa por datos en escala 1:2.000; asimismo, para el estudio de una variante que evite cruzar el Municipio de San Andrés de Cuerquia, se utilizó topografía en escala 1:2.000 obtenida mediante restitución aerofotogramétrica en mayo de 2 007.

Con base en las necesidades de sustitución vial, creación de accesos a zonas específicas, o vías necesarias para la construcción, se plantean ocho vías nuevas, las cuales, de acuerdo con sus respectivos propósitos, se han catalogado dentro de los siguientes grupos:

Vías Principales: Comprende las vías El Valle – Presa, margen izquierda del río Cauca, y Pescadero- Presa, margen derecha, que sirven de sustitución al tramo de la vía intermunicipal existente entre San Andrés de Cuerquia e Ituango que se verá inundado por el embalse; incluye, también, la variante vial para rodear el municipio de San Andrés de Cuerquia.

Vías Secundarias: Son las vías necesarias en el proceso de construcción de las obras principales y en la etapa de operación de la Hidroeléctrica. Corresponde a las vías de acceso a casa de máquinas, a la subestación de 500 kV y a los campamentos en donde se alojará el personal vinculado a la construcción del Proyecto.



Vías Terciarias: Son las vías necesarias para el proceso constructivo, a saber: las vías de acceso a los portales de aguas arriba y de aguas abajo de los túneles de desviación y a la salida de los túneles de descarga de la central.

2.5.1.2 Criterios de diseño

El diseño de las vías se realizó teniendo en cuenta las Normas Colombianas para el Diseño de Carreteras y el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, del INVIAS y A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 2001, AASHTO. Los criterios de diseño son enfocados a considerar las vías como carreteras secundarias de carácter intermunicipal, bajo un tipo de terreno escarpado; además, el diseño se ha orientado a obtener los menores movimientos de tierra posibles.

Los criterios de diseño para cada tipo de vías se pueden apreciar en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Criterios de diseño para las vías de acceso

Criterio	Vía principal	Vía secundaria	Vía terciaria
Tipo de terreno	Escarpado	Escarpado	Escarpado
Velocidad de diseño (km/h)	30	30	30
Clase de pavimento	Carpeta asfáltica	Carpeta asfáltica	Afirmado
Ancho del pavimento total	9,00 m	7,00 m	6,00 m
Carriles de circulación	2 de 3,5 m y berma de 1 m	2 de 3,5 m c/u	2 de 3,0 m c/u
Bombeo	-2,0%/-2,0%	-2,0%/-2,0%	-2,0%/-2,0%
Radio mínimo en curva	30,00 m	30,00 m	30,00 m
Tipo de curvas	Espirales (Lmín 30 m)	Circulares	Circulares (con sobreebanco en las curvas)
Pendiente Max	10%	12%	12%
Pendiente Min	0,5%	0,5%	0,5%
Longitud de curva vertical mínima	30 m	60 m	60 m
Ancho cunetas de concreto	1,00 m	1,00 m	1,00 m
Taludes			
En corte		1V:0,25H hasta 10m; 1V:0,5H en adelante.	
En lleno		1V:1,5H	

Para la estimación y prediseño de las obras de paso para las corrientes que cruzan las vías de acceso, se determinaron, con base en cartografía a escala 1:10.000, las cuencas de las zonas atravesadas por las vías y, utilizando métodos racionales, se calcularon los caudales a manejar en cada caso.

Los tipos de obra de cruce considerados fueron: alcantarillas circulares de 0,90 m y 1,20 m de diámetro y, para mayores capacidades, alcantarillas de cajón (box culverts) de 1,50 m x 1,50 m o mayores, hasta 2,5 m x 2,5 m, teniendo presente en todos los casos que en condiciones de flujo normal la obra no debe llenarse más del 75% y en caso de creciente debe trabajar a flujo libre.



2.5.1.3 Longitudes y volúmenes de explanación

Definidos los alineamientos horizontal y vertical de las vías, sus secciones típicas y los correspondientes taludes, se procesaron las secciones transversales, con la ayuda del programa especializado para diseño de carreteras INROADS. En la Tabla 2.8 se presenta el resumen de los volúmenes de explanación en m³ y la longitud de cada una de las vías, en km.



Tabla 2.8 Volúmenes de explanación

Carretera	Longitud (m)	Volumen (m³)	
		Corte	Relleno
Vía sustitutiva entre el valle y la presa	12.530	1.172.000	11.000
Vía sustitutiva entre pescadero y la presa	8.360	763.000	4.000
Vía de acceso a la casa de maquinas	5.730	603.000	11.000
Ramal de acceso a la subestación	800	70.000	0
Vía de acceso a la entrada del túnel de desviación	3.520	340.000	5.000
Vía de acceso a la salida del túnel de desviación	2.300	353.000	13.000
Vía 1 de los campamentos	1.530	78.000	2.000
Vía 2 de los campamentos	780	53.000	0
Explanación para edificaciones	-	549.000	312.000
TOTALES	35.550	3.981.000	358.000

2.5.1.4 Estructuras

Para cada una de las vías de acceso a las obras principales se identificaron los puentes y muros de contención requeridos. En este campo, las necesidades son las siguientes

- **Vía sustitutiva entre el Valle y la presa.** En esta vía será necesario construir un puente de 160 m de longitud sobre el río San Andrés y otro de 70 m sobre la quebrada Chirí; además, en el sitio de las obras tendrá dos puentes de 80 m y 25 m respectivamente, en las captaciones y en el vertedero. La longitud total de muros de contención requeridos en esta vía es de 757 m.
- **Vía sustitutiva entre Pescadero y la presa.** Requiere la construcción de dos puentes, sobre las quebradas Tenche y Orejón, de 30 m y 35 m de longitud respectivamente; además, incluye el puente sobre el vertedero, de 87 m de longitud. Los muros requeridos totalizan 454 m.
- **Variante en San Andrés de Cuerquia.** La construcción de esta vía incluirá un puente de 34 m de longitud.
- **Vía de acceso a casa de máquinas.** La longitud de muros necesarios es de 195 m.
- **Vías de acceso a la entrada y salida de túneles de desviación.** En estas vías, los muros requeridos tienen una longitud total de 345 m.



2.5.2 Campamentos

En relación con los requerimientos de infraestructura de campamentos y oficinas necesarios para alojar y atender el personal que estará vinculado a la construcción del proyecto, y más tarde a su operación, en los estudios de 1982 se adelantaron investigaciones de campo y estudios sobre los posibles sitios de localización y sobre el alcance y criterios fundamentales a tener en cuenta en los diseños de estas facilidades.

Para los presentes estudios se han acogido los criterios y resultados de 1982, redimensionando las magnitudes de acuerdo, principalmente, con el tipo de presa y el estado del arte en cuanto a experiencias recientes sobre número de personas requeridas para la construcción de este tipo de proyectos.

La zona de campamentos para el personal de la HIDROELÉCTRICA está situada al costado izquierdo del río San Andrés, cerca de la desembocadura de la quebrada Tacuí, al lado de la carretera actual entre El Valle e Ituango, y contigua al sitio donde comienza la vía sustitutiva. Esta zona ofrece unas aceptables condiciones en cuanto a pendientes del terreno, fuentes de agua y posibilidades de disposición de aguas residuales.

El acceso a los campamentos se hace a través de la denominada Vía 1 que conecta con la vía sustitutiva entre El Valle y la presa, en la margen izquierda del río San Andrés. Esta vía 1 brinda acceso directo a la zona operativa del campamento, cruza por las viviendas unifamiliares y llega a las viviendas para ingenieros y su casino, terminando en el edificio para la escuela. De la vía 1, parte un ramal, vía 2, que conecta con las viviendas para tecnólogos y para obreros y con el casino de los obreros.

Se considera que el personal requerido durante la construcción y, más tarde, el funcionamiento del proyecto corresponde a los siguientes grupos:

- **Grupo A:** Corresponde al personal profesional que incluye directivos, asesores, especialistas y profesionales.
- **Grupo B:** Es personal técnico no profesional que incluye técnicos y auxiliares de ingeniería y de diseño, superintendentes de construcción y mantenimiento de equipos y personal administrativo.
- **Grupo C:** Es personal conformado por obreros calificados, semi-calificados y no calificados.

Se estima que en su punto máximo, el contratista tendrá en la zona, vinculadas a la ejecución del proyecto unas 5.000 personas. Por otro lado, se estima que de parte del propietario el personal de administración e interventoría podrá ascender a unas 300 personas.



2.5.3 Energía para construcción

2.5.3.1 Generalidades

La energía para construcción será proporcionada mediante una línea de transmisión de energía, a 110 kV, entre la subestación Yarumal de EEPPM y la subestación de construcción localizada en el sitio de la obra.

Si bien esta solución corresponde a la adoptada desde estudios anteriores, para los presentes diseños de factibilidad se acopió información actualizada de EEPPM, relacionada con facilidades existentes en la zona y reglamentos y normas aplicables a este tipo de trabajos, y se desarrollaron las actividades de selección de la ruta y de los principales elementos componentes de la línea, tales como conductor, cable de guarda, estructuras, aisladores, herrajes para las cadenas de aisladores, etc., y se efectuó un plantillado preliminar sobre un perfil levantado con base en la topografía digital disponible, para alcanzar mayor precisión en la determinación de cantidades y pesos de las estructuras, de tal manera que se pudiera determinar también con mayor precisión el presupuesto de la línea.

2.5.3.2 Información utilizada

La selección de la ruta de la línea, hasta el corregimiento de El Valle, se efectuó sobre una restitución topográfica en escala 1:10.000 del corredor de la línea de transmisión a 44 kV Yarumal – El Valle. Para el tramo de El Valle hasta la subestación de construcción, se utilizó la topografía disponible para el proyecto y el diseño preliminar de la vía de acceso al mismo.

Para la definición del ancho de faja de servidumbre, distancias de seguridad y otros criterios de diseño, se utilizó la última versión del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE (Abril – 2007).

Fueron utilizados también programas preparados por Integral para cálculo de regulación y pérdidas, cálculo de temperatura en el conductor, cálculo mecánico de conductores y cálculo de plantillas para las catenarias del conductor.

2.5.3.3 Diseños de factibilidad

Selección del conductor y del cable de guarda. Se calcularon la regulación y las pérdidas para una gama de conductores que para la potencia por transmitir (10.000 kW), la tensión de transmisión (110 kV) y la longitud de la línea (42,5 km), cumplieran el criterio de regulación máxima de 5%. Así mismo, se calculó la temperatura máxima de cada uno de los conductores de la gama anterior, en condiciones normales.



Entre los conductores de la gama estudiada que cumplen con las restricciones técnicas, se seleccionó el conductor ACSR 477 kcmil HAWK, con miras a la estandarización, por ser el de menor calibre normalmente utilizado en líneas de 110 kV.

Por la necesidad de disponer de fibras ópticas para las comunicaciones, se optó por la utilización del cable de guarda tipo OPGW, de 12 fibras, con las características del que actualmente utilizan las EEPPM.

Cálculo mecánico de conductor y de cable de guarda. El cálculo mecánico del conductor y del cable de guarda, se realizó mediante programa para computador (hoja de EXCEL), y los resultados se utilizaron en la determinación de las cargas sobre las torres.

En el cálculo de las cargas de viento se utilizó la formulación tradicionalmente utilizada por EEPPM, adoptando una “velocidad del viento básico” de 100 km, para cumplir con las exigencias de la norma de construcciones sismo resistentes NSR-98.

Plantillado preliminar, cargas y pesos. Las plantillas fueron calculadas por un programa para computador (hoja de EXCEL); el perfil para el plantillado preliminar fue obtenido por medio del programa In-Road a partir de la topografía 1:10.000 disponible.

Se efectuó un plantillado libre, que permitió definir una familia de torres con tres tipos: suspensión, retención en ángulos medios y retención en ángulos grandes/terminal.

Con base en el resultado del plantillado, se calcularon las cargas sobre las estructuras y finalmente, se determinó el peso de estas por medio de la metodología de la BPA, (Bonneville Power Administration).

Con base en el trabajo descrito anteriormente, se determinaron a este nivel de factibilidad, las características de los principales componentes de la línea de energía para construcción, saber, conductor, cable de guarda, aisladores, torres y herrajes, y se elaboró el presupuesto correspondiente.

2.6 DESARROLLO POR ETAPAS

De acuerdo con lo señalado en los términos de referencia para los estudios de complementación de la factibilidad del Proyecto, en la ejecución de los diseños se dio consideración a la posibilidad de construir el proyecto por etapas. Esta opción, brindaría a LA HIDROELÉCTRICA una flexibilidad en su proceso de participación en el mercado, al permitirle ajustar el ingreso del proyecto en el mercado de manera ajustada al nivel de su expansión. Así mismo, la materialización de tal posibilidad le permitiría diferir inversiones en el tiempo.

Los análisis y consideraciones hechas en el transcurso de los estudios sobre las condiciones físicas del sitio en donde se localizan las obras y las características de la presa y sus obras anexas, en particular del vertedero, llevan a concluir que el eventual



desarrollo del proyecto por etapas debe circunscribirse a la ejecución de la central y sus obras anexas y la instalación de los equipos en varias fases. Así mismo, y con base, además, en las previsiones que se tienen respecto al crecimiento del mercado, se anticipa que las etapas a contemplar serían dos, en cada una de las cuales se instalarían cuatro unidades de generación, con un desfase temporal de entre tres y cinco años.

El desarrollo del Proyecto en dos etapas de igual capacidad de generación, permite que, sin comprometer la seguridad y estabilidad del proyecto, se difieran inversiones asociadas a la construcción de algunas obras civiles y la compra de la mitad de los equipos electromecánicos de generación, por un monto cercano al 25% del total de las inversiones requeridas por el proyecto. Adicionalmente, con este desarrollo por etapas no se deterioran los indicadores del proyecto global, y se tendría que:

- La etapa I, con una inversión cercana al 75% del total del proyecto y con una capacidad instalada del 50% del total, se genera el 70% de la energía media y el 100% de la energía firme, alcanzando factores de planta cercanos a 0,9, equivalentes a los factores típicos de plantas de generación térmica sin costo de combustible.
- La etapa II, con una inversión cercana al 25% del total del proyecto y con una capacidad instalada del 50% del total, genera el 30% de la energía media.

Las obras civiles y los equipos de las dos etapas de construcción del proyecto consisten fundamentalmente en los siguientes trabajos:

- **Etapas I**

- La totalidad de la infraestructura del proyecto.
- La totalidad de la presa y obras anexas.
- La totalidad de las obras de captación, consistentes en la plazoleta, las ocho estructuras de captación, la galería de compuertas y los ocho pozos de compuertas y sus correspondientes compuertas.
- La totalidad de las obras de las cuatro conducciones iniciales y parte de las cuatro restantes. De estas últimas se ejecutarían las excavaciones y revestimiento en concreto de los túneles superiores y de los pozos de presión.
- La totalidad de las obras del túnel de acceso a la casa de máquinas.
- La totalidad de los túneles de construcción superior e inferior de primera etapa.
- La caverna principal, en una longitud de 136 m que corresponde a las primeras cuatro unidades, a la sala de montaje y a un tramo adicional de 20 m.
- La caverna de transformadores, en una longitud de 130 m que corresponde al sector asociado a la primera etapa de la caverna principal y un tramo adicional de 20 m.



- La almenara N° 1, asociada a las primeras cuatro unidades y el pozo de aireación correspondiente.
 - La plazoleta de salida de los túneles de descarga, los túneles de descarga Nos 1 y 2 y el canal de salida, asociado a las primeras cuatro unidades.
 - Los equipos electromecánicos asociados a las primeras cuatro unidades.
 - La totalidad del pozo de salida de cables y la plazoleta de la subestación.
 - La totalidad del túnel de aireación y de evacuación de la caverna principal y de la caverna de transformadores.
- **Etapas II**
- Los ramales de construcción del túnel inferior para segunda etapa.
 - Los tramos faltantes de la caverna principal y de la caverna de transformadores.
 - La almenara N° 2 y el pozo de aireación correspondiente.
 - Las obras faltantes de las conducciones.
 - Los equipos electromecánicos asociados a las cuatro unidades adicionales.
 - Los túneles de descarga Nos 3 y 4 y los correspondientes canales de transición de salida, asociados a las cuatro unidades adicionales.



2.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	2.1
2.1	INTRODUCCION	2.1
2.2	PRESA Y OBRAS ANEXAS	2.2
2.2.1	Presa.....	2.2
2.2.1.1	<i>Descripción</i>	<i>2.2</i>
2.2.1.2	<i>Atagüa.....</i>	<i>2.4</i>
2.2.1.3	<i>Estabilidad de la presa</i>	<i>2.5</i>
2.2.1.4	<i>Instrumentación de la presa</i>	<i>2.6</i>
2.2.1.5	<i>Sistema de inyecciones.....</i>	<i>2.7</i>
2.2.1.6	<i>Sistema de drenaje</i>	<i>2.7</i>
2.2.2	Vertedero	2.8
2.2.3	Obras de desviación y descarga de fondo.....	2.10
2.2.3.1	<i>Desviación.....</i>	<i>2.10</i>
2.2.3.2	<i>Descargas de fondo e intermedia.....</i>	<i>2.11</i>
2.2.4	Fuentes de materiales y zonas de depósito.....	2.12
2.2.4.1	<i>Materiales para la presa</i>	<i>2.12</i>
2.2.4.2	<i>Zonas de depósito de materiales.....</i>	<i>2.13</i>
2.3	OBRAS DE GENERACIÓN	2.14
2.3.1	Características y criterios generales.....	2.14
2.3.2	Obras de captación	2.15
2.3.2.1	<i>Generalidades.....</i>	<i>2.15</i>
2.3.2.2	<i>Plazoleta de las estructuras de captación</i>	<i>2.16</i>
2.3.2.3	<i>Estructuras de captación</i>	<i>2.17</i>



2.3.2.4	<i>Galería y pozos de compuertas.....</i>	2.18
2.3.3	<i>Obras de conducción</i>	2.19
2.3.3.1	<i>Generalidades.....</i>	2.19
2.3.3.2	<i>Conducciones</i>	2.20
2.3.4	<i>Casa de máquinas, caverna de transformadores y obras anexas</i>	2.22
2.3.4.1	<i>Características y criterios de las obras de las cavernas de la central</i>	2.22
2.3.4.2	<i>Caverna principal</i>	2.24
2.3.4.3	<i>Caverna de transformadores, galerías de barras y acceso y sala de control ..</i>	2.26
2.3.4.4	<i>Almenaras.....</i>	2.27
2.3.4.5	<i>Sistema de aireación y evacuación de las cavernas.....</i>	2.28
2.3.4.6	<i>Túnel y pozo de cables.....</i>	2.29
2.3.4.7	<i>Túnel de acceso a la casa de máquinas.....</i>	2.29
2.3.4.8	<i>Túneles de construcción.....</i>	2.30
2.3.5	<i>Obras de descarga.....</i>	2.31
2.3.5.1	<i>Características y criterios de las obras de descarga.....</i>	2.31
2.3.5.2	<i>Túneles de descarga.....</i>	2.32
2.4	EQUIPOS ELÉCTRICOS Y MECÁNICOS.....	2.33
2.4.1	<i>Equipos mecánicos</i>	2.33
2.4.1.1	<i>Turbinas</i>	2.33
2.4.1.2	<i>Puentes grúa de casa de máquinas</i>	2.34
2.4.1.3	<i>Sistemas de agua de enfriamiento</i>	2.34
2.4.1.4	<i>Sistema de ventilación y acondicionamiento de aire.....</i>	2.35
2.4.1.5	<i>Sistemas de protección contra incendio</i>	2.35
2.4.1.6	<i>Compuertas para los tubos de aspiración</i>	2.36



2.4.1.7	Sistemas y equipos auxiliares	2.36
2.4.2	Equipos hidromecánicos	2.37
2.4.2.1	Compuertas para túneles de desviación.....	2.37
2.4.2.2	Compuertas para descargas de fondo.....	2.37
2.4.2.3	Rejas coladeras para la captación.....	2.38
2.4.2.4	Compuertas para la captación.....	2.38
2.4.2.5	Compuertas radiales para el vertedero.....	2.38
2.4.2.6	Compuertas auxiliares para el vertedero	2.38
2.4.2.7	Blindajes metálicos en los túneles de la conducción.	2.39
2.4.3	Equipos eléctricos	2.39
2.4.3.1	Generalidades.....	2.39
2.4.3.2	Generadores	2.40
2.4.3.3	Barras	2.41
2.4.3.4	Bancos de transformadores	2.42
2.4.3.5	Cables aislados de 500 kV.....	2.43
2.4.3.6	Subestación de 500 kV.....	2.43
2.4.3.7	Servicios auxiliares eléctricos.....	2.45
2.4.3.8	Sistema de control.....	2.45
2.4.3.9	Sistema de protección.....	2.46
2.4.3.10	Comunicaciones.....	2.47
2.5	OBRAS DE INFRAESTRUCTURA.....	2.49
2.5.1	Vías de acceso.....	2.49
2.5.1.1	Generalidades.....	2.49
2.5.1.2	Criterios de diseño	2.50



2.5.1.3	<i>Longitudes y volúmenes de explanación</i>	2.51
2.5.1.4	<i>Estructuras</i>	2.52
2.5.2	<i>Campamentos</i>	2.53
2.5.3	<i>Energía para construcción</i>	2.54
2.5.3.1	<i>Generalidades</i>	2.54
2.5.3.2	<i>Información utilizada</i>	2.54
2.5.3.3	<i>Diseños de factibilidad</i>	2.54
2.6	<i>DESARROLLO POR ETAPAS</i>	2.55



<i>Figura 2.1. Presa del proyecto hidroeléctrico Ituango.....</i>	<i>2.2</i>
<i>Figura 2.2. Vista frontal de la presa</i>	<i>2.3</i>
Figura 2.3. Esquema del Vertedero	2.9
<i>Figura 2.4. Localización del vertedero en el esquema general del proyecto</i>	<i>2.9</i>
<i>Figura 2.5. Obras de captación.....</i>	<i>2.16</i>
<i>Figura 2.6. Secciones de las obras de conducción</i>	<i>2.21</i>
<i>Figura 2.7. Esquema de la casa de máquinas.....</i>	<i>2.22</i>
<i>Figura 2.8. Distribución espacial de la casa de máquinas</i>	<i>2.23</i>
<i>Tabla 2.1 Características básicas de los generadores</i>	<i>2.40</i>
<i>Tabla 2.2 Resultados del dimensionamiento de los generadores</i>	<i>2.41</i>
<i>Tabla 2.3 Características de las barras.....</i>	<i>2.41</i>
<i>Tabla 2.4 Características básicas de los bancos de transformadores monofásicos.....</i>	<i>2.42</i>
<i>Tabla 2.5. Dimensiones de los transformadores</i>	<i>2.43</i>
<i>Tabla 2.6. Características generales de la subestación</i>	<i>2.44</i>
<i>Tabla 2.7 Criterios de diseño para las vías de acceso.....</i>	<i>2.50</i>
<i>Tabla 2.8 Volúmenes de explanación</i>	<i>2.52</i>