

Diseños básicos de las obras conexas a la Estación de Bombeo de Aguas Residuales de Canoas y preparación de documentos técnicos de licitación para el diseño detallado y construcción de la misma

Producto 2: Alternativas de Diseño

**Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá
Dirección Red Troncal de Alcantarillado**

Revisión 2 – Julio 2017



GREELEY AND HANSEN

Producto 2: Alternativas de Diseño

- LISTA DE DISTRIBUCIÓN**

DESTINATARIO	No. DE COPIAS
EAB	1

- ÍNDICE DE MODIFICACIONES**

ÍNDICE DE REVISIÓN	CAPÍTULO MODIFICADO	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES
0			Documento original
1	Capítulo 4	2017-05-31	Se incluyen complementos relacionados con la modelación CFD y el dimensionamiento hidráulico de la alternativa seleccionada
2	Revisión general	2017-07-20	Se incluyen las observaciones realizadas por la supervisión del Contrato de la EAB y por EMGESA.

- ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN**

TÍTULO DEL DOCUMENTO:		Producto 2: Alternativas de Diseño					
APROBACIÓN	NÚMERO DE LA REVISIÓN		0	1	2	3	
	RESPONSABLE DE LA ELABORACIÓN	Nombre:	A. Montes	A. Montes	A. Montes		
		Firma:					
		Fecha:	2017-04-07	2017-05-31	2017-07-20		
	RESPONSABLE POR REVISIÓN Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD	Nombre:	P. Vogel	P. Vogel	P. Vogel		
		Firma:					
		Fecha:	2017-04-07	2017-05-31	2017-07-20		
	Vo. Bo. DIRECTOR DEL PROYECTO	Nombre:	F. Sarmiento	F. Sarmiento	F. Sarmiento		
		Firma:					
		Fecha:	2017-04-07	2017-05-31	2017-07-20		

Tabla de Contenido

1. Introducción	4
2. Tamizado de Tecnologías.....	6
2.1 Resumen de criterios y bases de diseño	6
2.2 Unidades de bombeo	8
2.2.1 Bombas centrífugas sumergibles.....	8
2.2.2 Bombas centrífugas en pozo seco de eje vertical.....	11
2.3 Sistema de cribado grueso.....	14
2.3.1 Rejas de barra fija con rastrillo limpiador operado por cable	15
2.3.2 Sistema de criba - rastrillo mecánico operado por cadena	17
2.4 Ejemplos de proyectos internacionales de características similares.....	19
2.4.1 Estación de bombeo El Caracol, México DF, México.....	19
2.4.2 Estación de bombeo Túnel DC Water, Washington DC, EEUU.....	22
2.5 Selección de tecnologías	25
3. Identificación y comparación de alternativas de bombeo y cribado	27
3.1 Identificación de alternativas.....	27
3.2 Cribado en los interceptores afluentes.....	28
3.3 Dos pozos sin derivación	30
3.3.1 Consideraciones hidráulicas	31
3.3.2 Consideraciones geotécnicas	33
3.3.3 Consideraciones estructurales	34
3.3.4 Consideraciones de procedimientos constructivos	38
3.3.5 Consideraciones de operación y acceso.....	39
3.3.6 Estimado general de costo de construcción.....	39
3.4 Dos pozos con derivación	39
3.4.1 Consideraciones hidráulicas	41
3.4.2 Consideraciones geotécnicas	42
3.4.3 Consideraciones estructurales.....	42
3.4.4 Consideraciones de procedimientos constructivos	42
3.4.5 Consideraciones de operación y acceso.....	42
3.4.6 Estimado general de costo de construcción.....	43

Tabla de Contenido

3.5	Pozo único	43
3.5.1	Consideraciones hidráulicas	43
3.5.2	Consideraciones geotécnicas	45
3.5.3	Consideraciones estructurales	45
3.5.4	Consideraciones de procedimientos constructivos	46
3.5.5	Consideraciones de operación y acceso.....	46
3.5.6	Estimado general de costo de construcción.....	46
3.6	Evaluación de alternativas	47
4.	Pre-dimensionamiento de la alternativa seleccionada	49
4.1	Pre-dimensionamiento hidráulico	49
4.1.1	Hidráulica del sistema de cribado	49
4.1.2	Hidráulica del Pozo del Bombeo	51
4.1.3	Perfil Hidráulico	54
4.2	Modelación CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>).....	56
4.2.1	Montaje del Modelo	56
4.2.2	Resultados Preliminares del Modelo.....	57
4.2.3	Ajustes del Sistema.....	59
4.2.4	Resultados del Modelo Ajustado.....	59
4.2.5	Conclusiones.....	61

Lista de Tablas

Tabla 2-1	Datos de Estructuras Existentes y Diseñadas Pertinentes para la EBAR Canoas	7
Tabla 2-2	Criterios de diseño adoptados para la comparación de alternativas.....	7
Tabla 2-3	Pre-dimensionamiento a partir de bombas centrífugas sumergibles	11
Tabla 2-4	Pre-dimensionamiento a partir de bombas centrífugas en pozo seco de eje vertical	14
Tabla 2-5	Pre-dimensionamiento a partir de rejas de barra fija con rastrillo operado por cable	16
Tabla 2-6	Pre-dimensionamiento a partir de criba con rastrillo mecánico operado por cadena	18
Tabla 2-7	Características principales de la Estación de Bombeo “El Caracol”	21
Tabla 2-8	Características principales de la Estación de Bombeo Túnel DC Water	24
Tabla 2-9	Matriz de evaluación – Tecnologías de bombeo.....	25
Tabla 2-10	Matriz de evaluación – Tecnologías de cribado.....	26
Tabla 3-1	Estaciones de cribado múltiples –vs- operación única en sitio de la EBAR Canoas	29
Tabla 3-2	Espesores de pantalla y muro interior. Alternativa de dos pozos sin derivación	37

Tabla de Contenido

Tabla 3-3 Dimensiones de elementos para losa de fondo y pilas. Válido para todas las alternativas	38
Tabla 3-4 Espesores de pantalla y muro interior. Alternativa de dos pozos con derivación	42
Tabla 3-5 Espesores de pantalla y muro interior. Alternativa de pozo único	45
Tabla 3-6 Análisis comparativo de alternativas.....	47

Lista de Figuras

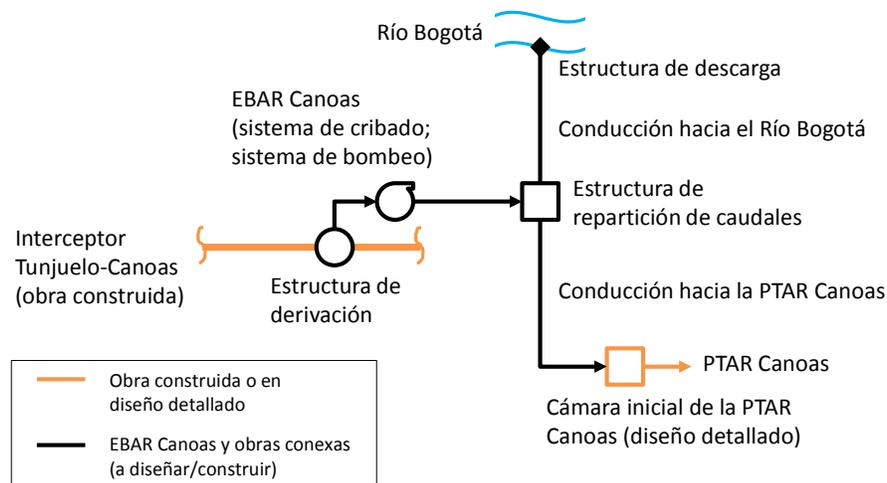
Figura 1-1 Diagrama Simplificado de la EBAR Canoas y sus Obras Conexas	4
Figura 2-1 Estación de bombeo con unidades centrífugas sumergibles (<i>Fuente: KSB</i>)	9
Figura 2-2 Estación de bombeo con unidades centrífugas en pozo seco de eje vertical (<i>Fuente: Agencia Nacional del Agua, Singapur</i>).....	12
Figura 2-3 Rejas de barra fija con rastrillo limpiador operado por cable (<i>Fuente: CONAGUA</i>)	16
Figura 2-4 Sistema de criba - rastrillo mecánico operado por cadena (<i>Fuente: Vulcan Industries</i>).....	18
Figura 2-5 Vista general de la Estación de Bombeo “El Caracol” (<i>Fuente: CONAGUA</i>)	20
Figura 2-6 Vista general de la Estación de Bombeo Túnel DC Water, en proceso de construcción (<i>Fuente: DC Water</i>)	23
Figura 3-1 Esquema ilustrativo: Estaciones de cribado múltiples –vs- operación única en sitio de la EBAR Canoas (<i>Fuente: Consultor</i>).....	28
Figura 3-2 Plano ilustrativo – Alternativa de dos pozos sin derivación (<i>Fuente: Consultor</i>)	32
Figura 3-3 Disposición sistema estructural para pozos (<i>Fuente: Consultor</i>).....	35
Figura 3-4 Fuerzas actuantes y desarrolladas en el sistema de pantalla y el de muro interior (<i>Fuente: Consultor</i>)....	36
Figura 3-5 Fuerzas actuantes y desarrolladas en el sistema de fondo de pozo (<i>Fuente: Consultor</i>)	36
Figura 3-6 Distribución y parametrización de espesores en pantalla de contención y muro interior (<i>Fuente: Consultor</i>)	37
Figura 3-7 Esquema de dimensiones para estructura de fondo (<i>Fuente: Consultor</i>).....	38
Figura 3-8 Plano ilustrativo – Alternativa de dos pozos con derivación (<i>Fuente: Consultor</i>)	40
Figura 3-9 Plano ilustrativo – Alternativa de pozo único (<i>Fuente: Consultor</i>)	44
Figura 4-1 Esquema del Sistema de Cribado (<i>Fuente: Consultor</i>).....	51
Figura 4-2 Esquema del Pozo de Bombeo (<i>Fuente: Consultor</i>)	53
Figura 4-3 Esquema de la Estación de Bombeo (<i>Fuente: Consultor</i>).....	54
Figura 4-4 Perfil Hidráulico de la Estación de Bombeo (<i>Fuente: Consultor</i>)	55
Figura 4-5 Esquemización de la Estación de Bombeo (<i>Fuente: Consultor</i>).....	57
Figura 4-6 Resultados de la simulación inicial – vista general (<i>Fuente: Consultor</i>)	58
Figura 4-7 Resultados de la simulación inicial – detalle succión de la bomba (<i>Fuente: Consultor</i>).....	59
Figura 4-8 Resultados de la simulación incluyendo ajustes – vista general (<i>Fuente: Consultor</i>).....	60
Figura 4-9 Resultados de la simulación incluyendo ajustes – detalle succión de la bomba (<i>Fuente: Consultor</i>)	61

Producto 2: Alternativas de Diseño

1. Introducción

La Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB) contrató con Greeley and Hansen Colombia SAS la consultoría para realizar los diseños básicos de las obras conexas a la Estación de Bombeo de Aguas Residuales (EBAR) Canoas y preparar los documentos técnicos de licitación para el diseño detallado y construcción de la misma, según el Contrato 2-02-25500-00752-2016. Las obras a considerar en esta consultoría son aquellas necesarias para realizar la conexión de la EBAR Canoas con el Interceptor Tunjuelo-Canoas ya construido. Se prevé que estas obras incluirán: Estructura de derivación de caudal desde el Interceptor Tunjuelo-Canoas, sistema de cribado, sistema de bombeo, estructura de repartición del caudal bombeado, conducciones de descarga al Río Bogotá y a la PTAR (PTAR) Canoas, sistema eléctrico, sistema de instrumentación y control, y obras civiles complementarias. Las obras principales se muestran en la **Figura 1-1** mediante una representación gráfica simplificada.

Figura 1-1
Diagrama Simplificado de la EBAR Canoas y sus Obras Conexas



El objetivo del diseño a nivel básico es establecer el propósito, características y criterios de diseño de las estructuras y sistemas del proyecto, identificando con suficiente especificidad la configuración de las estructuras, la disposición general de los equipos, los requerimientos de rendimiento y operatividad, y las normas y estándares de diseño aplicables al proyecto. El diseño a nivel básico se contemplará de manera que sirva como punto de partida para el contrato de diseño de detalle y construcción, sin que sea restrictivo o llegue a obstruir la creatividad que el contratista seleccionado pueda aportar durante el diseño de detalle y construcción de las obras.

La consultoría se lleva a cabo a través del desarrollo de cuatro productos de acuerdo con el alcance especificado en los Términos de Referencia del contrato. Estos cuatro productos son:

- Producto 1: Revisión y análisis de la información – Compendio de los resultados de la revisión de información y estudios anteriores disponibles, del análisis de trabajos de terreno realizados por la EAB, y de la revisión de reglamentación y normatividad aplicable al proyecto.

Producto 2: Alternativas de Diseño

- Producto 2: Alternativas de diseño – Análisis de tamizado de tecnologías, investigación de experiencias en proyectos similares, identificación y evaluación de alternativas de bombeo y cribado, y dimensionamiento y modelación de la alternativa seleccionada.
- Producto 3: Diseño de ingeniería básica de la alternativa seleccionada – Elaboración de planos a nivel de diseño conceptual que permitan establecer el propósito, características y criterios de diseño de las estructuras y sistemas del proyecto, identificando con suficiente especificidad la configuración de las estructuras, la disposición general de los equipos, los requerimientos de rendimiento y operatividad, y las normas y estándares de diseño aplicables al proyecto.
- Producto 4: Documentos para contratación – Compilación de los pliegos necesarios para la licitación del diseño detallado y construcción de la EBAR Canoas y sus obras conexas, documentos que incluyen entre otros: Planos a nivel de diseño conceptual, especificaciones técnicas, especificaciones de rendimiento, formularios de características garantizadas, matriz de riesgos, presupuesto de construcción y programación de ejecución del proyecto.

El presente informe corresponde al Producto 2: Alternativas de diseño, y está organizado en tres apartes que describen los resultados de las actividades realizadas. En el primer aparte se realiza un análisis de tamizado de tecnologías de bombeo y cribado, con una selección de la tecnología recomendada para cada uno de esos procesos. En un segundo aparte se analizan diferentes alternativas de configuración de pozos para alojar las bombas y las cribas previamente seleccionadas. Además de las consideraciones hidráulicas, este análisis requiere de consideraciones geotécnicas, estructurales, constructivas, y de costos para la evaluación de las alternativas y la selección de la alternativa recomendada para ser llevada a diseño de ingeniería básica. En el tercer aparte se realizan ajustes al dimensionamiento de las estructuras de la alternativa seleccionada y una modelación básica de CFD para las estructuras de derivación, cribado y bombeo con la finalidad de identificar posibles áreas problemáticas.

Producto 2: Alternativas de Diseño

2. Tamizado de Tecnologías

Esta sección tiene como objetivo presentar el análisis de alternativas tecnológicas para los componentes de cribado y bombeo, que se constituyen como las unidades de proceso principales a tener en cuenta en este proyecto. Para cada componente se realizará un análisis, como mínimo, de dos (2) alternativas tecnológicas.

De acuerdo con lo identificado durante la etapa de revisión de información disponible (Producto 1 de la presente consultoría), el sistema general de cribado a diseñar para la EBAR Canoas debe considerar cribado grueso únicamente, principalmente para la protección de las unidades de bombeo. Lo anterior, considerando que en los diseños de detalle de la PTAR Canoas, se prevén estructuras de cribado medio y fino dentro de las obras de cabecera de la planta. En este sentido, el análisis de alternativas para este componente se enfoca en sistemas de remoción de sólidos gruesos (con tamaños mayores a 50 o 60 mm), que pueden generar daños u obstrucción de las unidades de bombeo. Cada alternativa a analizar considera tanto el sistema de retención como los elementos principales para la elevación y el manejo de sólidos.

En cuanto al componente de bombeo, el análisis de alternativas se enfoca en los tipos de unidades de bombeo disponibles para este tipo de aplicaciones.

Para identificar las tecnologías a analizar, tanto para el cribado como para el bombeo, se parte de los criterios y bases de diseño del proyecto, que establecen las limitantes para la selección de tecnologías aplicables.

Para cada alternativa tecnológica se presenta una descripción de características principales y un análisis de los criterios de decisión (costos de inversión, costos de operación y mantenimiento, eficiencia, confiabilidad, requerimientos de energía, entre otros), que se presentan con mayor detalle en los numerales siguientes.

De igual manera, se presenta una investigación de experiencias internacionales similares al proyecto de la EBAR Canoas, ilustrando las tecnologías aplicadas en dichos proyectos y sus características principales.

Finalmente, a partir de un análisis matricial multi-criterio, se califican y comparan las diferentes alternativas para emitir conclusiones en cuanto a la selección de tecnologías que se llevarán a las fases posteriores de diseño básico.

2.1 Resumen de criterios y bases de diseño

Como resultado de la revisión y análisis de información disponible y conforme a lo consignado en la sección 5 del Producto 1 de la presente consultoría, a continuación se presenta un compendio de los criterios, bases y parámetros de diseño que se encuentran actualmente definidos como resultado de las obras ya construidas y de aquellas que cuentan con diseños detallados para su construcción.

En primera instancia, en la **Tabla 2-1** se presenta un resumen de datos y parámetros asociados a las estructuras existentes y diseñadas, pertinentes para el proyecto EBAR Canoas.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Tabla 2-1

Datos de Estructuras Existentes y Diseñadas Pertinentes para la EBAR Canoas

Parámetro	Valor
Interceptor Tunjuelo-Canoas	
Diámetro del túnel (m)	4,2
Caudal máximo de diseño (m ³ /s)	36,2
Caudal mínimo en tiempo seco (m ³ /s)	6,2
Elevación aproximada de solera interior del túnel en sitio del proyecto (msnm)	2515
Elevación aproximada de superficie del terreno en sitio del proyecto (msnm)	2550
Profundidad aproximada de solera interior del túnel en sitio del proyecto (m)	35
Cámara inicial de la PTAR Canoas	
Nivel de agua a caudal máximo 32 m ³ /s (msnm)	2553,51
Nivel de agua a caudal medio 16 m ³ /s (msnm)	2552,97
Cota de corona de muros (msnm)	2555,40
Cota de fondo de la estructura (msnm)	2551,40
Sistema de cribado de la PTAR Canoas	
Rejas de cribado medio, espacio libre entre barras (mm)	25
Rejas de cribado fino, espacio libre entre barras (mm)	6
Nivel del agua en el Río Bogotá	
Nivel del río para una frecuencia de 1 en 100 años (msnm)	2540,31

Para la selección de alternativas de cribado y bombeo se parte de los criterios consignados en la **Tabla 2-2**, los cuales podrán ser refinados en fases posteriores del diseño. Para el presente informe, se adoptan como base para la comparación de alternativas.

Tabla 2-2

Criterios de diseño adoptados para la comparación de alternativas

Parámetro	Valor
Caudal máximo de diseño (m ³ /s)	36,2
Caudal mínimo en tiempo seco (m ³ /s)	6,2
Caudal medio diario (m ³ /s)	16,0
Profundidad aproximada de solera interior del túnel en sitio del proyecto (m) ⁽¹⁾	35
Profundidad de excavación aproximada (m) ⁽²⁾	40

(1) Se adopta como altura de bombeo (TDH) para propósito de comparación de tecnologías

(2) Se adopta una misma profundidad para todos los pozos. Esta profundidad corresponde a 35 m de profundidad de la solera del túnel más una profundidad adicional de excavación estimada en aproximadamente 5 m, para la losa de cimentación

Producto 2: Alternativas de Diseño

2.2 Unidades de bombeo

La EBAR Canoas requiere elevar agua residual cruda desde el túnel Interceptor Tunjuelo-Canoas hasta una cámara de repartición en superficie, que permitirá derivar el flujo hacia el río Bogotá directamente o a la futura PTAR Canoas. El agua residual cruda contiene sólidos en suspensión como arenas, sólidos orgánicos e inorgánicos y materiales fibrosos. Por lo anterior, las bombas deberán ser construidas a partir de materiales resistentes a la abrasión, equipadas con las clases apropiadas de sellos y con un impulsor cerrado de flujo mixto o inatascable. Estos impulsores permiten bombear líquidos que contengan sólidos y material fibroso sin obstruirse y no requieren de limpieza y/o mantenimiento frecuente.

Las bombas deben ser instaladas dentro de un pozo vertical profundo, a una cota inferior a la del Interceptor Tunjuelo-Canoas. Por lo anterior, para minimizar la excavación total y el volumen de construcción de obra civil de la estación de bombeo, el diámetro del pozo de bombeo debe ser el mínimo posible. Esto favorece sistemas de bombeo con un diseño compacto (espacio).

Debido a los requisitos especiales (características del fluido bombeado, capacidad y cabeza) que deben cumplir las bombas para este proyecto, las opciones de tecnología aplicables son limitadas. A continuación se describen los tipos de bombas disponibles, que cumplen con las características requeridas.

2.2.1 Bombas centrífugas sumergibles

Las bombas centrífugas sumergibles fueron desarrolladas en 1928 para la industria del petróleo y se convirtieron en algo habitual en la industria de las aguas residuales durante la década de 1950 y 1960. Unidades para servicio de aguas residuales están disponibles en una variedad de capacidades de descarga (aunque limitada a capacidades de hasta 2 m³/s) y con cabezas de hasta 90 metros.

Las bombas están equipadas con motores diseñados para operar sumergidos en las aguas residuales. Al ser instaladas directamente en el pozo de succión, no requieren de una partición en seco para la instalación de equipos. Sin embargo, requieren de un espaciado entre unidades considerable, para prevenir condiciones hidráulicas adversas en la succión. Lo anterior, sumado a la capacidad limitada por unidad, que conlleva a un requerimiento mayor de unidades para responder a grandes caudales, puede resultar en estaciones de bombeo de tamaño considerable.

En la **Figura 2-1** se ilustra una configuración típica de estación de bombeo con bombas sumergibles y un detalle de la unidad de bombeo.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 2-1

Estación de bombeo con unidades centrífugas sumergibles (Fuente: KSB)



A continuación se presenta una descripción de las características técnicas generales de este tipo de unidades:

Impulsores

El diseño de impulsor con bordes romos y bien redondeados impide la captura de material fibroso. Las bombas de gran tamaño (como las requeridas para la EBAR Canoas) se construyen con dos o tres paletas a lo sumo, permitiendo el paso de sólidos de gran tamaño. La capacidad de manejo de sólidos de la unidad se define habitualmente como el diámetro de una esfera teórica que pasaría por la bomba. Dicho diámetro dependerá de la especificación de cada bomba.

Anillos de desgaste

Las bombas están equipadas con anillos de desgaste axial, radial y de diseño especial. Dada la presencia de arenas en las aguas residuales, la vida útil del anillo de desgaste es una consideración importante. En bombas de gran tamaño se especifican anillos de desgaste con un diseño especial para extender su vida útil. Estos diseños pueden comprender anillos en forma de L, o anillos hechos de materiales resistentes a la abrasión, incluyendo revestimientos especiales.

Motores

Los motores para bombas sumergibles son equipos de propósito único, diseñados específicamente para aplicaciones bajo el agua. La carcasa de transmisión está sellada herméticamente para evitar la intrusión del líquido bombeado. El motor generalmente está equipado con dos cierres mecánicos, y se llena el espacio entre las juntas con aceite. Para compensar la expansión térmica del aceite, la cámara de aceite debe contener un dispositivo limitador de presión, que suele ser un colchón de aire o una bolsa sellada.

Producto 2: Alternativas de Diseño

La cubierta (carcasa) de la unidad puede venir llena con aire o aceite. Las unidades con aceite son menos sensibles a la intrusión del líquido bombeado, pero el aceite aumenta la fricción y por ende reduce la eficiencia de bombeo. Por lo anterior, las cubiertas con aceite generalmente no se suministran para bombas de gran tamaño.

En bombas sumergibles la caja de suministro eléctrico se debe sellar en todas sus juntas, especialmente en la entrada del cable. La caja generalmente viene equipada con un cierre apretado hidráulicamente para una mayor protección de los bobinados del motor.

Los motores sumergibles siempre deben estar equipados con dispositivos de detección de humedad, que permitan accionar una alarma cuando el sello mecánico externo presente alguna fuga.

En la mayoría de los casos las unidades son refrigeradas externamente, por lo cual deben permanecer sumergidas para un funcionamiento continuo. Pueden operarse únicamente durante cortos períodos expuestas al aire, antes de presentar daños por recalentamiento.

Tubería de impulsión

El método más popular para la instalación de bombas sumergibles es el denominado “pull-up”, en el que la tubería de impulsión está conectada a un codo especial, anclado a la losa del pozo húmedo. La boquilla de descarga de la bomba y el codo están equipados con acoplamientos automáticos. La bomba se monta y desmonta del codo de conexión directamente desde el pozo húmedo por medio de un sistema de grúa y cable sin requerir el ingreso de personal al pozo.

Asuntos relevantes de Operación y Mantenimiento

El dispositivo limitador de presión es importante para disipar las presiones internas de acumulación de calor dentro de la bomba. Se han dado situaciones graves de explosión de unidades de bombeo, al ser extraídas del pozo húmedo al poco tiempo de haberse detenido. Lo anterior, a causa de la expansión súbita del aceite del motor, cuyo calor residual no fue disipado por el líquido de inmersión.

En el diseño tipo “pull-up”, ante una posible conexión ineficaz de la bomba con el codo, se pueden presentar fugas considerables, reduciendo la eficiencia y capacidad de la unidad. Además, las articulaciones están sujetas a deterioro bajo condiciones de funcionamiento normal.

Debido a la inmersión en el pozo húmedo, las bombas sumergibles no son fácilmente accesibles para inspección y servicio y dan poca advertencia ante problemas incipientes.

Por lo general, requieren envío a los centros de servicio técnico calificado para reparación del motor o de los sellos, a razón de su cierre completamente hermético (intentar reparaciones en sitio puede anular la garantía del fabricante). Esto tiende a resultar en costos de mantenimiento y tiempo de entrega de servicio altos. Por lo anterior, es común que en estaciones de bombeo con unidades sumergibles, se requiera tener unidades completas de repuesto disponibles en sitio.

En la **Tabla 2-3** se presentan los resultados de un pre-dimensionamiento para la EBAR Canoas, empleando bombas centrífugas sumergibles, como resultado de consultas a diferentes fabricantes.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Tabla 2-3
Pre-dimensionamiento a partir de bombas centrífugas sumergibles

Parámetro	Valor
Capacidad x bomba (m ³ /s)	2,0
Número de bombas ⁽¹⁾	16+2 (+2)
Eficiencia (%)	80 - 85
Diámetro de impulsor (mm)	700 - 900
Diámetro mínimo de pozo de bombeo requerido (m) ⁽²⁾	48
Tamaño máximo de sólidos admisible (mm)	180
Costo estimado de equipos (Millones US\$) ⁽³⁾	\$ 5,3

- (1) Se prevé una capacidad nominal de 32 m³/s para atender el requerimiento máximo de la PTAR Canoas; el Q_{max} del Interceptor Tunjuelo-Canoas (36 m³/s) se maneja con la capacidad total (2 unidades de suplencia). Se recomiendan dos bombas adicionales a la suplencia, para mantener un inventario de reserva, considerando que el mantenimiento de unidades requiere desmonte y posible remisión al fabricante.
- (2) Espacio mínimo requerido para alojar 18 bombas en pozo húmedo circular, respetando el espaciamiento entre unidades
- (3) Estimado promedio a partir de cotizaciones preliminares de diferentes fabricantes

En el **Anexo 1 – Información técnica y cotizaciones**, se incluyen catálogos, datos y costos preliminares de los equipos considerados.

2.2.2 Bombas centrífugas en pozo seco de eje vertical

Las bombas centrífugas en pozo seco tienen una larga historia con uso documentado desde el siglo XVII. Unidades para servicio de aguas residuales están disponibles en una variedad de capacidades de descarga y con cabezas de hasta 90 metros. Las bombas de pozo seco están disponibles en diseños por separado (bomba y motor), en diseño acoplado o compactas para montaje vertical u horizontal. La capacidad de unidades de eje vertical puede ser significativamente más grande que las de eje horizontal, porque el peso del impulsor no impone una deflexión horizontal en el eje.

En la **Figura 2-2** se ilustra una configuración típica de estación de bombeo con bombas en pozo seco y un detalle de la unidad de bombeo de eje vertical.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 2-2

Estación de bombeo con unidades centrífugas en pozo seco de eje vertical (Fuente: Agencia Nacional del Agua, Singapur)



A continuación se presenta una descripción de las características técnicas generales de este tipo de unidades:

Impulsores

Al igual que en el caso de bombas sumergibles, el diseño de impulsor con bordes romos y bien redondeados impide la captura de material fibroso. Las bombas de gran tamaño se construyen con dos o tres paletas a lo sumo, permitiendo el paso de sólidos de gran tamaño. La capacidad de manejo de sólidos de la unidad se define habitualmente como el diámetro de una esfera teórica que pasaría por la bomba.

Anillos de desgaste

Las bombas están equipadas con anillos de desgaste axial, radial y de diseño especial. Dada la presencia de arenas en las aguas residuales, la vida útil del anillo de desgaste es una consideración importante. En bombas de gran tamaño se especifican anillos de desgaste con un diseño especial para extender su vida útil. Estos diseños pueden comprender anillos en forma de L, o anillos hechos de materiales resistentes a la abrasión, incluyendo revestimientos especiales. En el caso específico de estas bombas, el alojamiento de rodamientos de empuje está equipado con tornillos niveladores, que permiten que este se mueva axialmente para poder insertar las cuñas entre el marco y el reborde de la carcasa. Este ajuste mueve el montaje del rotor y establece la separación de los anillos de desgaste.

Acceso para limpieza

En el caso de bombas centrífugas de pozo seco (a diferencia de las bombas sumergibles), tanto la boquilla como el armazón del impulsor cuentan con tapas de acceso manual, que permiten la inspección y limpieza del interior de la bomba sin tener que desmantelar la unidad.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Motores

En el caso de bombas centrífugas de pozo seco (a diferencia de las bombas sumergibles), la instalación provee acceso directo a los motores para servicio o mantenimiento en sitio, sin requerir el desmonte de la unidad. Las unidades (motor-impulsor) pueden ser compactas o montadas por separado. En arreglos compactos se tiene un eje común para motor e impulsor. En el montaje separado se requieren ejes individuales para el impulsor y el motor. Este último proporciona mejor acceso a los sellos de la bomba y los rodamientos del motor, pero requiere el uso de acoplamientos universales.

Tuberías de succión/impulsión

Las bombas de pozo seco se instalan con tuberías de succión e impulsión fijas. La tubería de succión toma las aguas residuales del pozo húmedo para su traslado a la entrada de la bomba. Generalmente se provee una válvula de aislamiento entre el pozo húmedo y la bomba, para permitir el mantenimiento de las unidades.

Asuntos relevantes de Operación y Mantenimiento

Las bombas de pozo seco están disponibles en diseños de gran capacidad, como mínimo con capacidades similares a las de bombas sumergibles y suficiente cabeza para satisfacer las necesidades de la Estación de Bombeo de Canoas. En cuanto a configuraciones se refiere, las bombas de pozo seco montadas en eje vertical están disponibles en capacidades mayores a las de eje horizontal y tienen un tamaño compacto. La bomba, juntas, rodamientos y el motor son de fácil acceso para inspección y mantenimiento. La mayoría de trabajos de mantenimiento se pueden hacer directamente en sitio. Las tapas de acceso a boquilla e impulsor permiten la inspección, limpieza y retiro de material que pueda quedar alojado en el interior de la unidad, sin necesidad de retirar el sistema de bombeo.

Por lo general, presentan altas eficiencias lo que hace que el bombeo sea económico.

No requiere de un motor especial y la mayoría de labores de mantenimiento se pueden realizar sin la desconexión del mismo.

El montaje en eje vertical permite ubicar los motores por encima del nivel de inundación, eliminando dicho riesgo.

Sin embargo, para algunos trabajos de reparación (como el reemplazo de sellos mecánicos), se requiere izar y remover el motor previamente.

En la **Tabla 2-4** se presentan los resultados de un pre-dimensionamiento para la EBAR Canoas, empleando bombas centrífugas de pozo seco, como resultado de consultas a diferentes fabricantes.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Tabla 2-4

Pre-dimensionamiento a partir de bombas centrífugas en pozo seco de eje vertical

Parámetro	Valor
Capacidad x bomba (m ³ /s)	6,4
Número de bombas ⁽¹⁾	5+1
Eficiencia (%)	85 - 90
Diámetro de impulsor (mm)	1800 - 1900
Diámetro mínimo de pozo de bombeo requerido (m) ⁽²⁾	32
Tamaño máximo de sólidos admisible (mm)	360
Costo estimado de equipos (Millones US\$) ⁽³⁾	\$ 6,1

- (1) Se prevé una capacidad nominal de 32 m³/s para atender el requerimiento máximo de la PTAR Canoas; el Q_{max} del Interceptor Tunjuelo-Canoas (36 m³/s) se maneja con la capacidad total (1 unidad de suplencia).
- (2) Espacio mínimo requerido para alojar 6 bombas en pozo seco, respetando el espaciamiento entre unidades y la amplitud del pozo de succión
- (3) Estimado promedio a partir de cotizaciones preliminares de diferentes fabricantes

En el **Anexo 1**, se incluyen catálogos, datos y costos preliminares de los equipos considerados.

2.3 Sistema de cribado grueso

Los sistemas de cribado grueso se utilizan para la eliminación de objetos, como trapos, ladrillos, latas, botellas de plástico, ramas de árboles, entre otros que logran encontrar su camino en el sistema de alcantarillado. El sistema común utiliza una serie de barras de acero para atrapar los escombros mientras que el resto de las aguas residuales fluye a través de las mismas. Los objetos de gran tamaño presentes en el flujo pueden obstruir o dañar equipos de bombeo, válvulas, tuberías e interferir con la correcta operación de los procesos de tratamiento aguas abajo. Por lo anterior, estos sistemas son vitales para el correcto funcionamiento y protección de una EBAR.

El cribado grueso constituye la primera línea de defensa para eliminar objetos que plantean un riesgo significativo de obstrucción y/o daño de equipos posteriores. Las cribas requieren de atención periódica constante para limpiar el surtido de materiales recogidos o atrapados. A menudo, se emplean motores eléctricos en asociación con cables, cadenas o engranajes para la operación de rastrillos que limpian mecánicamente el sistema. Los desechos recolectados se almacenan en contenedores o tolvas para su transporte y disposición final.

Por lo general, los sistemas se componen de una serie de barras verticales o inclinadas de acero, soldadas a un marco y espaciadas uniformemente a través de un canal con aberturas de hasta 150 mm, a través de las cuales fluyen las aguas residuales. Las pantallas se fijan en ángulos de 60 a 90 grados con respecto a la horizontal. El sistema acumula escombros sobre la cara de la pantalla, generando una obstrucción al flujo y un correspondiente aumento del nivel del agua aguas arriba. Por lo anterior, se debe prever una frecuencia de limpieza suficiente para retomar niveles de agua normales y evitar desbordamientos del sistema. La cantidad de material atrapado se relaciona directamente con el espaciamiento entre barras. Para el caso de la Estación de Bombeo de Aguas Residuales de Canoas, se prevén espaciamientos de 50 a 60 mm, que otorgan un factor de seguridad suficiente para los equipos de bombeo previstos, válvulas, conducciones y procesos posteriores.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Las diferencias tecnológicas radican principalmente en el sistema de limpieza de rejas y en el nivel de operación de los mismos (sistemas operados desde superficie y sistemas operados en nivel subterráneo). A continuación se describen los sistemas de cribado disponibles, que cumplen con las características requeridas.

2.3.1 Rejas de barra fija con rastrillo limpiador operado por cable

Las rejas de barra fija con rastrillo operado por cable, utilizan en realidad un sistema de dos cables guiados para mover un rastrillo a lo largo de la cara de la pantalla de cribado en un solo movimiento hasta superficie. No presentan una limitante de profundidad y existen instalaciones de este tipo construidas para profundidades de hasta 100 m. Un cable responde por el movimiento de ascenso y descenso del rastrillo, mientras que el segundo cable opera los dientes del rastrillo para limpiar y capturar el material entre las rejas. El rastrillo transporta los desechos atrapados sobre una plataforma vertical fija y deposita la basura en un contenedor o tolva colocada debajo del tambor del cable.

La ventaja principal del sistema es que todas las partes móviles se encuentran por encima del nivel de las aguas residuales, facilitando su inspección y mantenimiento.

Así mismo, la operación de acopio de todo el material se realiza en superficie, sin requerir el ingreso de personal operativo al pozo de cribado.

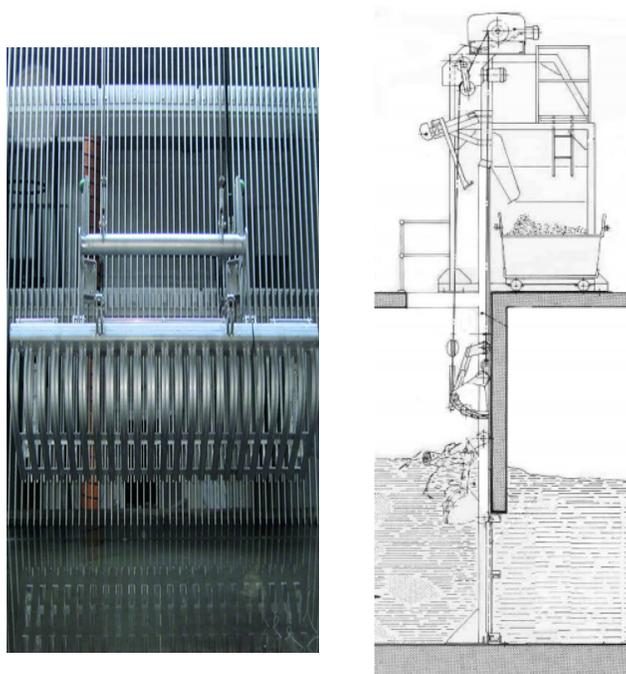
Una desventaja en sistemas profundos es la necesidad de mayores tiempos para completar el ciclo de limpieza. Sin embargo, el cribado previsto para la EBAR Canoas, contempla únicamente la captura de flotantes de gran tamaño (la mayor parte de los sólidos debe pasar las rejas), por lo que no se requiere de una alta frecuencia de limpieza.

En la **Figura 2-3** se ilustra una configuración típica de rejas de barra fija con rastrillo limpiador operado por cable.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 2-3

Rejas de barra fija con rastrillo limpiador operado por cable (Fuente: CONAGUA)



En la **Tabla 2-5** se presentan los resultados de un pre-dimensionamiento del sistema de cribado para la EBAR Canoas, empleando rejas de barra fija con rastrillo operado por cable.

Tabla 2-5

Pre-dimensionamiento a partir de rejas de barra fija con rastrillo operado por cable

Parámetro	Valor
Ancho de canal (m)	4,0
Número de canales	3
Altura de izaje (m)	40,0
Separación entre barras (mm)	60
Duración del ciclo de limpieza (min)	6,0
Costo estimado de equipos (Millones US\$)	\$ 1,4

En el **Anexo 1**, se incluyen catálogos, datos y costos preliminares de los equipos considerados.

Producto 2: Alternativas de Diseño

2.3.2 Sistema de criba - rastrillo mecánico operado por cadena

Consta de dos cadenas sin fin que pasan por encima de dos ruedas dentadas, localizadas por encima de la superficie de las aguas residuales, para mover un número múltiple de rastrillos a lo largo de las rejillas y la plataforma. Los rastrillos ejercen fuerza sobre la superficie debido a su propio peso, para sostener el material, para lo que se requiere de una mínima inclinación de la rejilla (60° por lo general). Dicha inclinación genera un mayor requerimiento de espacio, por lo que presenta una limitante para aplicaciones profundas. Para extraer material cribado de una profundidad superior a los 15 m, se requiere construir una plataforma intermedia, a partir de la cual es necesario elevar el material empleando un mecanismo complementario.

La ventaja es el sistema de catenaria es que los piñones, eje, polea eje y rodamientos están por encima de la superficie de las aguas residuales.

Sin embargo, parte del sistema de cadena y rastrillo está por debajo de las aguas residuales durante una parte importante del ciclo de limpieza. Esto favorece la corrosión y el desgaste de estos elementos debido a la naturaleza abrasiva de la arena en las aguas residuales.

La principal desventaja de estos sistemas es que requieren de una pantalla inclinada, lo que implica un gran espacio horizontal para aplicaciones profundas y la operación desde un nivel intermedio. En este caso, se requiere del ingreso de personal operativo al pozo de cribado para su funcionamiento cotidiano, lo que implica mayor requerimiento de instalaciones (escaleras y demás) y riesgos asociados.

En la **Figura 2-4** se ilustra una configuración típica de cribas con rastrillo mecánico operado por cadena.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 2-4

Sistema de criba - rastrillo mecánico operado por cadena (Fuente: Vulcan Industries)



En la **Tabla 2-6** se presentan los resultados de un pre-dimensionamiento del sistema de cribado para la EBAR Canoas, empleando cribas con rastrillo mecánico operado por cadena.

Tabla 2-6

Pre-dimensionamiento a partir de criba con rastrillo mecánico operado por cadena

Parámetro	Valor
Ancho de canal (m)	4,0
Número de canales	3
Altura de izaje (m)	10,0
Separación entre barras (mm)	60
Duración del ciclo de limpieza (min)	2,5
Costo estimado de equipos (Millones US\$)	\$ 1,8

En el **Anexo 1**, se incluyen catálogos, datos y costos preliminares de los equipos considerados.

Producto 2: Alternativas de Diseño

2.4 Ejemplos de proyectos internacionales de características similares

En este aparte se presenta un resumen de dos proyectos internacionales de estaciones de bombeo con tecnologías como las anteriormente mencionadas y de características similares a las del proyecto de la EBAR Canoas. El objetivo de este resumen es resaltar las características particulares de estaciones elevadoras profundas y de alta capacidad de bombeo con el fin de proveer un marco de referencia para las tecnologías y alternativas de pozos que se analizan en este informe.

Las estaciones de bombeo que se resumen a continuación son la estación de bombeo El Caracol en la ciudad de México y la estación de bombeo Túnel DC Water en la ciudad de Washington en los EEUU. Ambas estaciones tienen características similares a las del proyecto de la EBAR Canoas en lo que tiene que ver con función y orden de magnitud de profundidad y caudales de diseño. En los siguientes apartes se presenta una descripción de la configuración general y un resumen de las principales características de diseño de estas dos estaciones de bombeo. Información adicional, como planos (plantas y cortes) para entender mejor la configuración de pozos y disposición de equipos, datos técnicos sobre las unidades de bombeo y sistema de cribado, así como ilustraciones en general para las dos estaciones de bombeo se pueden encontrar en el **Anexo 2 – Ejemplos de Proyectos Internacionales**.

2.4.1 Estación de bombeo El Caracol, México DF, México

Como medida para resolver de fondo la problemática del sistema de drenaje del Valle de México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) construyó el Túnel Emisor Oriente (TEO), en una longitud aproximada de 62 kilómetros, 7 metros de diámetro y una capacidad de hasta 150 m³/s de aguas combinadas. El TEO está compuesto por 24 pozos de inspección/ventilación con profundidades que van de 26 hasta 150 metros.

Como complemento a las obras del primer tramo del TEO, CONAGUA construyó en el municipio de Ecatepec (al norte de la Ciudad de México), la Estación de Bombeo El Caracol, la cual permite derivar y bombear de vuelta a superficie un caudal de hasta 40 m³/s desde una profundidad aproximada de 50 m, en el Pozo No. 5 del túnel, al Gran Canal del Desagüe. La estación se encuentra en operación desde el año 2012.

Las obras subterráneas de la Estación de Bombeo El Caracol constan de un pozo de derivación desde el TEO, un pozo de cribado y dos pozos de bombeo (cada uno con capacidad para bombear hasta 20 m³/s). En la **Figura 2-5** se presenta una vista general de la estación.

En cuanto a las tecnologías, el pozo de cribado cuenta con dos canales de cribado (con capacidad para manejar hasta 20 m³/s cada uno), instalados con rejillas de barra y rastrillo de limpieza operado por cables. Cada canal está dotado con su rastrillo de limpieza independiente, los sólidos son recogidos en un solo movimiento desde el fondo y elevados a superficie, en donde se depositan en contenedores localizados contiguamente.

Por su parte, los pozos de bombeo están provistos cada uno de diez (10) bombas centrífugas sumergibles, con capacidad de 2 m³/s cada una, para una capacidad instalada total en la estación de 40 m³/s. Los motores de las bombas funcionan a velocidad constante.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 2-5

Vista general de la Estación de Bombeo “El Caracol” (Fuente: CONAGUA)



En la **Tabla 2-7** se presenta un resumen de las características principales. La información detallada (planos de los pozos de derivación, cribado y bombeo; especificaciones y catálogos de equipos de cribado y bombeo; fotografías) se incluye en el **Anexo 2**.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Tabla 2-7
Características principales de la Estación de Bombeo “El Caracol”

Parámetro	Valor
Pozo de derivación	
Diámetro del pozo (m)	16,0
Profundidad (m)	50,0
Pozo de cribado	
Diámetro del pozo (m)	16,0
Profundidad (m)	48,0
Número de canales de cribado	2
Ancho de canal (m)	6,0
Capacidad de flujo / canal (m ³ /s)	20,0
Tecnología de cribado	Rejilla de barra, limpieza mecánica operada con cables
Fabricante	Passavant Geiger
Ángulo de instalación (°)	90
Rejas de cribado grueso, espacio entre barras (mm)	60,0
Altura de izaje (m)	53,2
Duración del ciclo de limpieza (seg)	360
Pozos de bombeo (2 pozos)	
Diámetro de cada pozo (m)	20,0
Profundidad (m)	54,0
Unidades de bombeo / pozo	10
Capacidad de bombeo / unidad (m ³ /s)	2,0
Tecnología de bombeo	Centrífuga sumergible
Fabricante	KSB
Cabeza total dinámica - TDH (m)	43,5
Potencia de motores (kW)	1100
Eficiencia de bombeo (%)	84
Tamaño máximo de sólidos admisible por la bomba (mm)	180,0

Producto 2: Alternativas de Diseño

2.4.2 Estación de bombeo Túnel DC Water, Washington DC, EEUU

La Autoridad de Agua y Alcantarillado del Distrito de Columbia (DC Water) adelanta actualmente un plan a largo plazo para el control de vertimientos de alcantarillado combinado. Los principales componentes del plan incluyen un sistema de túnel profundo que conducirá los excesos en temporada de lluvia, que actualmente son vertidos directamente a cuerpos de agua, a una estación de bombeo localizada en predios de la PTAR “Blue Plains”, para su tratamiento. El sistema tiene como meta reducir en un 96% el vertimiento directo de aguas combinadas al río Potomac y a sus afluentes.

El túnel presenta un diámetro interno de 7 m y se constituye como una estructura multipropósito (conducción y almacenamiento), con una capacidad para almacenar un volumen aproximado de 600.000 m³ de aguas combinadas, para ser bombeadas de forma controlada a la Planta de Blue Plains.

Las obras subterráneas de la Estación Túnel DC Water constan de un pozo de cribado y un pozo de bombeo, construidos en línea, como punto final del sistema. En la **Figura 2-6** se presenta una vista general de la estación, que actualmente se encuentra en construcción. La entrada en operación está prevista para el primer semestre de 2018.

El pozo de cribado cuenta con dos canales, con capacidad para manejar hasta 22 m³/s cada uno (uno en operación + uno de suplencia), instalados con rejillas de barra fijas y rastrillo de limpieza operado por cables. La instalación cuenta con un equipo de limpieza que opera de manera compartida entre los dos canales a partir de un puente grúa. Los sólidos son recogidos en un solo movimiento desde el fondo y elevados a superficie, en donde se trasladan a lo largo del puente grúa para depositar directamente sobre volquetas que los trasladarán a su sitio de disposición final.

La Estación de Bombeo contará con una capacidad inicial de 10 m³/s y un plan de expansión a futuro que la llevará a una capacidad de 22 m³/s. La instalación contará inicialmente con cinco (5) bombas centrífugas de eje vertical en pozo seco, con una capacidad de 3,7 m³/s por unidad (se prevé operación con 3 bombas dejando 2 de suplencia). A futuro contará con ocho (8) unidades (6 en operación + 2 de suplencia).

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 2-6

Vista general de la Estación de Bombeo Túnel DC Water, en proceso de construcción

(Fuente: DC Water)



En la **Tabla 2-8** se presenta un resumen de las características principales. La información detallada (planos de los pozos de cribado y bombeo; información técnica de equipos de cribado y bombeo; fotografías) se incluye en el **Anexo 2**.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Tabla 2-8
Características principales de la Estación de Bombeo Túnel DC Water

Parámetro	Valor
Pozo de cribado	
Diámetro del pozo (m)	23,0
Profundidad (m)	46,0
Número de canales de cribado	2
Ancho de canal (m)	2,9
Capacidad de flujo / canal (m ³ /s)	22,0
Tecnología de cribado	Rejilla de barra fija, limpieza mecánica operada con cables
Fabricante	Lakeside/Muhr
Ángulo de instalación (°)	90
Rejas de cribado grueso, espacio entre barras (mm)	76,0
Altura de izaje (m)	50,1
Duración del ciclo de limpieza (seg)	300
Pozo de bombeo	
Diámetro de pozo (m)	40,2
Profundidad (m)	49,3
Unidades de bombeo	5 actual +3 a futuro
Capacidad de bombeo / unidad (m ³ /s)	3,7
Tecnología de bombeo	Centrífuga en pozo seco de eje vertical
Fabricante	Fairbanks Morse
Cabeza total dinámica - TDH (m)	48,7
Potencia de motores (kW)	2600
Eficiencia de bombeo (%)	86
Tamaño máximo de sólidos admisible por la bomba (mm)	180,0

Producto 2: Alternativas de Diseño

2.5 Selección de tecnologías

De acuerdo con la caracterización de tecnologías aplicables de bombeo y cribado, sumado al estudio de experiencias internacionales similares, en este aparte se presentan los resultados de la evaluación de alternativas tecnológicas, empleando una metodología de análisis matricial.

Los criterios de evaluación corresponden a las características descritas para cada componente en los numerales 2.2 y 2.3. Cada uno de los criterios presenta un factor de ponderación (valores entre 1 y 10), asignado según su importancia relativa para este proyecto. Cada tecnología recibe un puntaje con valores entre 1 y 5, de acuerdo con su desempeño en cada criterio evaluado, los cuales son ponderados y totalizados para obtener la calificación definitiva.

En la **Tabla 2-9** se presentan los resultados de la evaluación de tecnologías de bombeo.

Tabla 2-9
Matriz de evaluación – Tecnologías de bombeo

Criterio de evaluación	Factor de ponderación (1-10)	Bombas centrífugas sumergibles		Bombas centrífugas en pozo seco de eje vertical	
		Puntaje asignado (1-5)	Puntaje ponderado	Puntaje asignado (1-5)	Puntaje ponderado
Eficiencia	10,0	3,0	30,0	4,0	40,0
Confiabilidad	8,0	3,0	24,0	5,0	40,0
Facilidad de instalación y remoción	6,0	4,0	24,0	4,0	24,0
Facilidad de mantenimiento	8,0	2,0	16,0	4,0	32,0
Requerimientos de espacio	10,0	3,0	30,0	4,0	40,0
Requerimientos de energía	10,0	4,0	40,0	5,0	50,0
Adaptabilidad a requerimientos futuros	4,0	3,0	12,0	4,0	16,0
Aspectos ambientales	4,0	4,0	16,0	3,0	12,0
Seguridad de los operadores	6,0	4,0	24,0	4,0	24,0
Costo de equipo	8,0	4,0	32,0	3,0	24,0
Costo de operación y mantenimiento	8,0	4,0	32,0	3,0	24,0
Puntaje Ponderado Total			280,0		326,0

De igual manera, en la **Tabla 2-10** se presentan los resultados de evaluación de tecnologías de cribado aplicables al proyecto.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Tabla 2-10
Matriz de evaluación – Tecnologías de cribado

Criterio de evaluación	Factor de ponderación (1-10)	Rejas de barra fija - rastrillo operado por cable		Sistema de criba - rastrillo mecánico operado por cadena	
		Puntaje asignado (1-5)	Puntaje ponderado	Puntaje asignado (1-5)	Puntaje ponderado
Eficiencia	8,0	3,0	24,0	4,0	32,0
Confiabilidad	10,0	3,0	30,0	3,0	30,0
Facilidad de instalación y remoción	6,0	4,0	24,0	2,0	12,0
Facilidad de mantenimiento	8,0	4,0	32,0	2,0	16,0
Requerimientos de espacio	10,0	4,0	40,0	2,0	20,0
Requerimientos de energía	10,0	3,0	30,0	3,0	30,0
Adaptabilidad a requerimientos futuros	4,0	3,0	12,0	3,0	12,0
Aspectos ambientales	8,0	4,0	32,0	2,0	16,0
Seguridad de los operadores	10,0	5,0	50,0	3,0	30,0
Costo de equipo	10,0	4,0	40,0	3,0	30,0
Costo de operación y mantenimiento	8,0	4,0	32,0	3,0	24,0
Puntaje Ponderado Total			346,0	252,0	

De acuerdo con lo anterior, para el bombeo de las aguas residuales afluentes a la EBAR Canoas se selecciona la tecnología de “Bombas centrífugas de pozo seco de eje vertical”. De la misma manera, para el cribado grueso se selecciona la tecnología de “Rejas de barra fija con rastrillo limpiador operado por cable”.

A continuación se presenta un resumen de las conclusiones principales que soportan la evaluación y selección (ítems que generan diferencia):

- Tecnología de bombeo: Bombas centrífugas de pozo seco de eje vertical
 - Mayor eficiencia y confiabilidad
 - Accesibilidad para mantenimiento en sitio sin tener que remover unidades
 - Menor requerimiento de unidades y espacio

- Tecnología de cribado: Rejas de barra fija con rastrillo limpiador operado por cable
 - Accesibilidad para mantenimiento de equipos electromecánicos (en superficie)
 - No requiere de estructuras intermedias para acopio de material (extracción a superficie en un solo movimiento)

3. Identificación y comparación de alternativas de bombeo y cribado

Con base en las tecnologías seleccionadas en la sección anterior para los procesos de cribado y bombeo, esta sección tiene como objetivo el definir el esquema general de los pozos o estructuras que alojarán dichas tecnologías. Las tecnologías seleccionadas son: 1) rejas verticales de cribado grueso con rastrillo limpiador con descarga a nivel de la superficie del terreno, y 2) bombas centrífugas de pozo seco de eje vertical. En esta sección del informe se identifican diferentes alternativas de esquemas de pozos de cribado y bombeo, las cuales serán comparadas identificando méritos y desventajas así como a través de una estimación general del costo de construcción. La comparación de alternativas resultará en la selección de una alternativa recomendada. En la siguiente sección de este informe, la alternativa recomendada será dimensionada con mayor definición y será sujeta a un ejercicio de modelación de CFD con el fin de identificar posibles áreas problemáticas en la configuración de pozos seleccionada.

3.1 Identificación de alternativas

Partiendo de adaptaciones de propuestas realizadas en estudios anteriores, así como con base en proyectos de estaciones de bombeo de características similares, se han identificado cuatro alternativas de esquemas de pozos de cribado y bombeo. Las alternativas identificadas son:

- Cribado en los interceptores afluentes – Esta alternativa se refiere a la implementación de sistemas de cribado aguas arriba del sitio de la EBAR Canoas, específicamente en los interceptores afluentes principales al Interceptor Tunjuelo-Canoas, asociados con los pozos ITC-1, ITC-8 e ITC-10. El análisis de esta alternativa se presenta en el aparte 3.2.
- Dos pozos sin derivación – Esta alternativa se refiere a la implementación de dos pozos independientes, uno para cribado y otro para bombeo, ambos construidos directamente sobre el túnel del Interceptor Tunjuelo-Canoas en el sitio identificado para la EBAR Canoas. Al estar ambos pozos construidos sobre el interceptor, no es necesaria una estructura de derivación de caudal pues la separación de caudales (hacia el bombeo o hacia el túnel de emergencia) ocurre dentro de las mismas estructuras. El análisis de esta alternativa se presenta en el aparte 3.3.
- Dos pozos con derivación – Esta alternativa se refiere a la implementación de dos pozos independientes, uno para cribado y otro para bombeo, ambos construidos en el sitio identificado para la EBAR Canoas. El pozo de cribado se propone construido directamente sobre el túnel del Interceptor Tunjuelo-Canoas y alojando además un sistema de derivación de caudal hacia el pozo de bombeo o hacia el túnel de emergencia. El pozo de bombeo se propone construido a un costado del interceptor. El análisis de esta alternativa se presenta en el aparte 3.4.
- Pozo único – Esta alternativa se refiere a la implementación de los procesos de cribado y bombeo dentro de un pozo único, construido directamente sobre el túnel del Interceptor Tunjuelo-Canoas en el sitio identificado para la EBAR Canoas. Al estar el pozo construido sobre el interceptor, no es necesaria una estructura de derivación de caudal pues la separación de caudales (hacia el bombeo o hacia el túnel de emergencia) ocurre dentro de la misma estructura. El análisis de esta alternativa se presenta en el aparte 3.5.

Con excepción de la primera alternativa (cribado en los interceptores afluentes), las otras alternativas se centran en pozos ubicados directamente en el sitio destinado para la EBAR Canoas. Para el análisis comparativo de estas alternativas, se toman en cuenta las tecnologías de cribado y bombeo anteriormente seleccionadas, las cuales son las mismas para cada alternativa. Las rejas y las bombas preliminarmente

Producto 2: Alternativas de Diseño

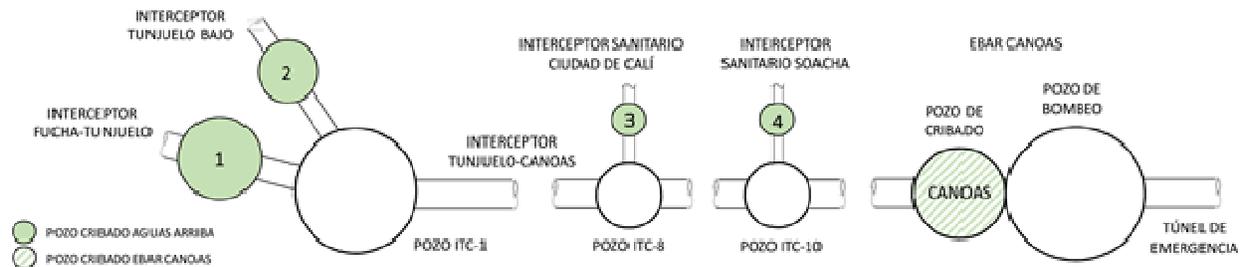
dimensionadas como se presentó en la sección 2 del informe, conforman la base para la determinación general de las dimensiones internas de los pozos considerados en cada alternativa. Con respecto a la profundidad de los diferentes pozos se considera una misma profundidad de 40 m para todos ellos. Esta profundidad corresponde a 35 m de profundidad de la solera del túnel más una profundidad adicional de excavación estimada en aproximadamente 5 m. Esta consideración se realiza con el fin de facilitar la comparación relativa entre alternativas. Mayor certeza en la definición de la profundidad de cada pozo no se considera necesaria para el propósito de este análisis comparativo.

3.2 Cribado en los interceptores afluentes

El propósito de esta alternativa es evaluar la conveniencia de construir y operar estaciones de cribado múltiples en los interceptores afluentes al interceptor Tunjuelo-Canoas (interceptores Fucha-Tunjuelo, Tunjuelo Bajo, Ciudad de Cali y Soacha), versus la operación única en el sitio de la EBAR Canoas. En la **Figura 3-1** se presenta un esquema ilustrativo de las opciones descritas.

Figura 3-1

Esquema ilustrativo: Estaciones de cribado múltiples –vs- operación única en sitio de la EBAR Canoas (Fuente: Consultor)



Los dos afluentes principales al Interceptor Tunjuelo-Canoas son el Interceptor Fucha-Tunjuelo, que recolecta las aguas residuales de las cuencas sanitarias de Fucha y Tintal, y el Interceptor Tunjuelo Bajo, que recolecta lo correspondiente a la cuenca sanitaria del río Tunjuelo. Una vez puestos en operación, estos dos interceptores contribuirán con un caudal medio de aguas residuales equivalente a dos terceras partes de la producción total de la ciudad de Bogotá. Estos interceptores confluyen en el pozo ITC-1, que a su vez se constituye como el pozo inicial del Interceptor Tunjuelo-Canoas. Desde este punto hasta el sitio previsto para la EBAR Canoas, las aguas transitan una distancia superior a 8 km a lo largo del interceptor. En puntos intermedios se prevé la descarga de los Interceptores Ciudad de Cali y Soacha, en los pozos ITC-8 e ITC-10 respectivamente, que a futuro recolectarán la totalidad de afluencias del municipio de Soacha.

Es necesario tener en cuenta que los pozos ITC-1, ITC-8 e ITC-10 existentes fueron dimensionados como pozos de inspección/interconexión y no cuentan con el espacio requerido para alojar sistemas de cribado definitivos, razón por la cual sería necesario construir estructuras nuevas para dichos sistemas.

En el párrafo anterior se describen las entradas principales al Interceptor Tunjuelo-Canoas (entradas oficiales). Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la gran mayoría del trazado del interceptor se

Producto 2: Alternativas de Diseño

localiza en predios rurales privados, con nueve (9) pozos de acceso/ventilación en el trayecto, por lo cual es indispensable prever posibles ingresos “irregulares” de material, producto de estos puntos de acceso, ya que resulta prácticamente inviable garantizar un control total sobre los mismos. De acuerdo con esto, independientemente de las opciones de cribado aguas arriba (en las entradas principales), se debe prever un cribado inmediatamente aguas arriba de la estación de bombeo, para cumplir con el objetivo primordial de protección de las bombas. Por razones como estas, y por cualquier otra eventualidad que pueda ocurrir a lo largo del interceptor (como por ejemplo desprendimientos de concreto por deterioro de las paredes del túnel), la instalación de cribado grueso inmediatamente aguas arriba de las unidades de bombeo es una práctica común de ingeniería en el diseño de estaciones de bombeo de aguas residuales, como se puede apreciar en los ejemplos de proyectos internacionales presentados anteriormente y como es el caso en la mayoría, sino en todas, las estaciones de bombeo alrededor del mundo.

Bajo la anterior premisa, en términos de costos de inversión inicial, es evidente que al requerir en ambos casos de la infraestructura de cribado en el sitio de la estación de bombeo, la alternativa de múltiples estaciones de cribado aguas arriba no resulta favorable, versus la operación centralizada en sitio.

Ignorando por el momento los posibles ingresos "irregulares" de material indicados anteriormente y cualquier otra eventualidad a lo largo del interceptor, se entiende que al contar con sistemas de cribado múltiples, en los sitios propuestos aguas arriba, el material grueso que llegaría al sistema de cribado en la EBAR Canoas sería menor. Sin embargo, esta ventaja viene asociada con otras complejidades adicionales (relacionadas principalmente con la operación integral del sistema) que son las que justamente han llevado a la práctica común de diseño de optar por instalaciones centralizadas en lugar de instalaciones aisladas. Con el objetivo de abordar el análisis de manera integral, en la **Tabla 3-1** se plantea una evaluación comparativa desde otros puntos de vista, mayormente relacionados con la operación.

Tabla 3-1

Estaciones de cribado múltiples –vs- operación única en sitio de la EBAR Canoas

Criterio	Estaciones de cribado múltiples	Operación única en sitio
Energía	<ul style="list-style-type: none"> - La profundidad de extracción del material cribado en los interceptores afluentes es menor, por lo cual se puede esperar un consumo de energía menor por cantidad extraída (Profundidad en ITC 1 = 18 m). - Al localizarse en predios rurales, se requiere de estudios de interconexión eléctrica para cada uno de los sitios, construcción de líneas de conexión y subestaciones eléctricas en cada uno. 	<ul style="list-style-type: none"> - El material cribado debe extraerse desde una profundidad mayor, por lo que puede esperarse un consumo mayor por la cantidad extraída (Profundidad en Canoas = 40 m). - Se cuenta con estudio de interconexión para la PTAR Canoas, a partir de la cual se deriva el suministro para el sitio de la EBAR Canoas. Se aprovecha la infraestructura de transmisión y la subestación eléctrica prevista para la EBAR

Producto 2: Alternativas de Diseño

Criterio	Estaciones de cribado múltiples	Operación única en sitio
Transporte del material ⁽¹⁾	<ul style="list-style-type: none"> - La mayor parte del material debe ser transportada desde el pozo ITC 1 a una distancia de 21 km - Se requiere logística de acopio y acarreo en cada uno de los sitios (vehículos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Transporte de la totalidad del material desde predio Canoas a una distancia de 11 km - Se requiere un único punto de acopio y acarreo. En el futuro se puede aprovechar la logística de acopio y acarreo de la PTAR Canoas, ya que es común integrar la disposición de residuos de cribado medio y fino (una vez procesados), con los del cribado grueso
Administración	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere proveer personal y servicios para cada uno de los sitios 	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere de una sola estructura de personal e instalaciones
Predios	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere realizar estudio y posible compra de predios para cada una de las instalaciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Se dispone del predio Canoas, incluyendo el sector previsto para la estación de bombeo
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere realizar mantenimiento a equipos electromecánicos en cada uno de los sitios 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento centralizado en un solo lugar

(1) Se prevé que el sitio de disposición para el material cribado será en relleno sanitario en sector de Mondoñedo. Las distancias de acarreo se calculan suponiendo este sitio de disposición final.

De lo anterior, se evidencia la conveniencia de mantener un cribado centralizado en el sitio de la EBAR Canoas. Consecuentemente, las alternativas a analizar en adelante se enfocan en diferentes configuraciones en el sitio destinado para la estación de bombeo, a partir de las cuales se seleccionará la de mejor calificación, para llevar a la fase de diseño básico.

3.3 Dos pozos sin derivación

En esta alternativa se plantea un esquema compuesto por dos pozos circulares independientes, el pozo de cribado y el pozo de bombeo, los cuales se construyen de manera contigua y directamente sobre el interceptor como se muestra en el plano ilustrativo de la **Figura 3-2**. El primer pozo, o pozo de cribado, tiene un diámetro interno de 20 m y en éste van ubicadas las rejillas para retención de sólidos que permiten proteger las unidades de bombeo. El segundo pozo, o pozo de bombeo, tiene un diámetro interno de 32 m y en éste van ubicadas las unidades de bombeo con su respectiva cámara de succión. Las cámaras de succión cuentan con un muro vertedero diseñado para permitir el vertimiento de caudales de exceso hacia el túnel de emergencia.

En este esquema de dos pozos sin derivación, el flujo de aguas residuales llega en primera instancia al pozo de cribado en donde pasa a través de las rejillas de remoción de sólidos. A continuación, el flujo de aguas residuales pasa al pozo de bombeo desde donde es bombeado hacia un canal de descarga en la superficie del terreno. En el caso de que las bombas estén fuera de servicio, el nivel del agua en la cámara de succión asciende hasta sobrepasar el nivel del muro vertedero y permitir el drenaje de caudales hacia un canal contiguo que se conecta al túnel de emergencia.

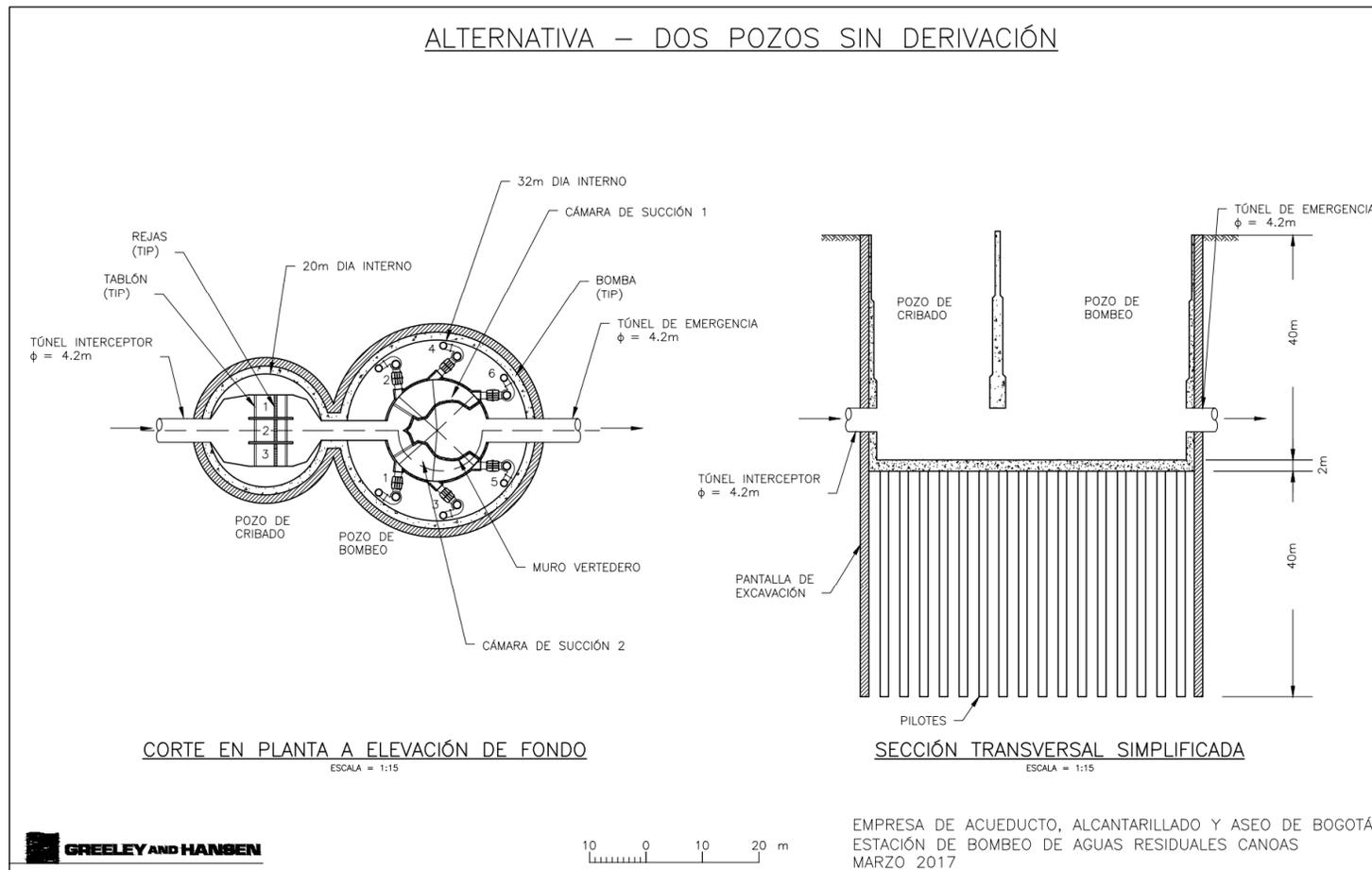
Producto 2: Alternativas de Diseño

3.3.1 Consideraciones hidráulicas

Como se puede apreciar en la **Figura 3-2**, los caudales en el interceptor pasan a través de tres canales en el pozo de cribado, provistos con rejillas para la remoción de sólidos, y son conducidos luego hacia dos cámaras de succión en el pozo de bombeo, alimentando a seis bombas centrífugas de pozo seco de eje vertical (tres bombas por cada cámara de succión). Con el propósito de aislar las bombas de las cámaras de succión para inspección y mantenimiento, cada unidad de bombeo incluye una válvula de aislamiento. El número de bombas en operación varía de acuerdo a la variación de caudal en el interceptor. Para inspecciones periódicas de mantenimiento del pozo de bombeo, se cuenta con la posibilidad de aislar cada

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 3-2
Plano ilustrativo – Alternativa de dos pozos sin derivación (Fuente: Consultor)



Producto 2: Alternativas de Diseño

cámara de succión durante periodos de caudal bajo. Para este fin se dispone de compuertas o tablonces de separación instalados en el canal de entrada al pozo de bombeo.

El esquema de dos pozos sin derivación plantea los pozos de cribado y bombeo alineados con el trazado del interceptor, lo cual ofrece ventajas de eficiencia hidráulica al permitir el paso de caudales sin drásticos cambios de dirección a través de las rejas del pozo de cribado y luego a través de las cámaras de succión en el pozo de bombeo, así como a lo largo de la descarga hacia el túnel de emergencia. En el pozo de bombeo, el caudal se divide a lo largo de dos cámaras de succión. Cada cámara de succión alimenta tres unidades de bombeo provistas con velocidad variable para responder a las variaciones de caudal en el interceptor. El proceso de bombeo cuenta con sistemas de control para regular el nivel de agua al interior de las cámaras de succión.

Cada cámara de succión cuenta con un muro vertedero que la separa de un canal que se conecta con el túnel de emergencia a la salida del pozo de bombeo. En el caso de que las bombas no se encuentren en operación, el nivel de agua en la cámara de succión ascendería hasta sobrepasar el tope del muro vertedero permitiendo el paso del flujo de agua hacia el canal que descarga hacia el túnel de emergencia. Este sistema de drenaje de caudales hacia el túnel de emergencia es un sistema “pasivo”, es decir que no requiere de la necesidad de abrir compuertas mecánicas para permitir el paso de caudales hacia el túnel de emergencia. Además, el muro vertedero sería diseñado con una longitud extendida con la finalidad de minimizar el ascenso del nivel del agua en el túnel interceptor durante condiciones de caudal alto.

3.3.2 Consideraciones geotécnicas

Durante la exploración del subsuelo se encontraron en el sitio del proyecto arcillas de alta plasticidad y, de acuerdo a la evaluación de susceptibilidad a la expansión, éstas presentan una susceptibilidad alta. Sin embargo, en la mayoría de los casos, estos suelos se encuentran generalmente por debajo de las cotas medidas del nivel freático, por lo que no representarían una amenaza considerable a las estructuras en las zonas donde estos suelos se encuentren saturados. Es importante mencionar que dadas las dimensiones de la excavación sobre estos suelos blandos hacen que sea esta una excavación compleja la cual requiere de un diseño del proceso constructivo muy cuidadoso, específico y detallado.

De la evaluación realizada a la alternativa “dos pozos sin derivación”, se observó que al encontrarse pozos independientes, las condiciones de excavación previstas para la construcción de los pozos se podrá realizar de una forma aislada y con menos problemas asociados a la verticalidad en la construcción tanto de juntas entre pantallas o pilas, así como, la facilidad de implementar varios frentes de trabajo simultáneamente.

Para la evaluación de alternativas de fundación se consideró el efecto del equilibrio de esfuerzos que imprime la sección circular, por esta razón, no se están considerando puntales para controlar las deformaciones laterales; en este orden de ideas, el fenómeno que se vuelve más crítico es la falla de fondo, es así como se debe construir una pantalla lateral que evite que se levante el fondo de la excavación a medida que se avanza la excavación. Además, se debe evaluar la posibilidad de hacer un mejoramiento previo mediante la construcción de pilotes de grava y cal que alivien las subpresiones y mejoren el terreno.

Una vez descrita la complejidad de la obra es necesario controlar el proceso mediante instrumentación. Se deben instalar inclinómetros y piezómetros alrededor de la excavación para medir constantemente las

Producto 2: Alternativas de Diseño

deformaciones laterales y los niveles piezométricos. Los inclinómetros deben quedar dentro del estrato de arenisca ubicado entre los 50 y 60 m de profundidad.

De acuerdo a las condiciones geotécnicas del sitio, se espera que sea necesario realizar estabilización de las paredes de excavación independientemente del proceso constructivo, esto mediante el uso de lodos o polímeros.

Se deberá estudiar a nivel de detalle la extensión de la pantalla o pilas al túnel, esto previendo que se puede alterar la sección de túnel o no, se podrá evaluar posteriormente realizar una junta sobre los contactos de la pantalla para evitar que la subpresión genere afectación global sobre el túnel.

3.3.3 Consideraciones estructurales

En lo que a estructuración se refiere, de acuerdo con la configuración de los pozos, es posible diferenciar tres sistemas principales para la estructura de los mismos:

- Sistema de contención.
- Sistema de revestimiento interior.
- Sistema de fondo.

El sistema de contención, dadas las características del terreno, prevé realizarse mediante la construcción de una pantalla de concreto con espesor constante en su altura, la cual se dispone en todo el contorno del pozo de cribado y del pozo de bombeo. Este sistema, es el encargado de resistir temporalmente los empujes del terreno debidos al suelo y al nivel de agua freática durante el proceso de excavación; el cual se realizará por franjas de arriba hacia abajo hasta llegar al fondo. Por lo tanto el sistema de contención es el encargado de estabilizar el suelo en el frente de excavación, a medida que se va completando la capacidad de la estructura con el revestimiento interior y la losa de fondo para la condición final de excavación completa del pozo.

El sistema completo comprende la disposición del sistema de contención hasta una profundidad total de unos 80 m, de los cuales los 40 metros iniciales serán excavados al interior y generarán el espacio necesario para la operación del bombeo, hasta esta profundidad se dispone de los anillos del revestimiento interior y en el fondo se ubicará la losa y sus respectivas pilas que tendrán una longitud de 40 m.

Para la evaluación estructural de las pantallas, se adopta el esquema de pantallas continuas, la cual se considera viable a la luz de las posibilidades técnicas de construcción existentes en el mercado local.

Los empujes estáticos del suelo se obtienen con base en la caracterización del suelo, los parámetros geotécnicos según cada estrato y el procedimiento constructivo asociado al método y secuencia de excavación. Cabe anotar que para esta fase del diseño no se han considerado empujes dinámicos desarrollados por el terreno durante un evento sísmico, aspecto que se tendrá en consideración durante la etapa de diseño de la alternativa que sea seleccionada.

El sistema de revestimiento interior, se proyecta mediante un muro interior de espesor variable en altura, el cual actúa como soporte para la pantalla perimetral de contención durante el avance de la excavación del recinto de los pozos, gracias a desarrollar circunferencialmente la acción de anillo, permitiendo así compensar los empujes finales del suelo.

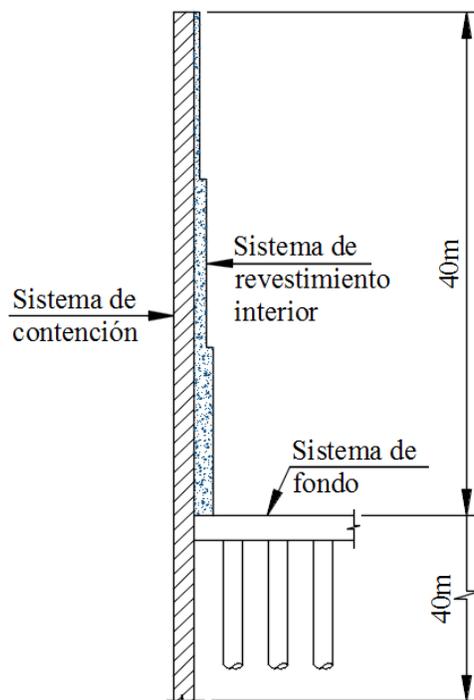
Producto 2: Alternativas de Diseño

Con el trabajo conjunto de la pantalla de contención y del muro interior, se logra un comportamiento autoportante de la estructura vertical durante la fase de excavación y de puesta en servicio, evitando así la necesidad de disponer elementos estructurales de apuntalamiento al interior de los pozos.

Finalmente, el sistema de fondo de los pozos está constituido por una losa maciza de concreto reforzado con espesor estructural constante, la cual cubre todo el fondo y sobre la que nace el muro interior de revestimiento. Esta losa tiene como función estructural, resistir los efectos de la sub-presión generada por la cabeza de presión hidrostática contada a partir del nivel de agua freática. Esta presión se localiza en la cara inferior de la losa y genera un efecto de flotabilidad global de la estructura, lo cual hace necesario el que se dispongan elementos que anclen la estructura al terreno. Estos elementos se prevén mediante pilotes de concreto reforzado desarrollando fuerzas de rozamiento en su perímetro para contrarrestar el efecto de la subpresión que actúa bajo la losa.

En la **Figura 3-3**, **Figura 3-4** y **Figura 3-5** se ilustran la disposición de los sistemas anteriormente descritos y su mecanismo de funcionamiento estructural, respectivamente.

Figura 3-3
Disposición sistema estructural para pozos (Fuente: Consultor)



Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 3-4

Fuerzas actuantes y desarrolladas en el sistema de pantalla y el de muro interior (Fuente: Consultor)

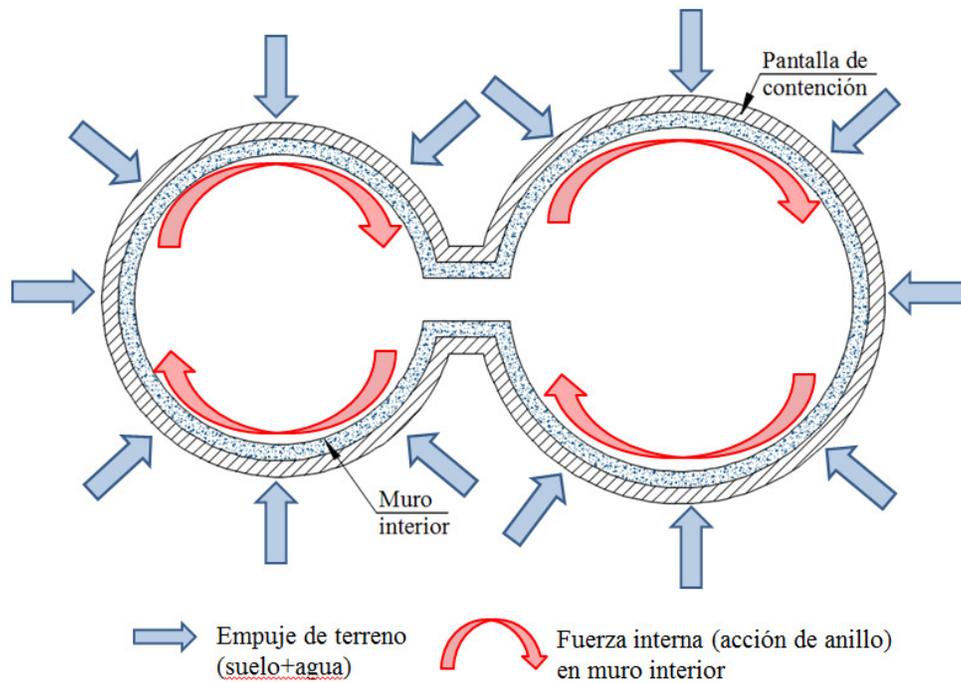
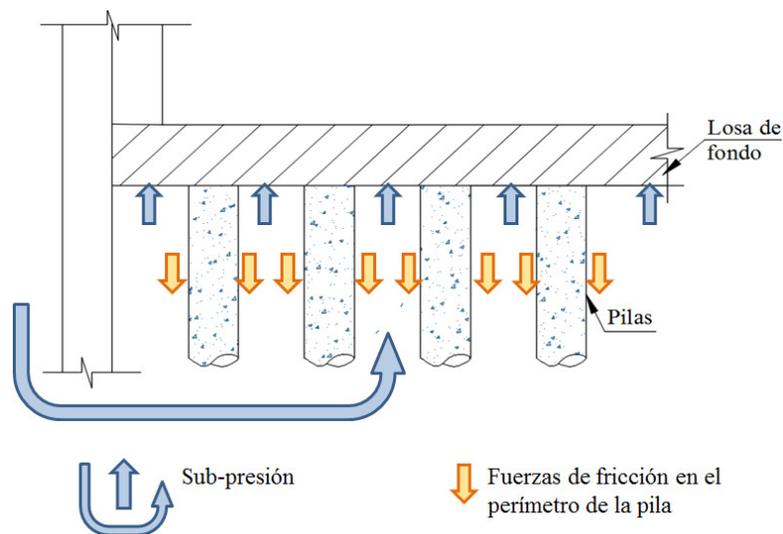


Figura 3-5

Fuerzas actuantes y desarrolladas en el sistema de fondo de pozo (Fuente: Consultor)



Producto 2: Alternativas de Diseño

En la **Figura 3-6** y en la **Tabla 3-2**, se indican los resultados obtenidos para los espesores de muro de contención para la opción de pantalla continua y para los anillos del muro interior.

Figura 3-6

Distribución y parametrización de espesores en pantalla de contención y muro interior

(Fuente: Consultor)

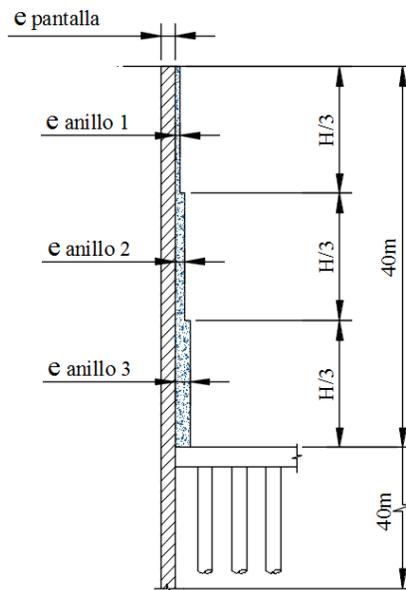


Tabla 3-2

Espesores de pantalla y muro interior. Alternativa de dos pozos sin derivación

Parámetro	Pantalla de contención	Muro interior
Pozo de cribado, diámetro interior = 20 m		
Espesor (m)	1,50	(e anillo1/ e anillo2 / e anillo3) 0,40 / 0,80 / 1,30
Profundidad (m)	80,00	40,00
Pozo de bombeo, diámetro interior = 32 m		
Espesor (m)	1,50	(e anillo1/ e anillo2 / e anillo3) 0,50 / 0,90 / 1,40
Profundidad (m)	80,00	40,00

Producto 2: Alternativas de Diseño

De igual manera, en la **Figura 3-7** y en la **Tabla 3-3** se indican las dimensiones obtenidas para la estructura de fondo, que aplican tanto para el pozo de cribado como para el pozo de bombeo.

Figura 3-7
Esquema de dimensiones para estructura de fondo (Fuente: Consultor)

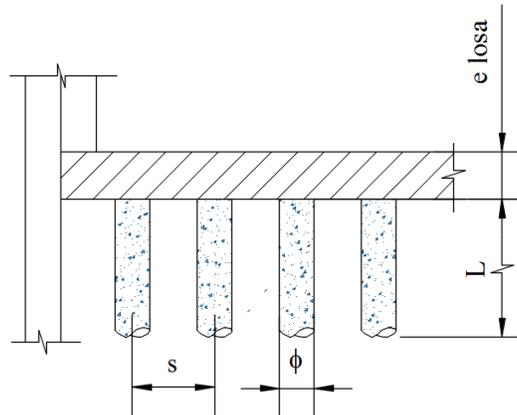


Tabla 3-3
Dimensiones de elementos para losa de fondo y pilas. Válido para todas las alternativas

Parámetro	Valor
Losa de fondo	
e (m)	2,00
Pilas de cimentación	
φ (m)	1,50
S (m)	3,50
L (m)	40,00

3.3.4 Consideraciones de procedimientos constructivos

Para el desarrollo de las excavaciones propuestas, es importante destacar que el dimensionamiento y profundidad de los pozos hacen que este tipo de obra sea de carácter complejo, es decir dadas las condiciones geotécnicas del sitio y la profundidad de las excavaciones implican riesgos asociados tanto a empujes, localización del nivel freático, excavabilidad del material e incertidumbre entre los contactos suelo-roca meteorizada.

El sistema constructivo de pantalla continua excavada con hidrofresadora, que se considera viable para realizar la excavación del sistema de contención para la alternativa mencionada, consiste básicamente en introducir en una zanja una fresadora que consta de dos ruedas dentadas que girando en sentidos opuestos,

Producto 2: Alternativas de Diseño

trituran el material y éste en suspensión sobre lodos, es aspirado por un conducto central hasta llevarlo a una estación de recuperación y tratamiento de lodos. Para mantener estabilizada la excavación se utilizan soluciones de bentonita o polímeros para evitar el derrumbe interno de las paredes hasta que se introduce el armado y se vacía el concreto.

Los equipos de hidrofresa, por lo general alcanzan rendimientos entre 50-60 m³/día, que se pueden incrementar mediante un trabajo mixto entre hidrofresadora y equipos mecánicos.

3.3.5 Consideraciones de operación y acceso

El esquema de dos pozos sin derivación permite la separación de los dos procesos principales de cribado y bombeo, lo cual ofrece la ventaja de una operación independiente para cada proceso. Con el sistema de rejas verticales de cribado con rastrillo limpiador con descarga a nivel de la superficie del terreno, no se hace necesario la instalación de escaleras de acceso hacia el nivel de las rejas dentro del pozo de cribado. Sin embargo, es necesario contar con un sistema de puente grúa externo a nivel de la superficie con acceso hasta el nivel de las rejas por cualquier eventualidad de servicio no rutinario.

El pozo de bombeo requiere de escaleras de acceso hasta el nivel inferior para permitir el acceso de personal de operación y mantenimiento. Asimismo, es necesario contar con un sistema de puente grúa externo a nivel de la superficie que permita la instalación, remoción y el mantenimiento del equipo dentro del pozo de bombeo. Se prevé que el pozo de bombeo requiera de un sistema de ventilación positiva así como iluminación en los niveles inferiores del pozo.

3.3.6 Estimado general de costo de construcción

En este caso se asume una profundidad general para los dos pozos de 80 m para el sistema de contención, 40 m para el sistema de revestimiento interior y 40 m para la cimentación del sistema de fondo. El costo estimado corresponde solamente a la obra civil básica de los pozos, con base en volúmenes aproximados de excavación, volúmenes de concreto y de cuantía de refuerzo en pantallas, muros interiores y estructura de fondo.

Cabe indicar que en esta valoración, no se incluyen los componentes estructurales al interior de los pozos tales como muros de separación, muros de vertedero, etc.

De acuerdo con lo anterior, el costo de construcción de los pozos para la alternativa en cuestión es de COP \$ 72.600 millones.

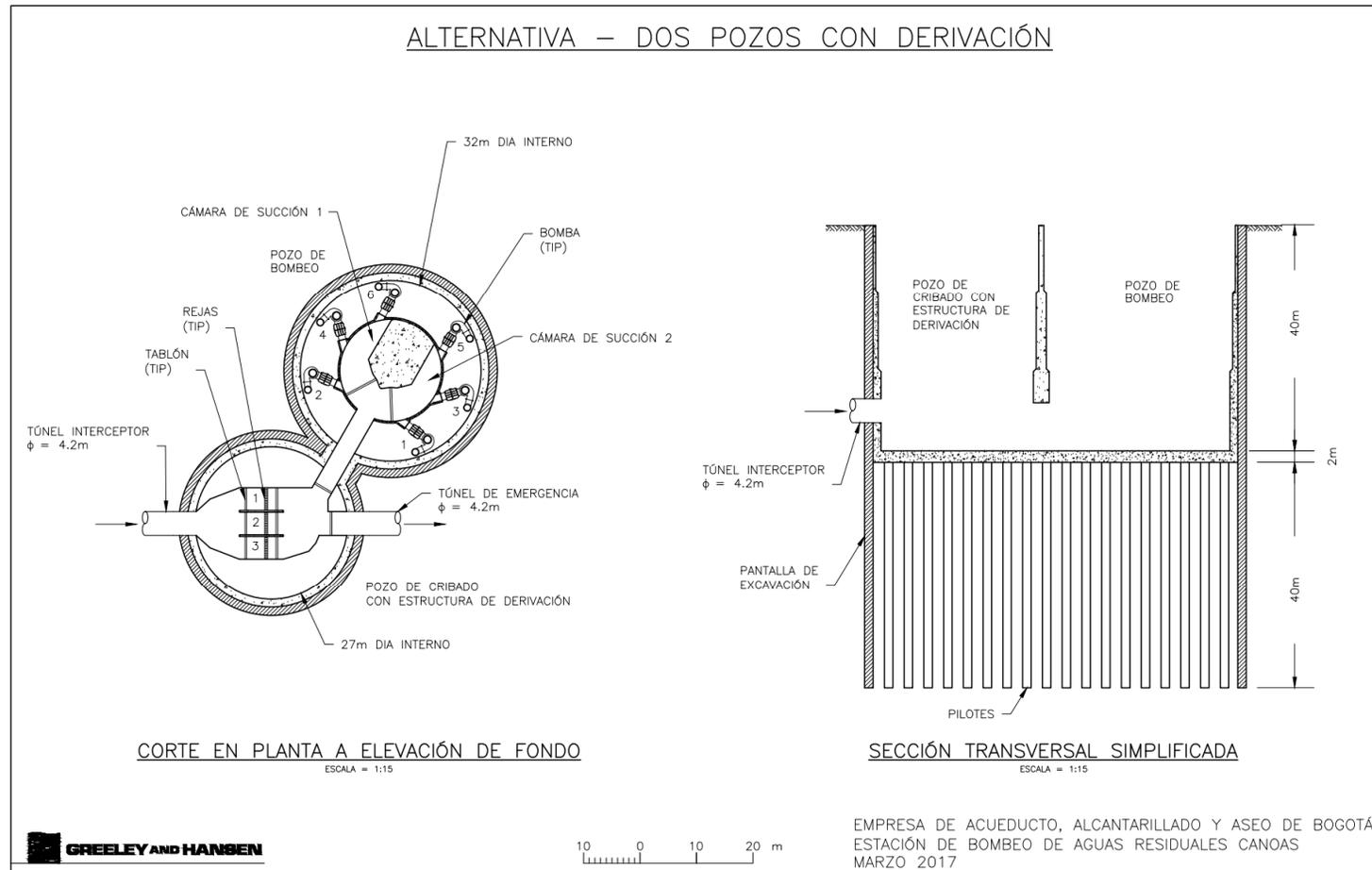
3.4 Dos pozos con derivación

En esta alternativa se plantea un esquema compuesto por dos pozos circulares independientes, el pozo de cribado y el pozo de bombeo, los cuales se plantean contiguos como se muestra en el plano ilustrativo de la **Figura 3-8**. El primer pozo, o pozo de cribado, se construye directamente sobre el interceptor y tiene un diámetro interno de 27 m y en éste van ubicadas las rejas para retención de sólidos así como una estructura de derivación de caudal que permite desviar el agua hacia el pozo de bombeo o continuar su recorrido hacia el túnel de emergencia. El segundo pozo, o pozo de bombeo, se ubica a un costado del

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 3-8

Plano ilustrativo – Alternativa de dos pozos con derivación (Fuente: Consultor)



Producto 2: Alternativas de Diseño

interceptor y tiene un diámetro interno de 32 m. En este pozo van ubicadas las unidades de bombeo con su respectiva cámara de succión.

En este esquema de dos pozos con derivación, el flujo de aguas residuales llega en primera instancia al pozo de cribado en donde pasa a través de las rejillas de remoción de sólidos y luego pasa a la estructura de derivación. En la estructura de derivación, la figura muestra el uso de compuertas para permitir el flujo del agua ya sea hacia el pozo de bombeo o hacia el túnel de emergencia. El flujo de aguas residuales que llega al pozo de bombeo es bombeado hacia un canal de descarga en la superficie del terreno. En el caso de que las bombas estén fuera de servicio, la compuerta en la estructura de derivación que tiene la función de permitir el paso del caudal hacia el túnel de emergencia deberá permanecer totalmente abierta.

3.4.1 Consideraciones hidráulicas

Como se puede apreciar en la **Figura 3-8**, el esquema de dos pozos con derivación consiste en la separación de caudales hacia el pozo de bombeo y hacia el túnel de emergencia. Después de su paso por las rejillas para la remoción de sólidos en el pozo de cribado, el caudal es desviado hacia el pozo de bombeo a través de un canal orientado en un ángulo de aproximadamente 60° con respecto a la dirección del flujo en el interceptor. En el pozo de bombeo el caudal llega a dos cámaras de succión, de manera similar al esquema de dos pozos sin derivación. En este caso, sin embargo, no se requiere de un muro vertedero pues el paso de caudales hacia el túnel de emergencia ocurre dentro de la estructura del pozo de cribado.

Dos opciones se pueden considerar para el drenaje de caudales hacia el túnel de emergencia. Una opción consiste en la instalación de una compuerta de derivación y otra opción consiste en la adaptación de un salto hidráulico en el pozo de cribado. La opción de la compuerta de derivación requiere el abrir la compuerta para permitir el drenaje hacia el túnel de emergencia y el cerrar la misma durante condiciones normales de bombeo de caudales. Las compuertas de esta magnitud son normalmente de acción lenta y pueden tomar como 30 minutos para abrir y cerrar completamente (15 minutos en abrir y 15 minutos en cerrar). Por lo tanto, durante el tiempo que toma abrir completamente la compuerta, existe la posibilidad de que el túnel principal entre en carga, así como también el pozo de cribado y el área aledaña de bombeo. Además, puede darse la posibilidad de que la compuerta no responda de manera inmediata a los mandos de control debido a problemas mecánicos o pérdida de energía. En consecuencia, el sistema de compuerta de derivación puede presentar problemas de respuesta oportuna durante condiciones de emergencia.

La opción del salto hidráulico consiste en proveer una cámara en el pozo de cribado con una cota de fondo estimada en aproximadamente 4-5 m por debajo de la cota de bodega del túnel principal. En esta cámara se encontrarían ubicadas las rejillas para remoción de sólidos. Manteniendo el nivel del agua en la cámara por debajo de la elevación de bodega del túnel de emergencia, el caudal pasaría a través de las rejillas y sería desviado hacia el pozo de bombeo en donde las bombas se encargarían de regular el nivel de agua. En el caso de una eventualidad en la que las bombas dejen de operar, el nivel del agua ascendería en las cámaras de succión del pozo de bombeo y, consecuentemente, también en el pozo de cribado, permitiendo finalmente el vertimiento de caudales hacia el túnel de emergencia. Si bien esta opción provee un drenaje “pasivo” de caudales hacia el túnel de emergencia (es decir que su funcionamiento no requiere de la necesidad de abrir una compuerta), en cambio requiere de una mayor profundidad tanto del pozo de cribado como del pozo de bombeo (esto en comparación con la opción de la compuerta de derivación así como en comparación con la alternativa de dos pozos sin derivación y la alternativa de pozo único).

Producto 2: Alternativas de Diseño

3.4.2 Consideraciones geotécnicas

Las consideraciones geotécnicas para esta alternativa son similares a las presentadas para la alternativa de “Dos pozos sin derivación” (véase numeral 3.3.2), teniendo en cuenta que las condiciones del terreno son las mismas y las dimensiones de las excavaciones son comparables.

3.4.3 Consideraciones estructurales

Para esta alternativa, se cumplen los mismos criterios de definición del sistema estructural y de su mecanismo de respuesta, así como las hipótesis de empujes y presiones sobre la estructura; considerados en la anterior alternativa (dos pozos sin derivación), con ligeras variaciones en las dimensiones de los elementos estructurales (pantalla de contención, muros y losa de fondo), dada la diferencia en el diámetro del pozo de cribado.

A continuación y con base en la nomenclatura ilustrada en la **Figura 3-6**, se indican los resultados obtenidos en el pre-dimensionamiento de esta segunda alternativa.

Tabla 3-4
Espesores de pantalla y muro interior. Alternativa de dos pozos con derivación

Parámetro	Pantalla de contención	Muro interior
Pozo de cribado, diámetro interior = 27 m		
Espesor (m)	1,50	(e anillo1/ e anillo2 / e anillo3) 0,50 / 0,90 / 1,40
Profundidad (m)	80,00	40,00
Pozo de bombeo, diámetro interior = 32 m		
Espesor (m)	1,50	(e anillo1/ e anillo2 / e anillo3) 0,50 / 0,90 / 1,40
Profundidad (m)	80,00	40,00

Las dimensiones de la estructura de fondo, se mantienen de la misma manera que para la alternativa anterior (véase **Tabla 3-3**).

3.4.4 Consideraciones de procedimientos constructivos

Dado que el sistema constructivo para los sistemas de contención no depende en este caso de la variación de la alternativa sino que este estará relacionado con las profundidades de excavación y el tipo de material, las consideraciones constructivas son las mismas consideradas para la alternativa anterior.

3.4.5 Consideraciones de operación y acceso

El esquema de dos pozos con derivación permite la separación de los dos procesos principales de cribado y bombeo, lo cual ofrece la ventaja de una operación independiente para cada proceso. Con el sistema de rejas verticales de cribado con rastrillo limpiador con descarga a nivel de la superficie del terreno, no se hace necesario la instalación de escaleras de acceso hacia el nivel de las rejas dentro del pozo de cribado.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Sin embargo, es necesario contar con un sistema de puente grúa externo a nivel de la superficie con acceso hasta el nivel de las rejas por cualquier eventualidad de servicio no rutinario.

El pozo de bombeo requiere de escaleras de acceso hasta el nivel inferior para permitir el acceso de personal de operación y mantenimiento. Asimismo, es necesario contar con un sistema de puente grúa externo a nivel de la superficie que permita la instalación, remoción y el mantenimiento del equipo dentro del pozo de bombeo. Se prevé que el pozo de bombeo requiera de un sistema de ventilación positiva así como iluminación en los niveles inferiores del pozo.

3.4.6 Estimado general de costo de construcción

Al igual que para la alternativa anterior, se asume una profundidad general para los dos pozos de 80 m para el sistema de contención, 40 m para el sistema de revestimiento interior y 40 m para la cimentación del sistema de fondo. El costo estimado corresponde solamente a la obra civil básica de los pozos, con base en volúmenes aproximados de excavación, volúmenes de concreto y de cuantía de refuerzo en pantallas, muros interiores y estructura de fondo.

Cabe indicar que en esta valoración, no se incluyen los componentes estructurales al interior de los pozos tales como muros de separación, muros de vertedero, etc.

En este caso, el costo de construcción de los pozos para la alternativa en cuestión es de COP \$ 83.400 millones.

3.5 Pozo único

En esta alternativa se plantea un esquema compuesto de un pozo único, en el cual se ubican las rejas de cribado así como las unidades de bombeo, construido directamente sobre el interceptor como se muestra en el plano ilustrativo de la **Figura 3-9**. El pozo tiene un diámetro interno de 45 m y cuenta con un muro de separación interno que separa el área de cribado y el área de bombeo. Dentro del área de bombeo van ubicadas las unidades de bombeo con su respectiva cámara de succión. Las cámaras de succión cuentan con un muro vertedero diseñado para permitir el vertimiento de caudales de exceso hacia el túnel de emergencia.

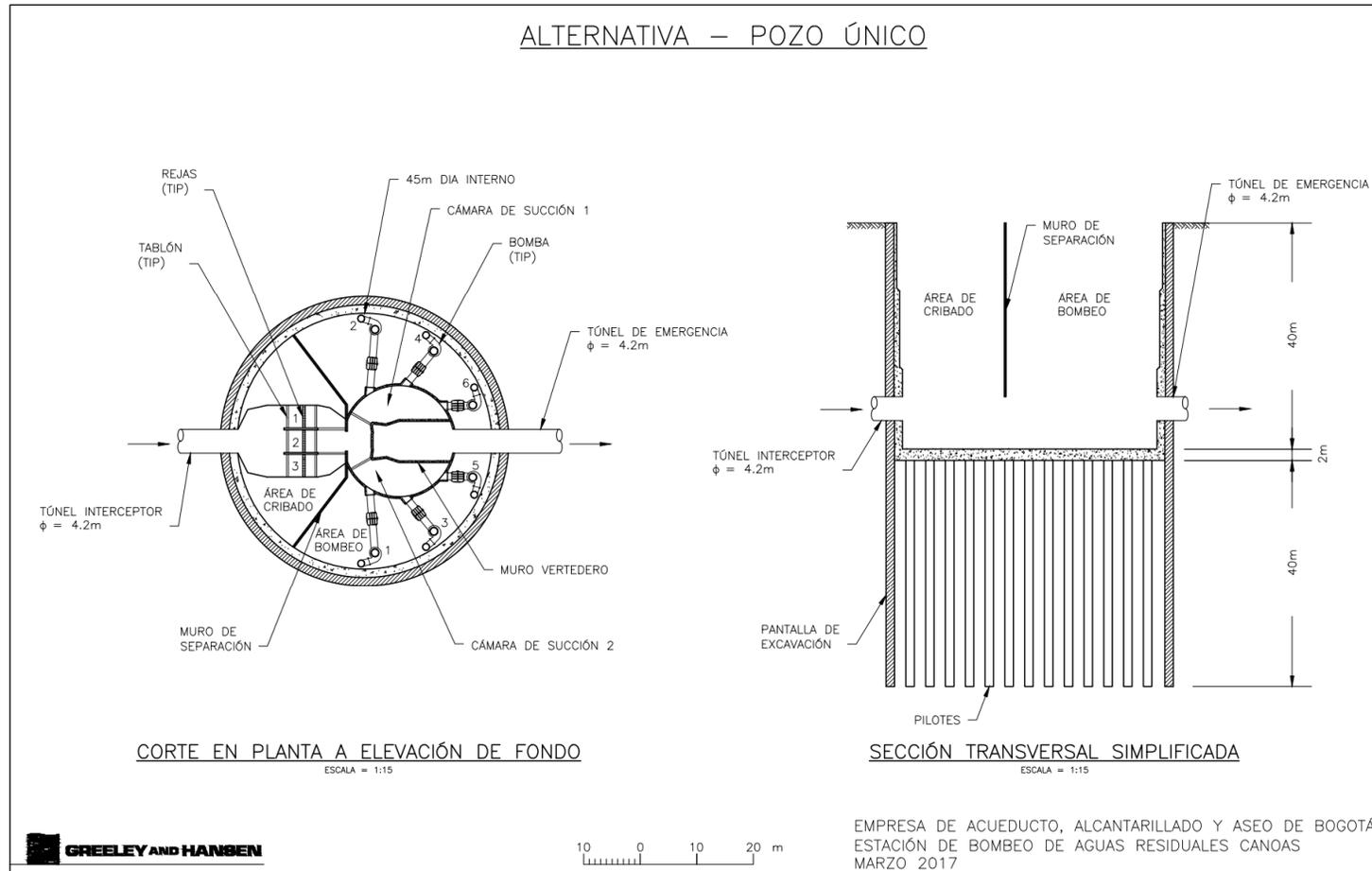
En este esquema de pozo único, el flujo de aguas residuales llega en primera instancia al área de cribado del pozo en donde pasa a través de las rejas de remoción de sólidos. A continuación, el flujo de aguas residuales pasa al área de bombeo desde donde es bombeado hacia un canal de descarga en la superficie del terreno. En el caso de que las bombas estén fuera de servicio, el nivel del agua en la cámara de succión del área de bombeo asciende hasta sobrepasar el nivel de un muro vertedero diseñado para permitir el vertimiento de caudales hacia un canal contiguo que se conecta al túnel de emergencia.

3.5.1 Consideraciones hidráulicas

Como se puede apreciar en la **Figura 3-9**, el esquema de pozo único consiste en un solo pozo en el que se disponen dos áreas internas separadas por un muro divisorio. Estas áreas son el área de cribado seguida del área de bombeo. Luego de su paso a través de tres canales en el área de cribado, provistos con rejas para la remoción de sólidos, el caudal llega a dos cámaras de succión en el área de bombeo, alimentando a

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 3-9
Plano ilustrativo – Alternativa de pozo único (Fuente: Consultor)



Producto 2: Alternativas de Diseño

seis bombas centrífugas de pozo seco de eje vertical (tres bombas por cada cámara de succión), provistas con velocidad variable para responder a las variaciones de caudal en el interceptor. El proceso de bombeo cuenta con sistemas de control para regular el nivel de agua al interior de las cámaras de succión.

Cada cámara de succión cuenta con un muro vertedero que la separa de un canal que se conecta con el túnel de emergencia a la salida del pozo. En el caso de que las bombas estén fuera de servicio, el nivel del agua en las cámaras de succión ascendería hasta sobrepasar el tope del muro vertedero permitiendo el paso del flujo de agua al canal que descarga hacia el túnel de emergencia. Este sistema de drenaje de caudales hacia el túnel de emergencia es un sistema “pasivo”, es decir que no requiere de la necesidad de abrir compuertas para permitir el paso de caudales hacia el túnel de emergencia. Además, el muro vertedero sería diseñado con una longitud extendida con la finalidad de minimizar el ascenso del nivel del agua en el túnel interceptor y evitar que éste entre en carga durante condiciones de caudal alto.

El esquema de pozo único se plantea alineado con el trazado del interceptor, lo cual ofrece ventajas de eficiencia hidráulica al permitir el paso de caudales sin drásticos cambios de dirección a través de las rejas del área de cribado y luego a través de las cámaras de succión en el área de bombeo, así como a lo largo de la descarga hacia el túnel de emergencia.

3.5.2 Consideraciones geotécnicas

En esta alternativa, aunque las condiciones del terreno se mantienen de la misma manera, la diferencia con las alternativas anteriores yace en el diámetro del pozo a excavar. Al considerarse un pozo único de mayores dimensiones, el efecto del equilibrio de esfuerzos que imprime la sección circular es menor que en los casos anteriores. Con un diámetro mayor, las paredes de la excavación empiezan a comportarse similar a un muro rectilíneo, por esta razón, podrían requerirse puntales para controlar las deformaciones laterales, generando una excavación más compleja.

3.5.3 Consideraciones estructurales

Para esta alternativa, se cumplen los mismos criterios de definición del sistema estructural y de su mecanismo de respuesta, así como las hipótesis de empujes y presiones sobre la estructura; considerados en las alternativas anteriores, con variaciones en las dimensiones de los elementos estructurales (pantalla de contención, muros y losa de fondo), dada la diferencia en el diámetro del pozo.

A continuación y con base en la nomenclatura ilustrada en la **Figura 3-6**, se indican los resultados obtenidos en el pre-dimensionamiento de esta alternativa.

Tabla 3-5
Espesores de pantalla y muro interior. Alternativa de pozo único

Parámetro	Pantalla de contención	Muro interior
Pozo único, diámetro interior = 45 m		
Espesor (m)	1,50	(e anillo1/ e anillo2 / e anillo3) 0,50 / 1,00 / 1,50
Profundidad (m)	80,00	40,00

Producto 2: Alternativas de Diseño

Las dimensiones de la estructura de fondo, se mantienen de la misma manera que para las alternativas anteriores (véase **Tabla 3-3**)

3.5.4 Consideraciones de procedimientos constructivos

Dado que el sistema constructivo para los sistemas de contención no depende en este caso de la variación de la alternativa sino que este estará relacionado con las profundidades de excavación y el tipo de material, las consideraciones constructivas son las mismas consideradas para la alternativa anterior.

Sin embargo, dadas las dimensiones de la excavación de un pozo único y la complejidad geotécnica derivada, según lo expuesto en el numeral 3.5.2, podrían requerirse procedimientos adicionales para controlar las deformaciones laterales.

3.5.5 Consideraciones de operación y acceso

El esquema de pozo único requiere de un muro de separación a ser construido dentro del pozo con el fin de separar las áreas de los procesos de cribado y bombeo, lo cual permite una operación independiente para cada proceso. En el esquema de pozo único se dispone en general de mayor espacio interno para proveer acceso alrededor de los equipos de cribado y bombeo, en comparación con las otras alternativas.

Con el sistema de rejas verticales de cribado con rastrillo limpiador con descarga a nivel de la superficie del terreno, no se hace necesario la instalación de escaleras de acceso hacia el nivel de las rejas dentro del área de cribado. Sin embargo, es necesario contar con un sistema de puente grúa externo a nivel de la superficie con acceso hasta el nivel de las rejas por cualquier eventualidad de servicio no rutinario.

El área de bombeo requiere de escaleras de acceso hasta el nivel inferior para permitir el acceso de personal de operación y mantenimiento. Asimismo, es necesario contar con un sistema de puente grúa externo a nivel de la superficie que permita la instalación, remoción y el mantenimiento del equipo dentro del área de bombeo. Se prevé que el área de bombeo requiera de un sistema de ventilación positiva así como iluminación en los niveles inferiores del pozo.

3.5.6 Estimado general de costo de construcción

Al igual que para la alternativa anterior, se asume una profundidad general para el pozo único de 80 m para el sistema de contención, 40 m para el sistema de revestimiento interior y 40 m para la cimentación del sistema de fondo. El costo estimado corresponde solamente a la obra civil básica, con base en volúmenes aproximados de excavación, volúmenes de concreto y de cuantía de refuerzo en pantallas, muros interiores y estructura de fondo.

Cabe indicar que en esta valoración, no se incluyen los componentes estructurales al interior del pozo tales como muros de separación, muros de vertedero, etc.

En este caso, el costo de construcción de la alternativa en cuestión es de COP \$ 68.900 millones.

Producto 2: Alternativas de Diseño

3.6 Evaluación de alternativas

Como se indicó en el aparte 3.2, la alternativa de sistemas de cribado en los interceptores afluentes principales, específicamente junto a los pozos ITC-1, ITC-8 e ITC-10, no es recomendable debido al mayor costo conjunto de construcción y operación de estos sistemas en comparación con un sistema de cribado ubicado en el sitio mismo de la estación de bombeo. Además, la práctica común de ingeniería en el diseño de estaciones de bombeo es proveer un sistema de cribado inmediatamente aguas arriba de las unidades de bombeo, esto con la finalidad de remover sólidos grandes del flujo de aguas residuales antes de su entrada a las tuberías de succión de las bombas.

En cuanto a las otras alternativas identificadas (dos pozos sin derivación, dos pozos con derivación y pozo único), los pozos propuestos se ubican en el sitio destinado para la EBAR Canoas, bajo diferentes esquemas de disposición. Para permitir el análisis comparativo de estas alternativas, en los apartes 3.3 a 3.5 se presentaron consideraciones sobre aspectos hidráulicos, geotécnicos, estructurales, procedimientos constructivos, operación y acceso, así como estimados generales de costos de construcción de obra básica de cada una de las alternativas. En la **Tabla 3-6** se resume el análisis realizado de cada alternativa para facilitar la selección de aquella que se presenta como la más óptima para la EBAR Canoas.

Tabla 3-6
Análisis comparativo de alternativas

Evaluación de Alternativas de Configuración	A	B	C	D	E	F	G
			(A x B)		(A x D)		(A x F)
Criterio de evaluación	Factor de ponderación (1-10)	Dos Pozos sin Derivación		Dos Pozos con Derivación		Pozo Único	
		Puntaje asignado (1-5)	Puntaje ponderado	Puntaje asignado (1-5)	Puntaje ponderado	Puntaje asignado (1-5)	Puntaje ponderado
Consideraciones hidráulicas	8,0	4,0	32,0	2,0	16,0	4,0	32,0
Consideraciones geotécnicas	8,0	3,0	24,0	3,0	24,0	2,0	16,0
Consideraciones estructurales	8,0	4,0	32,0	4,0	32,0	4,0	32,0
Procedimientos constructivos	7,0	3,0	21,0	3,0	21,0	2,0	14,0
Operación y acceso	8,0	3,0	24,0	3,0	24,0	4,0	32,0
Estimado costo de construcción	10,0	5,0	50,0	4,0	40,0	5,0	50,0
Puntaje Ponderado Total			183,0		157,0		176,0

Con base en el análisis comparativo de las alternativas planteadas se puede observar que si bien la opción de un único pozo es económicamente ligeramente inferior a las demás alternativas, puede decirse que de acuerdo con el nivel de precisión de la valoración económica, según el alcance de esta etapa del diseño, no existen diferencias significativas entre alternativas.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Sin embargo, como resultado del análisis integral considerando la totalidad de criterios, se identifica a la alternativa de “dos pozos sin derivación” como la más favorable. Como se indicó anteriormente, esta alternativa consiste en dos pozos independientes, uno para cribado y otro para bombeo, ambos construidos directamente sobre el túnel del Interceptor Tunjuelo-Canoas en el sitio identificado para la EBAR Canoas. Al estar ambos pozos construidos sobre el interceptor, no es necesaria una estructura de derivación de caudal pues la separación de caudales (hacia el bombeo o hacia el túnel de emergencia) ocurre dentro de las mismas estructuras.

Por lo tanto, esta consultoría recomienda la selección de la alternativa de “dos pozos sin derivación” para ser llevada al nivel de ingeniería básica. En la siguiente sección de este informe se realiza un refinamiento de las dimensiones y características de la alternativa seleccionada y se presenta un análisis de modelación de CFD con el fin de identificar posibles áreas problemáticas en la configuración del sistema hidráulico.

4. Pre-dimensionamiento de la alternativa seleccionada

4.1 Pre-dimensionamiento hidráulico

La EBAR Canoas recibirá caudales de agua residual cruda en tiempo seco y caudales de agua combinada durante eventos de lluvia. Por lo anterior, deberá estar en capacidad de manejar caudales de agua residual con sus correspondientes variaciones diarias y caudales máximos de agua combinada, transportados por el ITC. La EBAR contempla un sistema de rebose pasivo hacia el túnel de emergencia, para manejo de contingencias. Aguas arriba de las bombas se prevé un sistema de cribado grueso para proteger a las bombas, tuberías y válvulas de un posible daño ocasionado por sólidos de gran tamaño.

De acuerdo con lo expuesto en numerales anteriores, los caudales de diseño del sistema son los siguientes:

- Caudal máximo de diseño = 36,2 m³/s
- Caudal mínimo en tiempo seco = 6,2 m³/s
- Caudal medio diario = 16,0 m³/s

4.1.1 Hidráulica del sistema de cribado

Para el dimensionamiento del sistema de cribado, se tienen en cuenta tres factores principales:

En primer lugar, tiene que haber al menos dos unidades. Aunque el mecanismo de limpieza del sistema de cribado seleccionado se opera desde superficie, los canales de cribado y las rejillas requieren de inspección ocasional, mantenimiento y/o reparación eventual. Los trabajos de mantenimiento e inspección de estos sistemas son poco frecuentes, sin embargo, al contar con múltiples canales y rejillas, una unidad puede ser retirada de servicio por periodos cortos de tiempo para realizar las inspecciones, mantenimiento, reparación o reemplazo durante períodos de bajo flujo.

El segundo factor es el espaciamiento entre las barras verticales de la rejilla. Se recomienda un espaciamiento del 30% o menos con respecto al tamaño de la esfera más grande que puede pasar una bomba. Las bombas seleccionadas para la estación permiten el paso de sólidos con diámetros de 300 mm y mayor. De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta los sistemas y procesos que se prevén aguas abajo de las bombas (cribado medio y fino en la PTAR Canoas), se recomienda un espaciamiento entre barras de 60 mm, que cumple con los dos propósitos: protección de las bombas y primera etapa de tamizado para el pre-tratamiento considerado en la PTAR (que según diseños de CDM-Ingesam, contempla cribado medio de 25 mm y fino de 6 mm, con lo cual no es recomendable permitir el paso de sólidos de mayor tamaño).

En tercer lugar, la velocidad a través de los canales de cribado debe mantenerse en un rango entre 0,3 m/s y 1,2 m/s, con el objetivo de evitar deposición de sólidos suspendidos que deben continuar en el flujo y de igual manera controlar pérdidas hidráulicas.

De acuerdo con lo anterior, el número óptimo de canales de cribado se obtuvo mediante un proceso iterativo de selección de anchos de canal y cálculo de profundidades de flujo para verificar las velocidades a través del sistema. El canal de interconexión entre la cámara de cribado y el pozo de

Producto 2: Alternativas de Diseño

bombeo se dimensionó para garantizar una pérdida hidráulica suficiente, que permita mantener un nivel de flujo adecuado aguas arriba de las rejas para caudales medios y máximos. Como resultado del proceso se obtuvo que el ancho del canal cribado de 12 m, es el que mejor se ajusta al perfil de velocidades requerido para condiciones de caudal medio y caudal máximo.

Con el ancho del canal de cribado establecido, se evaluó el número de canales requeridos. Se evaluaron dos canales de cribado con ancho de 6 metros o tres canales de cribado con ancho de 4 metros. Si se utilizan dos canales de cribado, cada canal tendría que ser dimensionado para el 100% del caudal, durante los períodos de inspección o mantenimiento. Para la condición con un canal de cribado en servicio, la velocidad a través del cribado se encuentra por encima de los niveles aceptables. Con tres canales de cribado disponibles y uno fuera de servicio para inspección o mantenimiento, el caudal a través de cada uno de las canales restantes es 50% del caudal total y las velocidades están dentro de un rango aceptable. Por lo tanto, se recomiendan tres canales, cada uno con un mecanismo de limpieza independiente.

Con base en los tres canales de cribado, a continuación se muestran los elementos principales del diseño del sistema.

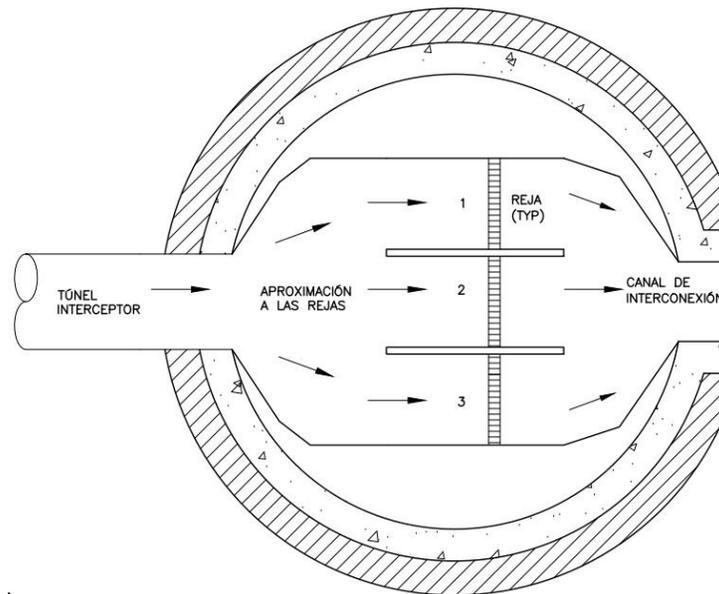
Descripción	Caudal Medio	Caudal Máximo
• Número de Canales	3	3
• Ancho / Altura, m x m	4,0 x 5,0	4,0 x 5,0
• Espaciamiento entre barras, mm	60	60
• Velocidad, m/s*	0,80	0,93

*la velocidad depende de la profundidad del flujo en el canal

De acuerdo con lo anterior, el caudal proveniente del ITC fluye a través del canal de aproximación y los tres canales de cribado de 4 m de ancho. Cada canal contiene un sistema de cribado. El canal de aproximación sirve para reducir la velocidad de las aguas residuales provenientes del ITC a velocidades aceptables a través del cribado. La disposición física del canal de aproximación y canales de cribado se muestra en la siguiente figura.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 4-1
Esquema del Sistema de Cribado (Fuente: Consultor)



4.1.2 Hidráulica del Pozo del Bombeo

El flujo entra en el pozo de bombeo desde el canal de interconexión de pozos y entra en las cámaras de succión de las bombas. Se prevén dos cámaras de succión de manera que una cámara puede ser retirada del servicio durante los períodos de caudales bajos, para inspección o mantenimiento. El caudal de las cámaras de succión es dirigido a la toma de cada bomba en operación. Los objetivos dentro de las cámaras de succión son el de mantener las velocidades en la cámara de succión por encima de 0,6 m/s, proveer una pendiente transversal en el fondo para direccionar los materiales pesados hacia la entrada de las bombas y mantener la altura de la lámina de agua por debajo del nivel del vertedero que permite que los excesos entren al túnel de emergencia.

Se requieren seis bombas centrífugas de pozo seco, de velocidad variable, para manejar el rango de caudales provenientes del ITC. El bombeo será continuo y coincidirá con el caudal afluente. Las bombas de velocidad variable serán operadas para mantener la altura de la lámina de agua en las cámaras de succión. La altura de la lámina de agua en las cámaras de succión, subirá o bajará para mantener las velocidades de flujo, dentro del rango deseado y para mantener suficiente cabeza sobre la succión de las bombas, con el objetivo de evitar que se formen vórtices en la superficie del agua que lleven a la aspiración de aire. Lo anterior, procurando mantener la altura de la lámina de agua por debajo de la cresta del vertedero de excesos, para evitar que el flujo entre en el túnel de emergencia. La cámara de succión es una configuración de tipo zanja que tiene un ancho de 1,8 m y una altura de 4,76 m. Por encima de la zanja, el canal se ensancha para controlar la velocidad y minimizar el aumento de la lámina de agua para caudales mayores.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Con base en la proyección de caudales del ITC, estarán en servicio tres bombas durante las condiciones de caudal medio y las variaciones diurnas asociadas. Durante las demandas de caudal máximo estarán en servicio cinco bombas. La sexta bomba estará en espera y entrará en servicio en caso de ser requerida. En condiciones normales, existen diversos esquemas de combinación de las bombas con unidades en servicio y las otras en modo de espera, listas para entrar en servicio. El objetivo es rotar las bombas en servicio y en particular hacer funcionar las bombas en los extremos de las cámaras para minimizar la acumulación de desechos que pueden depositarse en el fondo de las zanjias.

El vertedero de excesos se extiende a lo largo de la pared interior de la cámara de succión. Esto permite el uso de un vertedero largo para minimizar el aumento del nivel de lámina de agua durante los eventos en que se requiera el vertido hacia el túnel de emergencia. La elevación del vertedero se establece con base en la elevación de la corona del ITC en la entrada al pozo de cribado, de modo que el túnel interceptor no se ahogue durante un evento de caudal máximo cuando no hay bombas en servicio. Considerando una longitud de vertedero de 33 m, la elevación de la cresta del vertedero se fija en la cota 2518,25 msnm. Esto es 0,71 m por debajo de la corona del interceptor del túnel. La lámina de agua por encima del vertedero se ajusta para descargar el caudal máximo sobre el vertedero sin ahogar el interceptor. Desde el vertedero de excesos, el caudal ingresa al túnel de emergencia y es conducido al río Bogotá. El túnel de descarga de emergencia tiene la capacidad para manejar el caudal máximo proveniente del ITC.

Los elementos principales del diseño del sistema de bombeo se muestran a continuación:

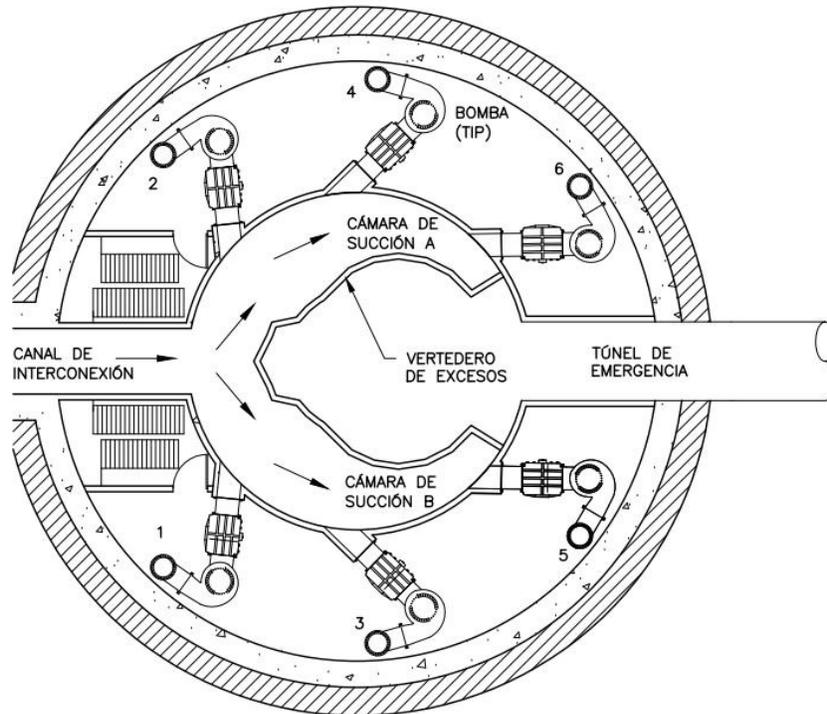
Descripción	Caudal Medio
• Número de Cámaras de Succión	2
• Número de Bombas	6
• Tipo	Centrífuga de eje vertical en pozo seco (velocidad variable)
• Cabeza del Sistema, m*	38 a 40
• Capacidad / Unidad, m ³ /s	6,4
• Capacidad Total Instalada, m ³ /s	38,4
• Capacidad Firme, m ³ /s	32,0

*La cabeza final del sistema se debe determinar en el diseño básico final

El esquema físico del pozo de bombeo con las dos cámaras de succión, seis bombas de pozo seco y el vertedero de excesos de emergencia, se muestra en la siguiente figura.

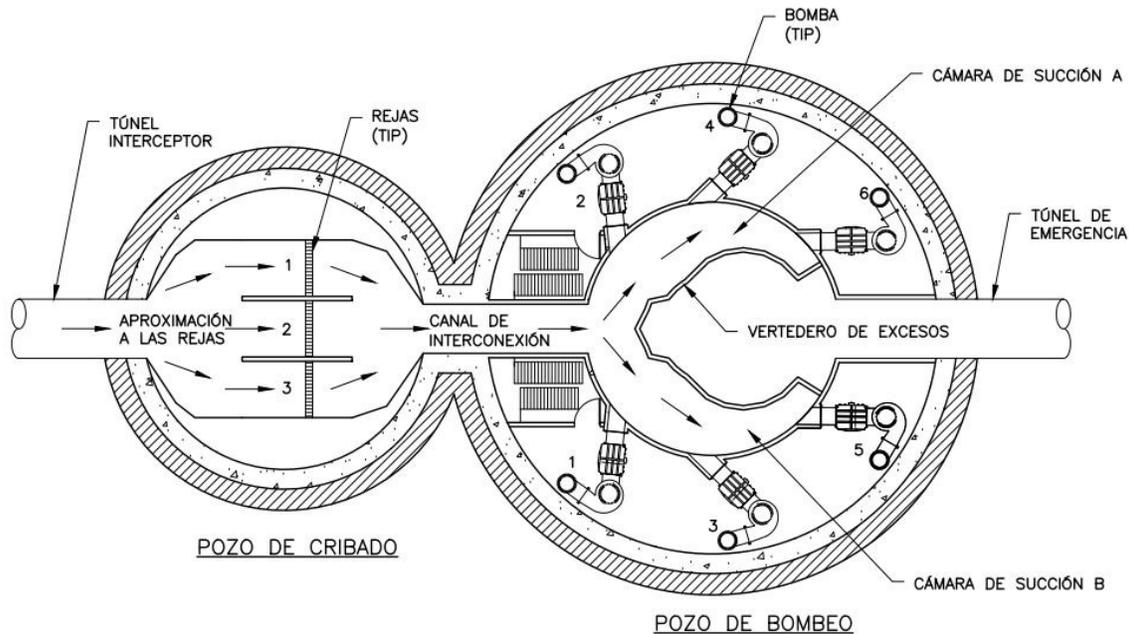
Producto 2: Alternativas de Diseño

Figura 4-2
Esquema del Pozo de Bombeo (Fuente: Consultor)



El esquema completo del sistema de la estación de bombeo, incluye el pozo de cribado junto con el pozo de bombeo. La vista en planta del sistema completo desde el ITC hasta el túnel de emergencia, se muestra en la siguiente Figura.

Figura 4-3
Esquema de la Estación de Bombeo (Fuente: Consultor)



4.1.3 Perfil Hidráulico

Con base en la configuración del sistema, se realizó el cálculo del comportamiento hidráulico de la lámina de agua a través de la estación de bombeo. La lámina de agua fue calculada para las condiciones de caudal medio y caudal máximo. Desde el túnel interceptor hasta los canales de cribado, el flujo de aguas residuales se ampliará y se profundizará en el canal de aproximación para permitir que la velocidad del flujo descienda antes de entrar a los tres canales de cribado.

Después del cribado, el flujo continúa por un tramo angosto para luego ingresar al canal de interconexión hacia las cámaras de succión en el pozo de bombeo. La pérdida de cabeza en el canal de interconexión está diseñada para mantener la profundidad del agua antes del cribado con un nivel razonable para alcanzar la velocidad apropiada a través del cribado. Sin las pérdidas de cabeza inducidas, las velocidades a través del cribado serían más altas de lo recomendado.

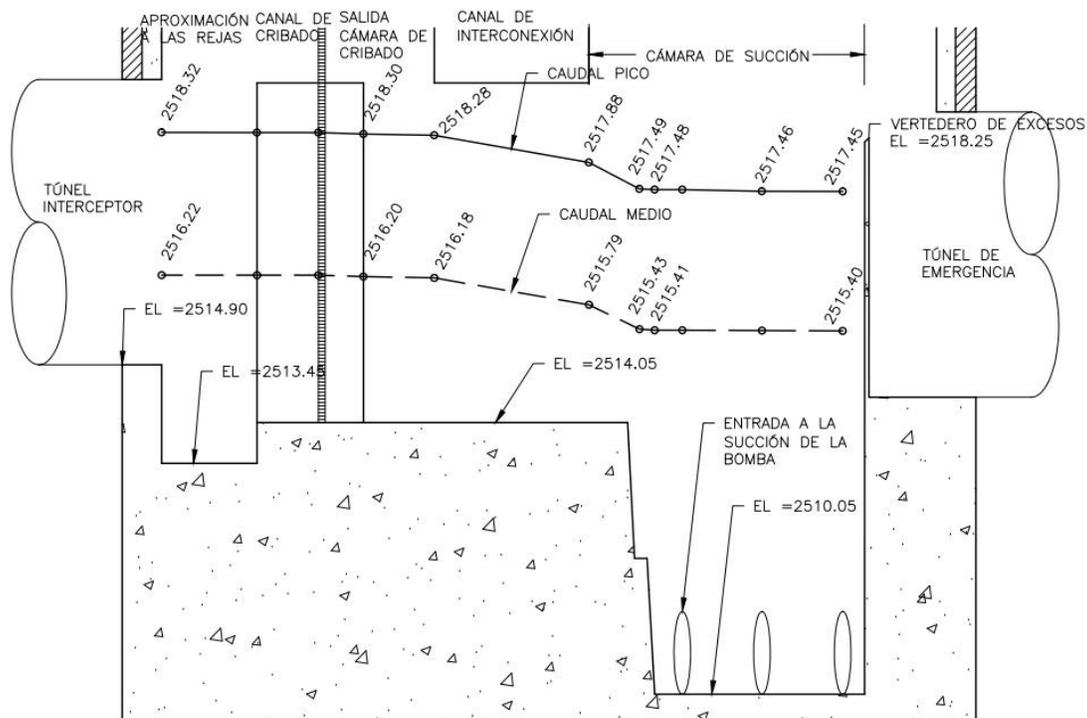
Desde el canal de transferencia, el flujo entra en la cámara de succión A, o en la cámara de succión B, o en ambas cámaras, dependiendo de cuáles bombas están operando. Desde el canal de interconexión a la entrada de la succión de las bombas, el caudal de aguas residuales pasa por una zanja diseñada para conducir el flujo y mantener las velocidades por encima de 0,6 m/s para mover sólidos, los cuales normalmente se podrían depositar en los canales, hacia la entrada de la succión de las bombas. El diseño de la zanja también permite tener una profundidad de flujo adecuada para evitar la formación de vórtices en la superficie de agua. La formación de vórtices puede llevar al ingreso de aire en el impulsor de la bomba generando varios problemas operacionales. En la entrada de la succión de las bombas, el flujo entra en una tubería con boca de campana, para mayor conveniencia a la entrada de la bomba.

Producto 2: Alternativas de Diseño

La operación de las bombas controla el nivel del agua en la cámara de succión a un nivel por debajo del vertedero de excesos. Para caudales menores en la estación de bombeo, el nivel de control estimado en la cámara de succión es de 2515,40 msnm. Para el caudal pico, la altura de la lámina de agua se debe mantener como máximo en la cota 2517,45 msnm para controlar las velocidades en los canales.

El perfil hidráulico para el caudal pico y el caudal medio a través de la estación de bombeo se muestra en la siguiente Figura.

Figura 4-4
Perfil Hidráulico de la Estación de Bombeo (Fuente: Consultor)



En el **Anexo 3 – Memorias de cálculo**, se presenta un resumen del procedimiento para el pre-dimensionamiento hidráulico de los pozos de cribado y bombeo, junto con los cálculos para el desarrollo del perfil hidráulico.

Producto 2: Alternativas de Diseño

4.2 Modelación CFD (*Computational Fluid Dynamics*)

Con base en la configuración y dimensionamiento hidráulico de la alternativa seleccionada, se construyó un modelo CFD. Lo anterior con el objetivo de identificar posibles irregularidades en el flujo, zonas de sedimentación, pérdidas inducidas por geometría y estructuras, para recomendar ajustes a las mismas de ser necesarios.

La modelación computacional de la dinámica de fluidos, es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza matemáticas y física aplicadas, para analizar y visualizar el flujo, usando un programa computacional. Se utilizan ecuaciones matemáticas para describir variables como velocidad, presión, temperatura y densidad de un fluido en movimiento. El programa entrega como resultado, los medios para visualizar las corrientes de flujo en una grilla de 3-dimensiones.

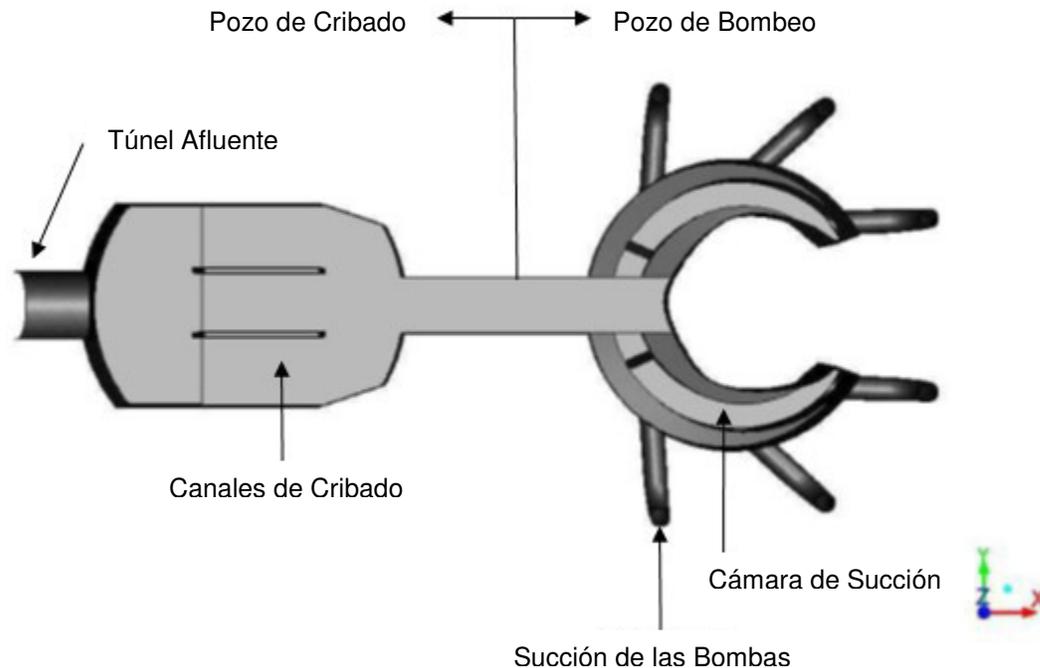
Para la EBAR Canoas, se desarrolló un modelo computacional de dinámica de fluidos, para evaluar el flujo a través del pozo de cribado y la cámara de succión de las bombas, para determinar la necesidad de realizar ajustes en las fronteras físicas para mejorar el flujo a través de la estación de bombeo para la condición de operación con el caudal pico. En particular, se utilizó el modelo para identificar la existencia y magnitud de cualquier fenómeno adverso en el flujo, el cual se pueda propagar a la succión de las bombas.

4.2.1 Montaje del Modelo

Las fronteras del modelo se determinaron con base en un esquema de diseño general que dirige el flujo desde el túnel afluente, hacia los canales de cribado en el pozo de cribado, para un total de seis bombas de agua residual cruda, conectadas a dos cámaras de succión en el pozo de bombeo. Las profundidades iniciales de agua en los canales, conductos y cámaras, se determinaron previamente con base en los cálculos hidráulicos realizados para la determinación del perfil. El esquema general de los elementos hidráulicos del pozo de cribado y la estación de bombeo, se muestran en la **Figura 4-5**.

Con base en la experiencia del modelador, se considera que el comportamiento general de flujo del agua residual es equivalente al del agua limpia, por lo anterior se adoptan los siguientes valores típicos de viscosidad, densidad y temperatura para el fluido a modelar: 0.001003 kg/ms, 998.2 kg/m³ y 20°C.

Figura 4-5
Esquematación de la Estación de Bombeo (Fuente: Consultor)



El programa computacional utilizado para la modelación y la representación visual de los resultados fue ANSYS Fluent. El caudal pico modelado a través de la estación de bombeo fue de $36,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Se utilizó el modelo k-e-CFD con un espaciamiento máximo de grilla de $0,13 \text{ m}$. Adicionalmente, el modelo únicamente considera simetría de una sola fase para la superficie libre y utiliza funciones de pared estándar para las características de la cámara de succión. El modelo fue desarrollado para representar las fronteras físicas del sistema para un caudal de agua en una sola fase líquida. Los resultados fueron analizados con base en los estándares internacionales aceptados, tales como: Hydraulic Institute, American National Standard for Pump Intake Design, ANSI / HI 9.8-1998, M. J. Prosser, The Hydraulic Design of Pump Sumps and Intakes, BHRA, July 1977, Schweizer Norm SN CR 13930: Rotodynamic Pumps –Design of Pump Intakes - Recommendations for the Installation of Pumps, VSM 2000.

4.2.2 Resultados Preliminares del Modelo

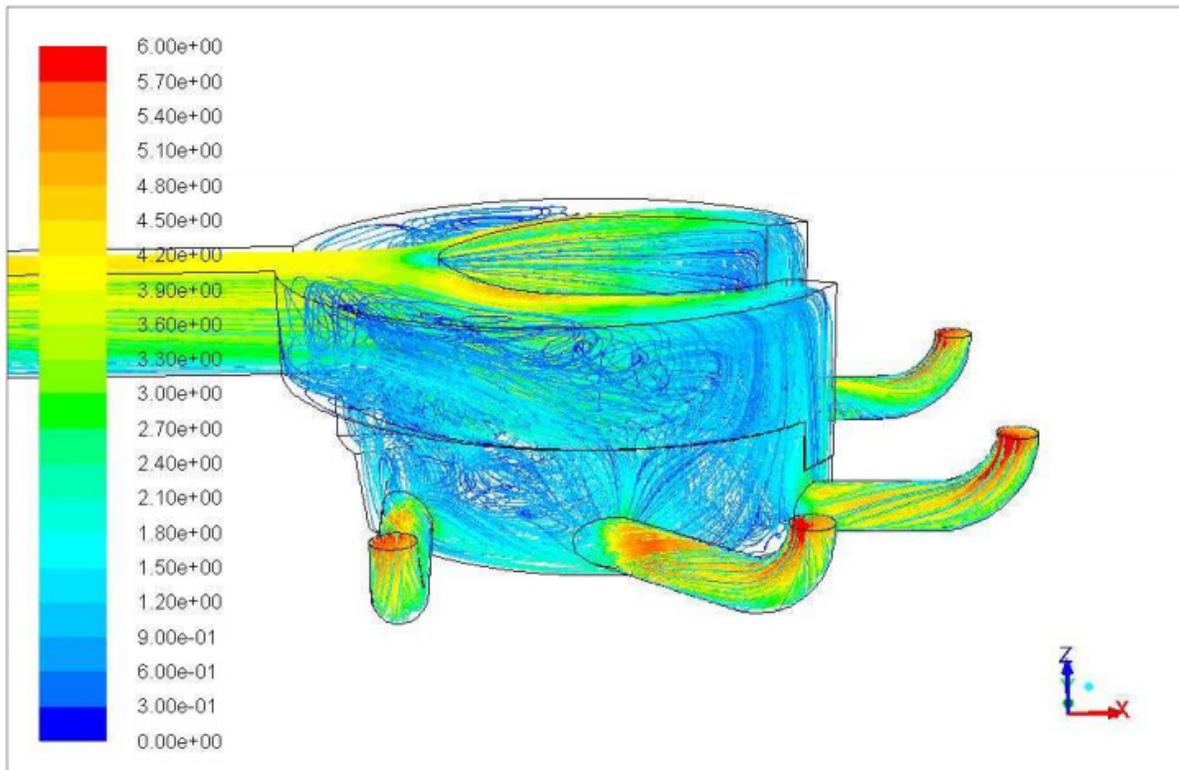
Se realizó una primera simulación del modelo con las condiciones iniciales del diseño. Los resultados mostraron turbulencia debida al contraflujo en las cámaras de succión, causada por la reflexión del flujo en las paredes del canal. Dichas reflexiones dieron como resultado una distribución de velocidades no-uniforme en las succiones de las bombas. Esta es una condición indeseable para la operación de las bombas. Los resultados de la primera simulación se muestran en la **Figura 4-6**. Los campos de flujo

Producto 2: Alternativas de Diseño

dentro de las cámaras de succión se muestran con la magnitud de las velocidades representadas por la escala de colores.

Figura 4-6

Resultados de la simulación inicial – vista general (Fuente: Consultor)



Los resultados de la turbulencia por el contraflujo y la distribución de velocidades no-uniforme en la entrada de la succión de las bombas, se muestra en la **Figura 4-7**.

Figura 4-7

Resultados de la simulación inicial – detalle succión de la bomba (Fuente: Consultor)



4.2.3 Ajustes del Sistema

Los resultados iniciales indicaron que se presentaban regímenes de contraflujo a la entrada de la succión de las bombas adyacentes y turbulencia causada por la reflexión del flujo en la geometría de la cámara de succión. La turbulencia se propagaba a la succión de las bombas, dando como resultado una distribución de velocidades no-uniforme. Se insertaron deflectores en las paredes de la zanja de la cámara de succión entre las entradas de succión y se añadió un codo de aceleración a la succión de cada bomba. Los deflectores están situados entre las entradas de succión cerca del fondo de la zanja de la cámara de succión. Los deflectores no se extienden hasta el fondo de la zanja para que los desechos pasen libremente por debajo de los deflectores.

4.2.4 Resultados del Modelo Ajustado

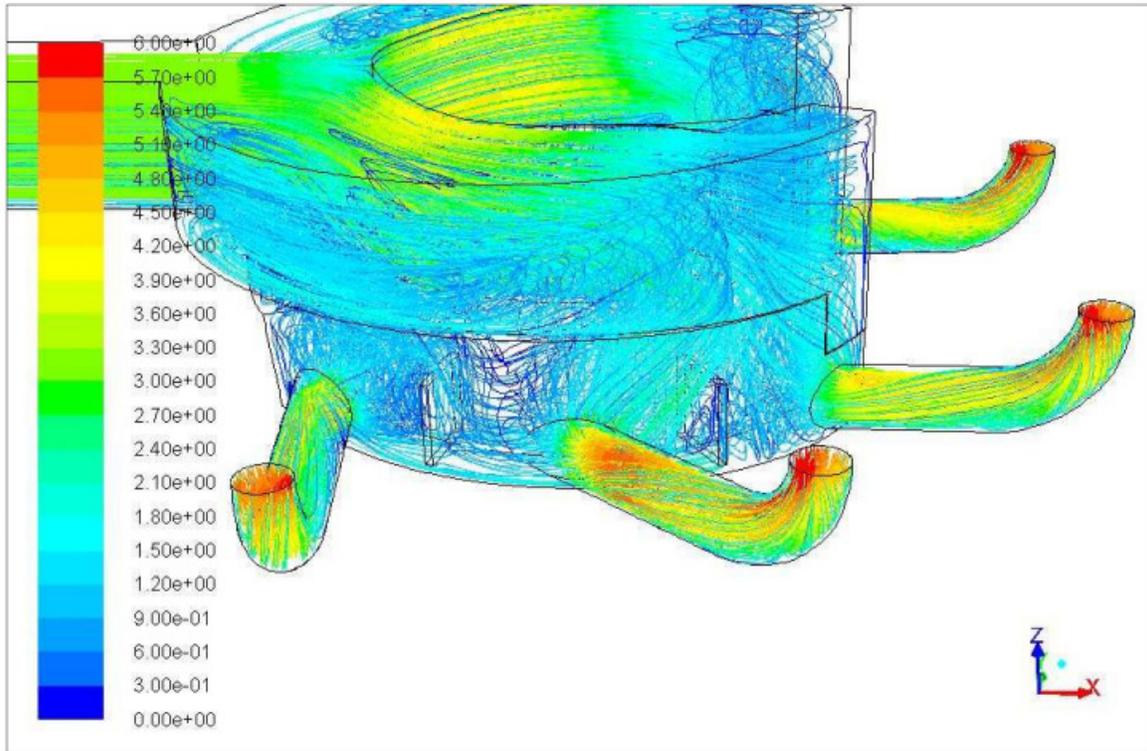
Después de añadir los deflectores en las paredes, el modelo CFD fue ejecutado nuevamente bajo condiciones de caudal pico. Los resultados del modelo ajustado se muestran en la **Figura 4-8**. La propagación de la turbulencia hacia la succión de las bombas se eliminó como resultado de la

Producto 2: Alternativas de Diseño

implementación de los deflectores en las paredes. Los campos de flujo al interior de las cámaras de succión, se muestran con la magnitud de las velocidades representada por la escala de colores.

Figura 4-8

Resultados de la simulación incluyendo ajustes – vista general (Fuente: Consultor)

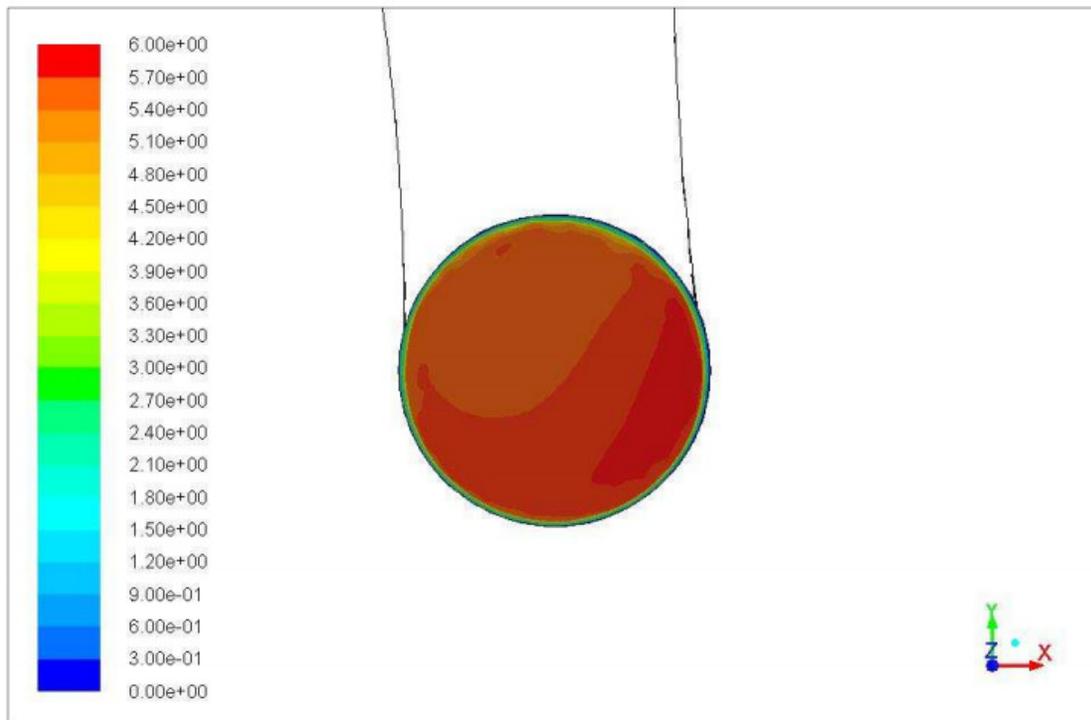


Con la implementación de los deflectores, la distribución de velocidades no-uniforme a la entrada de la succión de las bombas, prácticamente se eliminó, como se muestra en la **Figura 4.9**.

Figura 4-9

Resultados de la simulación incluyendo ajustes – detalle succión de la bomba

(Fuente: Consultor)



4.2.5 Conclusiones

Para determinar las condiciones de flujo en la EBAR Canoas, se llevó a cabo una modelación CFD del sistema. El objetivo era verificar la funcionalidad del sistema de bombeo con el máximo caudal en la estación de bombeo.

Los resultados iniciales indicaron que se podían presentar regímenes de contraflujo a la entrada de la succión de las bombas adyacentes y turbulencia causada por la reflexión del flujo en la geometría de la cámara de succión. La turbulencia se propagaba a la succión de las bombas, dando como resultado una distribución de velocidades no-uniforme.

El modelo construido se empleó para simular posibles medidas para eliminar la turbulencia generada por el contraflujo y la distribución de velocidades no-uniforme en las bombas. Se encontró que mediante la instalación de elementos deflectores en las paredes de la zanja de la cámara de succión se podía mitigar el efecto nocivo de la turbulencia y como resultado se obtienen perfiles de velocidad homogéneos en la succión de las bombas.

Producto 2: Alternativas de Diseño

Como mejora secundaria resultante del modelo CFD, se podría contemplar un deflector adicional aguas abajo del canal central de cribado para mejorar la distribución del flujo a través del mismo.

Los resultados del modelo soportan la viabilidad del concepto de diseño desde el punto de vista hidráulico. Las simulaciones corroboran que, con la implementación de mejoras sencillas (baffles, deflectores, etc), se puede lograr un comportamiento ideal del flujo. Sin embargo, dichas medidas deben ser exploradas con mayor detalle en la fase de diseños para construcción, con el objetivo de realizar un dimensionamiento adecuado de las mismas.

Como recomendación del “Hydraulics Institute”, para estaciones de bombeo de gran tamaño como la EBAR Canoas, el modelo CFD y el modelo hidráulico físico, se deben desarrollar con base en la configuración del diseño definitivo de los sistemas hidráulicos para verificar de manera satisfactoria, el comportamiento hidráulico para el rango operacional de la estación. El modelo físico se debe realizar de acuerdo con la norma ANSI/HI 9.8.

Durante el desarrollo del diseño básico se prevé que las dimensiones de los pozos de la alternativa seleccionada serán ajustadas según sea necesario para acomodar los diferentes componentes previstos (accesos, escaleras, áreas de trabajo, puentes grúas, ventilación, etc.). Lo que se realizó en este producto es un dimensionamiento conceptual para propósitos de análisis, pero ahora se prevé que las dimensiones de la alternativa seleccionada sean ampliadas según sea necesario. Esto es parte de la secuencia normal de diseño.