

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LOPEZ MATEOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE LA PLANTA DE BOMBEO CASA COLORADA PROFUNDA PARA UN GASTO DE 40 m³/s

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA

ING. FRANCISCO VALENZUELA ESQUIVEL

DIRECTORES DE TESIS

**DR. MIGUEL TOLEDO VELÁZQUEZ
M. en C. GUILIBALDO TOLENTINO ESLAVA**



MÉXICO, D.F.

OCTUBRE 2014

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	I
ABSTRACT	II
INTRODUCCIÓN	V
CAPÍTULO 1 DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA LUMBRERA DE REJILLAS	
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE BOMBEO	1
1.2 LUMBRERA DE REJILLAS	
1.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS COMPUERTAS	6
1.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS REJILLAS AUTOMÁTICAS DE LIMPIEZA	9
1.3 CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CARGA EN LAS ESTRUCTURAS DE ENTRADA AL CARCAMO DE BOMBEO	
1.3.1 Pérdidas de Carga en la Salida de Lumbrera L – 6	13
1.3.2 Pérdida de Carga en la Entrada a Lumbrera Rejillas	13
1.3.3 Pérdida de Carga en la Rejilla	14
1.3.4 Pérdida de Carga en la Compuerta	15
1.3.5 Pérdida de Carga a la Salida de la Lumbrera de Rejillas	16
1.3.6 Pérdida de Carga a la Entrada del Cárcamo de Bombeo	17
1.3.7 Pérdida de Carga de la Tubería L-6 a la Lumbrera de Rejillas	19
1.3.8 Pérdida de Carga de la Tubería entre Lumbrera Rejillas y Cárcamo de Bombeo	19
1.3.9 Resumen de Pérdidas de Carga en la Estructura de Entrada	20
CAPÍTULO 2 DISEÑO GEOMÉTRICO DEL CARCAMO DE BOMBEO	
2.1 DISEÑO DEL CARCAMO	26
2.2 MODELO HIDRÁULICO	
2.2.1 Objetivo	29
2.2.2 Problemas Hidráulicos en el Equipo de Bombeo Derivado de un Mal Diseño del Cárcamo	29
2.3 CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL CARCAMO	
2.3.1 Diámetro del Cárcamo de Bombeo	33
2.3.2 Diseño del Muro Amortiguador	38
2.3.3 Criterios para Dimensionar el Muro Amortiguador	40
2.3.4 Altura del Muro Amortiguador	45
2.3.5 Análisis y Dimensiones de Mamparas Divisorias de Celdas	45

CAPÍTULO 3	CÁLCULO DE LA CARGA DINÁMICA TOTAL DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO	
3.1	CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO DE LA PLANTA DE BOMBEO	50
3.2	MEMORIA DE CÁLCULO, PARA DETERMINAR LA CARGA DINAMICA TOTAL	55
3.3	CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LAS TUBERÍAS DE DESCARGA	58
3.4	CÁLCULO DE LA POTENCIA A NIVEL MINIMO	63
3.5	CÁLCULO DE LA POTENCIA ÚTIL DEL MOTOR DIESEL	64

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA REALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA LUMBRERA DE REJILLAS	
4.1.1	Análisis de los patrones de flujo en el interior de la lumbrera de rejillas	70
4.1.2	Planteamiento del problema y criterios de solución	70
4.1.3	Análisis para un Gasto de 4 m ³ /s y Nivel de operación en la elevación 2205.40 msnm	72
4.1.4	Análisis para un Gasto de 40 m ³ /s y Nivel de operación en la elevación 2 222.05 msnm	74
4.1.5	Análisis para un Gasto de 40 m ³ /s y 2 canales en operación-C1 y C2	77
4.1.6	Análisis para un Gasto de 40 m ³ /s y 2 canales en operación-C1 y C3	78
4.2	RESULTADOS OBTENIDOS EN LA REALIZACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DEL CÁRCAMO DE BOMBEO	
4.2.1	Cálculo de las Dimensiones del Modelo	80
4.2.2	Clasificación de los Vórtices	84
4.2.3	Criterios de Aceptación del Modelo Hidráulico	87
4.2.4	Características del Modelo	87
4.2.5	Material de Construcción del Modelo	87
4.2.6	Instrumentación y Procedimiento de Prueba	88
4.2.7	Metodología del Procedimiento de Prueba	91
4.2.8	Reporte de los Resultados de la Prueba	
4.2.8.1	Prueba del modelo según el proyecto original	91
4.2.8.2	Prueba para efectuar modificaciones al modelo	92
4.2.8.3	Prueba para comprobar modificaciones	93
4.3	RESULTADOS DEL CÁLCULO PARA DETERMINAR LAS VELOCIDADES DE LA BOMBA, CON SUS RESPECTIVOS NIVELES DE OPERACIÓN	
4.3.1	Cálculo de las Velocidades de Operación para las Distintas Cargas de Bombeo	97
4.3.2	Metodología para la Operación	100

CONCLUSIONES		103
BIBLIOGRAFÍA		106

RESUMEN

Se realizó el diseño geométrico de la lumbrera de rejillas o estructura de limpieza, cárcamo de bombeo, cálculo y selección de los equipos de bombeo, así como sus respectivas tuberías de descarga que conducen el agua a la Laguna Casa Colorada, siendo las estructuras principales para la Planta de bombeo denominada Casa Colorada Profunda, con una capacidad de 40 m³/s.

Se logró mediante la selección de 20 equipos de bombeo verticales de 2 m³/s de capacidad cada uno. El bombeo se realiza con dos variantes en su operación, el tomar agua directamente del túnel Río de los Remedios o la alimentación superficial del Dren General del Valle, que tiene su aportación en la lumbrera de inicio, llamada Lumbrera No. 6. Esta Planta sirve como regulación del sistema de drenaje profundo de la Ciudad de México, teniendo el destino del agua bombeada la Laguna Casa Colorada, con una capacidad de 3.75 x 10⁶ m³, de tal forma que el tiempo aproximado de regulación es de 26 horas, con una aportación constante del gasto total. Derivado del trabajo como un sistema, se presentan una variación entre el nivel de agua máximo y mínimo en el drenaje profundo de 16.65 m.

Cuando las condiciones adversas de lluvia sean mínimas, el agua de la laguna Casa Colorada se regresará al Túnel Río de los Remedios, trabajando de forma bidireccional también para la capacidad total de 40 m³/s. Bajo las condiciones anteriormente descritas, se diseñó la planta de bombeo con una lumbrera de rejillas y dos cárcamos de bombeo para alojar a 10 equipos verticales accionados con motores diésel. Tanto la estructura de rejillas como el cárcamo de bombeo se diseñaron con una dimensión de 16 m de diámetro.

El diseño efectuado, permite tener equipos de bombeo trabajando dentro de intervalos elevados de eficiencia del 79% al 89%, con una forma muy simple de operación, teniendo solo dos variables que observar, la velocidad de operación y

nivel dentro del cárcamo de bombeo, lo cual para el manejo de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, facilita el control de la variación de los niveles de una forma muy sencilla y segura. El diseño conceptualizado de esta forma, se logró mediante la utilización de motores Diésel accionados a velocidad variable.

El diseño de la planta de bombeo, se obtuvo de la solución a una necesidad derivada del comportamiento hidráulico de un sistema y la tendencia a lograr una operación sin muchas variables, lo cual permitirá una operación eficiente y segura. Las condiciones hidráulicas determinan las características técnicas del diseño de una planta de bombeo, las cuales deben ser satisfechas, pero a la vez, proporcionar al equipo de bombeo las condiciones hidrodinámicas requeridas para su operación eficiente.

ABSTRACT

The geometric design of the bar screen sump or structures cleaning, pumping station sump, calculation and selection of pumping equipment, and their respective pipes discharge depositing water in the lagoon Casa Colorada was performed, being the main structures pumping Plant Deep Casa Colorada, with a pumping capacity of 40 m³/s.

Was achieved by selecting 20 pumping equipment 2 m³/s of capacity. Pumping is done with two variables, taking water directly from the Rio de los Remedios tunnel or surface feeding General Dren Valley, which has its contribution in the home port, called port No. 6. Should be noted that this plant serves as regulation of sewage system of the city of Mexico.

Considering the fate of water pumped Laguna Casa Colorada, with a capacity of 3.75 million m³, with a period of approximately 26 hours regulation, with a constant supply of total expenditure. Derivative work as a system, a variation between the level of water in the maximum and minimum of 16.65m deep drainage are presented. When adverse conditions are minimal rainfall, the water of the lagoon Casa Colorada will return to Rio de los Remedios tunnel, the same tunnel, which interfaces with the Issuer field in East. Also for total capacity m³/s. Under the above described conditions, the pumping plant is designed with a bar screen sump and two pumping sump to accommodate 10 vertical equipment powered with diesel engines. Both the structure of bar screen sump as pumping station sump were designed with a dimension of 16 m diameter.

The design, allows pumping equipment working within high intervals efficiency from 79% to 89%, with a very simple way of operation, only having two variables to observe the speed of operation and level within the sump pumping which for the management of 40 m³/s, facilitates control of the variation of the levels very easily. The design conceptualized in this way, was achieved by the use of diesel engines operated at variable speed and safely.

The design of the pumping station, was obtained from the solution working with a derived need hydraulic behavior of a system and the tendency to achieve operation without many variables, allowing the efficient and safe operation. The hydraulic conditions determine the design of a pumping plant, which must be met, but also provide the hydraulic pumping equipment the conditions for its operation.

INTRODUCCION

La Planta de bombeo Casa Colorada se localiza en la zona del lago de Texcoco, lo cual implica resolver la problemática de construcción derivada de la poca resistencia del terreno, lo cual obliga a diseñar complejas estructuras de dimensiones óptimas, que dé facilidad de construcción pero con el compromiso de tener condiciones de operación sin problemas. El sistema de drenaje profundo tiene una variación entre los niveles de operación máximos y mínimos de 16.65 m.

El diseño de plantas de bombeo en zonas de inundación que sean económica y técnicamente factibles permite resolver problemas que representan riesgos y pérdidas para la población. Es importante mencionar que el sitio que se eligió para la construcción de esta planta de bombeo, tiene un gran reto, por sus características de suelo de poca resistencia y por lo tanto la obligación del diseño hidráulico requiere efectuar diseños libre de vórtices y corrientes concentradas, que afectan cualquier funcionamiento en el equipo mecánico. En lo que se refiere al diseño mecánico, los equipos se diseñaron y seleccionaron para tener su funcionamiento eficiente, libre de vibraciones lo cual evita un desgaste prematuro.

Para lograr el objetivo de tener estructuras de dimensiones adecuadas consiguiendo un diseño con flujos estables y un funcionamiento sencillo para el bombeo de grandes volúmenes de agua, se desarrollan cuatro Capítulos en la tesis, que determinan el diseño del tren principal de estructuras en la Planta de Bombeo.

El diseño geométrico sistema de limpieza en la Lumbreira de Rejillas, tiene la característica de separar los sólidos mayores de 50 mm lo cual representa $1/3$ del paso de esfera del impulsor, para que no tener obstrucciones en el interior de los álabes. Su diseño en con dos canales de rejillas en operación más uno de reserva. Cada canal de rejillas cuenta con dos compuertas que permiten el seccionamiento, para mantenimiento de las rejillas automáticas. Las características generales de la selección de compuertas y rejillas automáticas de limpieza están relacionadas en el Capítulo 1, así como el cálculo de las pérdidas hidráulicas totales, que dan el

parámetro para evaluar su efecto en los niveles seleccionados de operación de los equipos de bombeo, las cuales son despreciables, ya que solo tienen un valor de 29 cm y no se consideran ya que la filosofía de operación en la planta de bombeo es de regirse por los niveles puntuales al interior del cárcamo de bombeo.

El diseño geométrico del cárcamo de bombeo se efectúa considerando que no debe existir ningún tipo de vorticidad, conduciendo el agua hasta la succión del equipo. Este diseño geométrico sirvió para construir un modelo a escala, en donde se verificó que las bases de diseño y objetivos fueran cumplidos al 100%, logrando con esto la confiabilidad para su construcción. La construcción y estudio del modelo a escala del cárcamo de bombeo fue efectuado en Estados Unidos, en un laboratorio que tiene colaboración con la Universidad de Clemson, llamado Clemson Engineering Hydraulics, Inc.

El gasto total es bombeado por dos grupos de 10 bombas cada uno, alojados en un cárcamo de bombeo que tiene una capacidad de $20\text{m}^3/\text{s}$ y que se pueden operar de forma independiente. Cada cárcamo de bombeo conduce el agua, hasta la laguna de regulación Casa Colorada, por medio de 4 tuberías de 1.52 m de diámetro, de acero al carbón. El gasto que fluye por las tuberías determina la carga piezométrica en la descarga del cárcamo y si se relaciona con el nivel de bombeo, se obtiene la carga dinámica total, para cada nivel de operación. Así mismo la altura de la canaleta perimetral está determinada por la piezométrica de operación máxima, más una altura derivada del oleaje. Los cálculos demuestran que la filosofía de operación más adecuada se obtiene mediante la variación de la velocidad de operación del equipo de bombeo, y considerando un flujo constante de $2\text{ m}^3/\text{s}$ para cada nivel dentro del cárcamo.

Se concluye en el estudio del modelo hidráulico que para el cárcamo de bombeo de 16 m de diámetro y un gasto de $20\text{ m}^3/\text{s}$, solo se tiene que adicionar 4 ventanas la mampara interior y un dispositivo antivórtice que se localizará en la succión de la bomba para obtener un flujo libre vórtices.

CAPÍTULO 1

DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA LUMBRERA DE REJILLAS

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA DE BOMBEO

La planta de bombeo de aguas combinadas (pluviales-sanitarias) Casa Colorada se diseña para una capacidad total de 40 m³/s, con dos cárcamos de bombeo y capacidad unitaria de 20 m³/s y una lumbrera de rejillas, que se diseñan considerando los requerimientos hidráulicos del sistema así como la selección de los equipos automáticos de limpieza. La planta de bombeo de aguas pluviales Casa Colorada considera las siguientes estructuras:

1. Lumbrera No. 6 (ya existente en el momento de la realización del proyecto)
2. Estructura de limpieza, que incluye rejillas automáticas de limpieza y compuertas
3. Cárcamo de bombeo
4. Tuberías de descarga a la Laguna Casa Colorada
5. Subestación eléctrica para servicios auxiliares
6. Planta de emergencia
7. Sistema de almacenamiento de combustible
8. Sistema contra incendio
9. Bombeo de agua de servicios generales

Para establecer los requerimientos mínimos de funcionamiento, se elaboran las especificaciones de los equipos principales, planos y sus memorias de cálculo, creando la interrelación entre el proyecto-memoria de cálculo y operación del sistema. Cabe aclarar que en el proceso de diseño, se contempla una serie de ideas de forma iterativa, teniendo retroalimentación y modificando dimensiones o cálculos para llevar a un trabajo realmente de conjunto, que permita la operación de los equipos de una forma eficiente. Este diseño tiene como sustento, resolver los

requerimientos hidráulicos de la Planta de Bombeo, definiendo las características hidráulicas de la entrada a las estructuras de rejillas y de los cárcamos de bombeo, y de esta forma estar en posibilidad de proponer las dimensiones requeridas tanto en los canales de rejillas, como en la misma planta de bombeo, considerando los niveles mínimos y máximos, previendo las condiciones desfavorables en su diseño.

Metodología para el Cálculo de la Planta de bombeo:

- Diseño geométrico de la Lumbrera de rejillas.
 - Selección de rejillas
 - Selección de compuertas
 - Dimensionamiento geométrico de la Lumbrera de rejillas
 - Elaboración del modelo matemático para evaluar las características de flujo
 - Rediseño de la lumbrera en función de los resultados del modelo matemático.

- Diseño del Cárcamo de Bombeo
 - Cálculo del Diámetro del Cárcamo de Bombeo
 - Diseño del Muro Amortiguador
 - Selección de la Altura del Muro Amortiguador
 - Diseño de las Celdas de Bombeo
 - Elaboración del modelo hidráulico para evaluar las características de flujo
 - Rediseño del cárcamo de acuerdo a los resultados del modelo.

- Diseño y Selección de los Equipos de Bombeo
 - Elevación del terreno
 - Nivel de agua en la succión
 - Nivel de agua en la descarga
 - Carga estática

- Perdidas en la columna del equipo de bombeo
- Perdidas en la fontanería de descarga
- Perdidas en la línea de conducción
- Trazo de la línea piezométrica en línea de conducción
- Cálculo del sifón en la descarga
- Cálculo de la carga dinámica total
- Cálculo del NPSH
- Selección del equipo de bombeo
- Selección de la capacidad del Motor
- Gasto
- Eficiencia
- Potencia al freno
- Potencia del motor de combustión interna
- Dimensionamiento geométrico de la Casa de Maquinas
- Definición los niveles de operación de la planta de bombeo, en función de los niveles seleccionados de arranque y paro así como las piezométricas generadas para cada gasto de operación.
- Dimensionamiento del Arreglo de Conjunto de la Planta de Bombeo

Carga Dinámica Total del equipo:

La carga dinámica total del equipo, es la presión que la bomba imprime al fluido y se determina mediante la adición de la carga estática, la carga de velocidad, y las pérdidas de fricción de los distintos elementos (campana de succión, tubería, codos, cabezal, etc.). Ver figura No. 1.1 de los términos empleados en el cálculo de la carga dinámica total, de forma esquemática.

$$H = h_{\text{est}} + v^2/2g + \sum h_f$$

H = Carga Dinámica Total

h_{est} = Carga o desnivel estático

$v^2/2g$ = Carga de Velocidad

$\sum h_f$ = Perdida de Carga derivada de la fricción en accesorios

h_{fs} = Perdida de Carga en accesorios de la succión

h_{fd} = Perdida de Carga en accesorios de la descarga

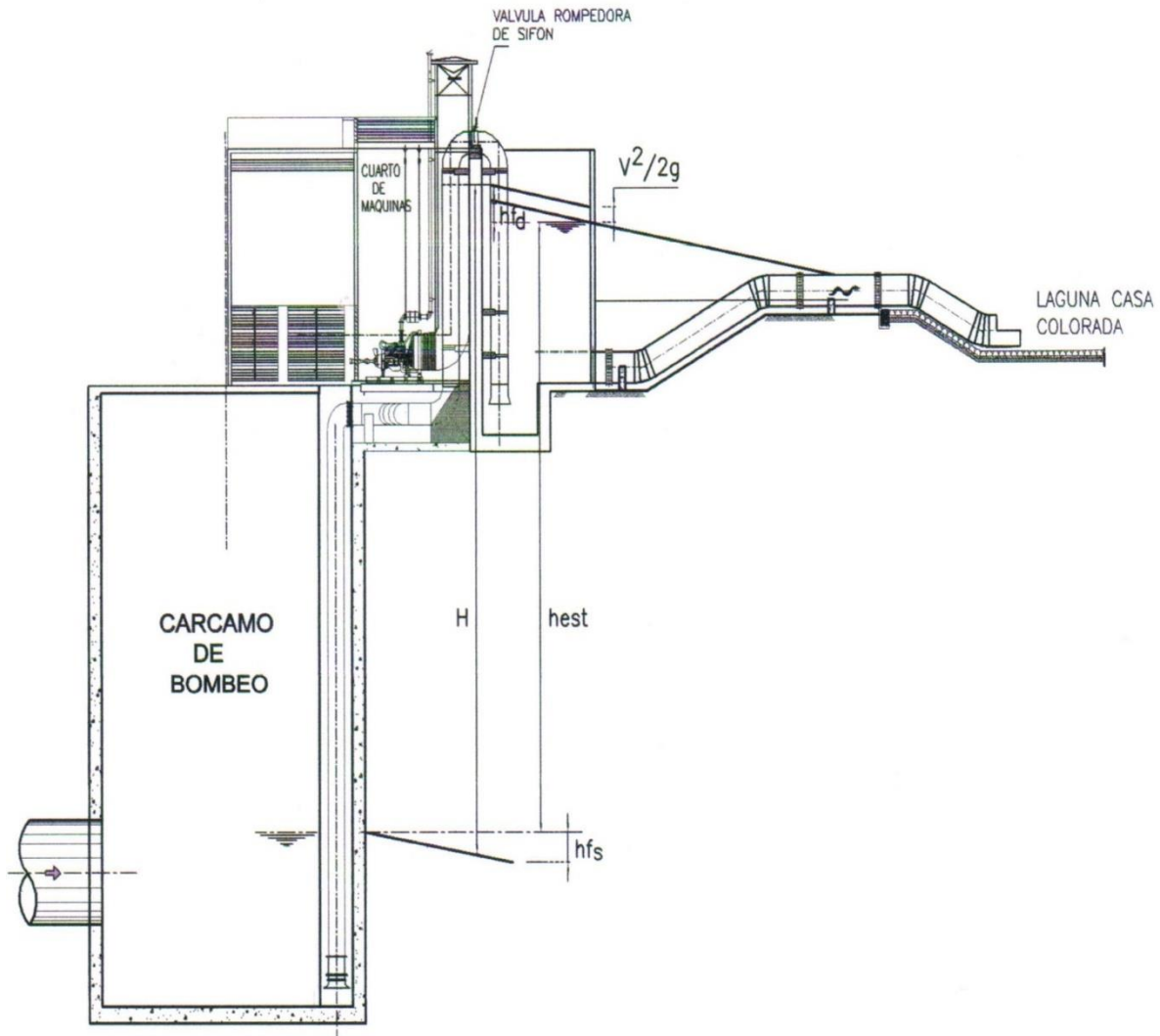


Figura No. 1.1 Términos utilizados en el Cálculo de la Carga Dinámica Total

Potencia del equipo de bombeo

$$P = \frac{Pe Q H}{102 \eta}$$

P = Potencia de la Bomba en kW

Pe = Peso específico del agua en kN/m^3

Q = Gasto de la Bomba en m³/s

H = Carga dinámica total del equipo en m

102 = Factor de conversión

$$P = \frac{P e_r Q H}{76 \eta}$$

P = Potencia de la Bomba en hp

Pe_r = Gravedad específica del agua adimensional

Q = Gasto de la Bomba en L/s

H = Carga dinámica total del equipo en m

76 = Factor de conversión

Leyes de Afinidad para las Bombas Centrifugas:

Para una bomba operada a dos diferentes velocidades, la relación siguiente es la que determinara sus condiciones de operación.

$$\left(\frac{Q}{q}\right)^2 = \left(\frac{N}{n}\right)^2 = \frac{H}{h}$$

Q = Gasto del equipo a la velocidad n₁

N = Velocidad de rotación n₁, del equipo

H = carga dinámica total a la velocidad n₁

q = Gasto del equipo a la velocidad n₂

n = Velocidad de rotación n₂, del equipo

h = carga dinámica total a la velocidad n₂

Velocidad específica del equipo de bombeo:

La forma del impulsor y los conductos adyacentes están definidos por la velocidad específica del equipo, de acuerdo a la siguiente relación:

$$N_s = N \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

N_s = Velocidad Específica de la bomba

Q = Gasto

N = Velocidad de rotación del equipo

H = Carga dinámica total

1.2 LUMBRERA DE REJILLAS

La planta de bombeo se diseña con dos cárcamos de bombeo y para que en la zona de succión de las bombas no arriben sólidos “gruesos”, que pueden ocasionar daño a los equipos de bombeo, se considera una estructura cilíndrica vertical de 16 m de diámetro, que cuenta con tres rejillas de limpieza de accionamiento automático, operando de forma continua 2 y una de reserva, para detener sólidos flotantes y suspendidos en el agua de tamaños mayores a 50 mm, ya que el paso de esfera del equipo de bombeo es de 17 cm. Estas tres rejillas se alojan en sus respectivos canales en el interior de la lumbrera, y con el fin de darle mantenimiento para poder seccionar aguas arriba y aguas abajo, se instalaran 6 compuertas deslizantes de 3.50 x 4.50 m .

En condiciones normales, las compuertas permanecerán abiertas y en consecuencia permitirán el libre paso del agua hacia los cárcamos de bombeo.

1.2.1 CARACTERISTICAS DE LAS COMPUERTAS

Estas compuertas se diseñan para una presión máxima de trabajo de 30 mca y una presión hidrostática referida al centro de presión de la compuerta de 17.51 mca; con sus correspondientes elementos operativos, control, protección y señalización y dimensiones de 3500 mm de ancho por 4500 mm de alto.

El suministro de las compuertas deberá considerar la totalidad de los componentes del sistema compuerta-mecanismo elevador eléctrico, comprendiendo elementos de fijación, vástagos de izaje, botoneras a pie de compuerta, arrancadores

reversibles en el CCM y elementos de protección así como accesorios complementarios.

De acuerdo a las características y a la naturaleza de las aguas, que arrastran gran variedad de sólidos, aunado a magnitudes significantes de arena, el diseño y características estructurales de las compuertas serán tales que soporten confiablemente los impactos mecánicos como son (carga hidrostática, impacto de sólidos), sin exceder de 2/3 el límite de cadencia del material seleccionado. Sus características de diseño, se listan a continuación:

Tipo de compuerta	Deslizante, montaje vertical plana.
Función primaria	Seccionamiento (normalmente abierta).
Fabricación de compuerta	De acuerdo a la Norma ANSI /AWWA C 561-04
Presión hidrostática referida al centro de presión de la compuerta	17.51 mca
Presión máxima de trabajo	30 mca.
Accionamiento	Actuador Eléctrico De acuerdo a la norma ANSI/AWWA C 540-02
Construcción	Robusta, servicio pesado
Diseño	Sin deformación permanente a carga máxima
Fluido a controlar	Aguas negras crudas domésticas y combinadas
Sentido apertura de compuerta.	Ascendente.
Dimensión nominal de las compuertas	3500 x 4500 mm (Ancho x Alto)
Gasto máximo nominal	13.33 m ³ /s
Sentido de hermeticidad	Aguas arriba - aguas abajo (un sentido).
Perímetro de hermetismo	4 lados.

Tolerancia de fuga (carga máxima)	0.10 LPS por metro lineal de perímetro
Tolerancia de fuga (0-6 mca de carga)	0.20 LPS por metro lineal de perímetro
Material del sello	Neopreno
Elementos mecánicos	Mecanismo elevador eléctrico Vástagos de izaje (2) Guías del Vástago.
Vástagos Roscados	En material ASTM 4140
Control de mando	Uno por compuerta tanto local como Remoto (control subir-bajar-parar en cualquier posición)
Mecánicos	Punto de engrase de elementos Accesible desde la superficie
Velocidad de izaje	254 mm/min.
Velocidad de descenso	254 mm/min.
Maniobras sin energía eléctrica	Se dispondrá de alimentación de emergencia del sistema eléctrico con generación propia de la instalación de la planta de bombeo
Nivel piso de operación de lumbrera	2 228.00 msnm
Nivel de fondo de lumbrera de rejillas	2 201.986 msnm
Elemento mecánico de elevación	Vástagos roscados
Potencia instalada	Por fabricante
Potencia demandada	Por fabricante
Diseño y ubicación de sellos de hermetismo de la compuerta	Se evitará someterlos a esfuerzo de corte, limitándose a esfuerzos de compresión

1.2.2 CARACTERISTICAS DE LAS REJILLAS AUTOMATICAS DE LIMPIEZA

El diseño de la lumbrera de rejillas contempla la utilización de rejillas automáticas de limpieza, alojadas en 3 canales, para contar con una operación de dos rejillas en operación y una tercera como respaldo. Para darle mantenimiento a dichas rejillas y poder sacar de operación cada canal, incluyendo a los dos cárcamos de bombeo, se cuentan con unas compuertas deslizantes, las cuales pueden soportar la presión más alta del sistema. Se contempló que en caso crítico derivado de una mala operación, o una falla total del sistema de compuertas, lo cual es muy remoto, un vertedor, que provee la posibilidad de que fluya el gasto y la planta pueda cumplir sus funciones.

El equipo de bombeo tiene un paso de esfera de 17 cm, por lo cual se considera adecuado tener unas rejillas con un paso libre máximo de 5 cm. La operación del peine automático estará regida por el diferencial de nivel, que se elige de 30 cm.

Cada canal de rejillas, tendrá un equipo de medición de nivel piezoeléctrico, que mandara la señal al control automático y activara el proceso de limpieza del rastrillo, el cual deposita la basura en una banda transportadora hasta un área de contenedores de basura. La elección de la instrumentación es fundamental, ya que se debe de disponer de elementos que eliminen la posibilidad de error en la medición, protegiendo al equipo de acumulación de basura y la medición confiable. Este sensor piezoeléctrico, fue alojado en el interior de un tubo ranurado de PVC, teniendo un funcionamiento adecuado. Así mismo se eliminó el sensor ultrasónico, que comúnmente es instalado en estos equipos, por la reflexión de las ondas en el interior de la lumbrera circular y que provocarían mediciones erráticas y no confiables, adicionalmente a la posibilidad de tener espumas que no provoquen la misma problemática. A continuación se enumeran las características técnicas de las rejillas automáticas de limpieza.

1	Número de unidades (Rejillas Gruesas)	3 Unidades
2	Caudal por canal	13.33 m ³ /s
3	Ancho del canal de flujo	4.0 m
4	Longitud de la rejilla	6.00 m
5	Profundidad del canal de flujo	26.01 m
6	Nivel del piso de operación	2 228.00 m
7	Nivel del fondo de lumbrera de rejillas	2 201.986 m
8	Entrehierro de la rejilla	51 mm
9	Inclinación de instalación	90° con respecto al plano horizontal
10	Tipo	Rejillas de limpieza automática
11	Construcción	Robusta
12	Diseño	Sin atascamiento del rastrillo
13	Fluido a manejar	Aguas crudas domésticas y combinadas
14	Disposición de rejilla en canal	Vertical
15	Carrera de limpieza mediante rastrillo	Ascendente
16	Cierre del rastrillo contra la rejilla fija	Accionamiento mecánico
17	Sistema de eyección de sólidos capturados	Mecánico; mecanismo limpiador del rastrillo
18	Características de eyección superficial de sólidos capturados	No retorno de sólidos al interior de la lumbrera
19	Tiempo de ciclo de limpieza	190 s
20	Capacidad de evacuación de sólidos capturados por el rastrillo	400 kg por cada ciclo de limpieza.
21	Capacidad de penetración de los dientes del rastrillo en los sólidos retenidos en la proximidad de la rejilla fija	Suficiente para evitar depósitos acumulativos
22	Límite inferior de la carrera descendente del rastrillo	90 mm
23	Limpieza al pie de rejilla	Completa, sin dejar depósitos acumulativos.
24	Detector de pérdidas de carga en la rejilla	Detector diferencial tipo ultrasonido, con emisor de pulsos ubicado en la losa superior de la lumbrera (2 incluidos)
25	Contacto entre dientes del rastrillo y los de la rejilla	No
26	Vida útil del sistema	100 000 horas, mínimo
27	Limpieza al pie de la rejilla	100 000 horas, mínimo
28	Gasto mínimo de rejillas	Cualesquiera que sean las condiciones de flujo mínimo en un momento dado
29	Gasto total de diseño	13.33 m ³ /s (condición normal, por rejilla)
30	Gasto total máximo aplicado por lumbrera	40 m ³ /s (condición transitoria, por rejilla).

31	Velocidad de aproximación en rejilla	0.65 m/s sin obturación 0.86 m/s obturada al 30%
32	Niveles de operación hidráulica de la lumbrera	Al nivel de operación: 5.60 m Al fondo del canal: 1.61 m
33	Claro entre barras de rejilla	51 mm
34	Altura de rejilla fija	5.70 m
35	Ancho de limpiado de rejillas	3 760 mm
36	Ancho efectivo del rastrillo	3 800 m
37	Pérdida de carga con flujo de diseño al paso a través de la rejilla limpia	Rejilla 0.007 m
38	Máxima pérdida de carga previa al funcionamiento del rastrillo de limpieza automática	25 cm de diferencia para las rejillas (desnivel entre aguas arriba y aguas abajo de la rejilla)
39	Mecanismo motriz del rastrillo	Motor eléctrico y reductor con freno, especificación IP 65
40	Puntos de engrase de elementos mecánicos	Accesible desde la superficie
41	Control de límite de carrera	Tanto en el punto superior como en el punto inferior de la carrera del rastrillo los límites de la carrera serán limitados por interruptores de proximidad.
42	Control de límites de terminación de trabajo (Estacionamiento del rastrillo)	Interruptor de proximidad.
43	Diseño de rastrillo (bolsa)	Perfil sin elementos salientes
44	Tipo de dientes de (bolsa)	Fijos formando parte integral del diseño del rastrillo y son intercambiables.
45	Protección contra elementos atascados y de sobrecarga o sobre par	Por medio de relevadores sensibles de corriente (CSR)
46	Canal guía vertical	Robusto adecuado para soportar esfuerzos mecánicos y carga de 400 kg
47	Características motor eléctrico de sistema de izamiento	Motor eléctrico de 3.00 kW Diseño B 3 Protección IP 65 aislamiento F
48	Características motor eléctrico de sistema de apertura y cierre del peine	Motor eléctrico de 1.5 kW Diseño B 3 Protección IP 65 aislamiento F
49	Elementos móviles auxiliares (en adición al rastrillo de limpieza) sumergidos en las aguas negras	Ninguno de los componentes móviles del sistema deberán permanecer por debajo de la superficie del agua. Solamente la cabeza del rastrillo de limpieza y el brazo del rastrillo deben entrar en contacto con el flujo del agua.
50	Diseño de la tolva de descarga y pared superior de ascensión	Robusta, servicio pesado para instalación inclinada. Fabricada en placa de acero inoxidable AISI 304 L y 5.0 mm de espesor.

51 Principales componentes del equipo para descarga de sólidos	Banda transportadora, tensores, rodillos (poleas), ejes, cojinetes, cuchilla de limpieza, bastidor, soportes, mecanismo motriz de la banda transportadora, faldas, limpiador de la banda y controles para operación.
52 Dimensiones de la tolva de descarga	Por fabricante (Contara con tolva en la descarga propia de la rejilla, tolva en la banda transportadora para el adecuado almacenamiento de los desechos durante su transporte, y tolva en la descarga, para remoción completa de la basura
53 Velocidad de la banda transportadora	0.5 m/s
54 Mecanismo limpiador de la banda transportadora	Localizado en el punto de descarga de la banda transportadora y tendrá una cuchilla limpiadora que podrá ser reemplazable
55 Materiales de fabricación del bastidor	Acero inoxidable AISI 304 L
56 Controles / Instrumentos de la banda transportadora	Los controles de operación de la banda transportadora será tal que su operación de arranque y pare sea coordinada con la operación de la rejilla de limpieza. La operación será totalmente automática y con dispositivos de seguridad para prevenir cualquier daño a la banda transportadora
57 Estación de control (LOCAL) del conjunto limpia rejas	Gabinete en acero inoxidable 304 L con protección IP 55 y un protector contra sol. Estación a prueba de intemperie, lluvia y polvo. Alimentación: 460 V/ 60 Hz corriente de entrada 9kW 20 A, interruptor principal de 32 A, control de voltaje de 24 V DC control de sonda ultrasónica, botón de emergencia. Control manual y mando automático, de la rejilla, control de la banda transportadora. Entrada para contactos de operación y señales de alarma para instalar por cuenta del cliente.

1.3 CÁLCULO DE LA PÉRDIDA DE CARGA EN LAS ESTRUCTURAS DE ENTRADA AL CÁRCAMO DE BOMBEO

Con el objeto de tener la certeza de que nivel se presentara en el cárcamo de bombeo, se determinan las pérdidas desde la Lumbrera L-6, que es la estructura de inicio y permitirá la evaluación de los niveles que determinaran los criterios de operación de la planta de bombeo.

1.3.1 Pérdida de Carga en la Salida de Lumbrera L-6

Se calcula la pérdida en la salida de la estructura de inicio del sistema de bombeo

$$H_f = \zeta \frac{V^2}{2g}$$

ζ =Factor de pérdida de carga = 0.34

V =Velocidad en Tubería de entrada rejillas de 5 m \varnothing

Velocidad en Tubería de 5 m \varnothing , a la entrada de la lumbrera de rejillas

$$Q = V * A$$

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{40}{\pi/4 * 5^2}$$

$$V_1 = 2.04 \text{ m/s}$$

$$H_f = 0.34 \frac{2.04^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.072 \text{ m}$$

1.3.2 Pérdida de Carga en la Entrada a Lumbrera Rejillas

Cálculo de la pérdidas en la entrada de la estructura de limpieza

$$H_f = \zeta \frac{V_1^2 - V_1^2}{2g}$$

ζ =Factor de pérdida de carga = 1.1

V_1 = Velocidad en Tubería de entrada rejillas de 5 m ϕ

V_2 = Velocidad entrada a la lumbrera de rejillas con un diámetro de 16 m

Velocidad en Tubería de entrada rejillas de 5 m ϕ

$$Q = V * A$$

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{20}{\pi/4 \times 5^2}$$

$$V_1 = 1.02 \text{ m/s}$$

Fondo de la lumbrera = 2 201.99 msnm

Nivel de agua para 20 m³/s = 2 222.05 msnm

Tirante hidráulico = 20.06 m

$$Q = V * A$$

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{20}{5 \times 20.06}$$

$$V_2 = 0.20 \text{ m/s}$$

La pérdida de carga en la entrada de la lumbrera es:

$$H_f = \zeta \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g}$$

$$H_f = 1.1 \frac{1.02^2 - 0.20^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.056 \text{ m}$$

1.3.3 Pérdida de Carga en la Rejilla

La pérdidas por fricción en las rejilla automática de limpieza es dada por la siguiente relación:

$$H_f = \zeta \text{ sen } \phi \quad \frac{T^{4/3}}{B^{4/3}} \frac{V^2}{2g}$$

H_f = Pérdida de carga en rejilla

ζ = Factor de pérdida de carga. Para rejilla rectangular es 2.42

\emptyset = Ángulo de la rejilla. La rejilla se instaló con un ángulo de 90°

T = Espesor barra de rejilla

B = Espacio libre entre barras de rejilla

V = Velocidad de aproximación a la rejilla

Velocidad de Aproximación a la Rejilla

Ancho del canal de la rejilla = 4.00 m

Altura de la rejilla = 5.75 m

$$Q = V * A$$

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{20}{4 \times 5.75}$$

$$V_1 = 0.87 \text{ m/s}$$

$$H_f = 2.42 \frac{51^{4/3}}{83^{4/3}} \frac{0.87^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.005 \text{ m}$$

1.3.4 Pérdida de Carga en la Compuerta

El paso del agua en la compuerta genera una pérdida equivalente a :

Ancho del canal = 4.0 m

Ancho de la compuerta = 3.5 m

Altura de la compuerta = 4.5 m

Factor de pérdida de carga = 0.29

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{20}{3.5 \times 4.5}$$

$$V = 1.27 \text{ m/s}$$

$$H_f = 0.29 \frac{2.04^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.024 \text{ m}$$

1.3.5 Pérdida de Carga a la Salida de la Lumbrera de Rejillas

A la salida de la estructura de limpieza la pérdida de carga se determina mediante el siguiente procedimiento:

Velocidad en Tubería de 5 m \varnothing , a la salida de la lumbrera de rejillas

$$Q = V * A$$

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{20}{\pi/4 \times 5^2}$$

$$V_1 = 1.02 \text{ m/s}$$

$$H_f = 0.34 \frac{1.02^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.018 \text{ m}$$

1.3.6 Pérdida de Carga a la Entrada del Cárcamo de Bombeo

$$H_f = \zeta \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$$

ζ =Factor de pérdida de carga = 1.1

V_1 =Velocidad en Tubería de salida de rejillas de 5 m \varnothing

V_2 =Velocidad entrada al cárcamo de bombeo con un diámetro de 16 m

Velocidad en Tubería de salida de rejillas de 5 m \varnothing

$$Q = V * A$$

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{20}{\pi/4 \times 5^2}$$

$$V_1 = 1.02 \text{ m/s}$$

Fondo del cárcamo = 2 198.00 msnm

Nivel de agua para 20 m³/s = 2 222.05 msnm

Tirante hidráulico = 24.05 m

$$Q = V * A$$

$$V_2 = \frac{Q}{A} = \frac{20}{5 \times 24.05}$$

$$V_2 = 0.17 \text{ m/s}$$

La pérdida de carga en la entrada de la lumbrera es:

$$H_f = \zeta \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g}$$

$$H_f = 1.1 \frac{1.02^2 - 0.17^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.057 \text{ m}$$

1.3.7 Pérdida de Carga de la Tubería de interconexión entre L-6 y Lumbrera Rejillas

Las pérdidas de energía por fricción en la tubería son:

Q	Gasto	lps
Pi	Constante	3.14159
A	Área	m ²
V	Velocidad	m/s
D	Diámetro	m
μ/g	Viscosidad cinemática	m ² /s
Re	Número de Reynolds	adimensional
ε	Rugosidad	m
H _f	Pérdidas por fricción	m
G	Aceleración de la Gravedad	9.8 m/s ²

Datos

Gasto = 40.00 m³/s

Longitud de la tubería = 16.30 m

Diámetro de la Tubería = 5.00 m

Cálculo de Pérdidas de Fricción en Tubería

$$Q = V * A$$

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{40}{\pi/4 \times 5^2}$$

$$V_1 = 2.04 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V \times D}{\mu/g}$$

$$Re = \frac{2.04 \times 5}{1 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 1.02 \text{ E} + 07$$

La Rugosidad relativa es:

$$\frac{e}{D} = \frac{0.00003}{5000} = 6 \text{ E} - 9$$

Del Diagrama de Moody:

$$f = 0.0121$$

Pérdidas en la Tubería:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$H_f = 0.0121 \frac{16.30}{5.00} \frac{2.04^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.008 \text{ m}$$

1.3.8 Pérdida de Carga en la Tubería entre Lumbrera de Rejillas y Cárcamo de Bombeo

Las pérdidas de energía por fricción en la Tubería son:

Datos

$$\text{Gasto} = 20.00 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Longitud de la tubería} = 20.00 \text{ m}$$

$$\text{Diámetro de la Tubería} = 5.00 \text{ m}$$

Cálculo de Perdidas de Fricción en Tubería

$$Q = V * A$$

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{20}{\pi/4 \times 5^2}$$

$$V_1 = 1.02 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V \times D}{\mu/g}$$

$$Re = \frac{1.02 \times 5}{1 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 5.09 \text{ E} + 06$$

La Rugosidad relativa es:

$$\frac{e}{D} = \frac{0.00003}{5000} = 6 \text{ E} - 9$$

Del Diagrama de Moody:

$$f = 0.0130$$

Pérdidas en la Tubería:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$H_f = 0.0130 \frac{20.00}{5.00} \frac{1.02^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.003 \text{ m}$$

1.3.9 Resumen de Pérdidas de Carga en la Estructura de Entrada

Pérdida carga en la salida de L – 6	0.072 m
Pérdida carga en la entrada a lumbrera rejillas	0.057 m
Pérdida carga en rejillas	0.005 m
Pérdida carga en compuertas	0.024 m
Pérdida de carga a la salida de la lumbrera de rejillas	0.072 m
Pérdida de carga a la entrada del cárcamo bombeo	0.057 m
Pérdida de carga de la tubería L-6 a la lumbrera rejillas	0.008 m
Pérdida de carga de la tubería entre lumbrera rejillas y cárcamo	0.003 m
Pérdidas totales en la estructura de llegada a cárcamo	0.295 m

En el desarrollo del cálculo de la pérdida de energía debida a la fricción, es importante hacer notar que se realiza para el gasto total, es decir, 40 m³/s se conducen entre la Lumbrera L-6 hasta la estructura de limpieza, ahí en dos de los tres canales, se divide el flujo en 20 m³/s por cada uno, hasta llega a los dos cárcamos de bombeo, con esa misma capacidad.

Para evitar la inundación en el punto más bajo de la zona metropolitana, se elige la obra de captación cercana midiendo la elevación de la banquetta y como criterio se toma la parta superior de la compuerta, que es 3 metros debajo de dicha banquetta. Este nivel es el que determina el nivel de agua máximo en el Cárcamo de Bombeo.

Estas consideraciones dan como resultado que se tenga la plena seguridad de que bajo todos los escenarios no se provoquen inundaciones en las vialidades.

En el arreglo geométrico de la estructura de limpieza se observa en la figura 1.2, viajando en el sentido del agua se diseña una mampara que tiene como objeto igualar el gasto en cada canal, pero conservando el espacio suficiente para que no

exista obturación de la basura. Al inicio de cada canal se diseña con unas canaletas que alojaran los obturadores tipo agujas, en caso de que las compuertas fallen. En cada canal el diseño contempla la utilización de dos compuertas que seccionan y dejan estanco el área de la rejilla, para darle mantenimiento o alguna reparación. También se encuentran las canaletas que permiten el uso de obturadores. Las dimensiones están consideradas tomando en cuenta el espacio requerido para operación y desmantelamiento de equipos en la parte superior y el compromiso de llevar un flujo estable en el interior de cada canal.

En la figura 1.3, se le da una visión en planta de los elementos constitutivos de la lumbrera de rejillas donde se colocan las rejillas tipo Irving para tener una visión al interior. En la parte final del canal intermedio existe una configuración que deriva la mitad del gasto a cada cárcamo de bombeo. Son importantes los accesos al interior de la estructura y se efectúa mediante dos escaleras al inicio y final de los canales, obteniendo una visión aguas arriba y debajo de la misma lumbrera.

Las rejillas tienen una altura de 6 metros, que se selecciona en función del tubo de llegada que es de 5 m de diámetro, para lo cual se considera un metro adicional por la obturación que se pueda presentar por la basura, y se describe en la figura 1.4.

Las compuertas están seleccionadas para tener el área adyacente a la rejilla libre de agua y estar en posibilidad de darle mantenimiento o cualquier reparación que se requiera. Es importante hacer notar, que en caso de una falla de operación o humana, en la cual se ponga en riesgo de inundación a la ciudad al estar obturados los canales, se encuentran en la parte superior unos huecos que sirven de vertedores, por lo que al llegar a los niveles altos, podría tener el desalojo del agua que entra a la planta de bombeo. Estos detalles se observan en la figura 1.5.

Es importante mencionar que el diseño de este tipo de compuertas de acuerdo a sus dimensiones, deben estar fabricadas con dos vástagos de izaje.

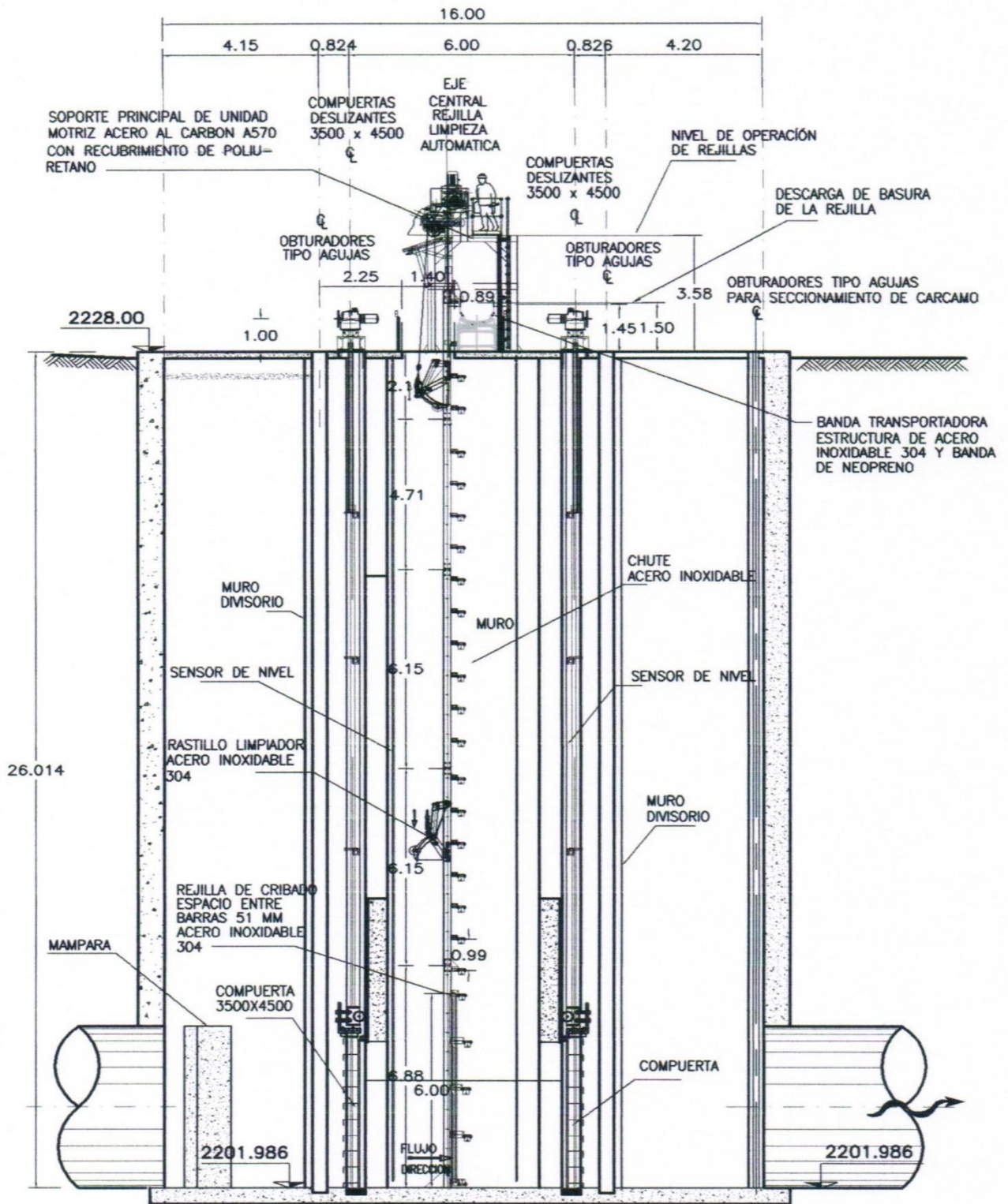


Figura 1.2 Lumbrera de Rejillas en Elevación

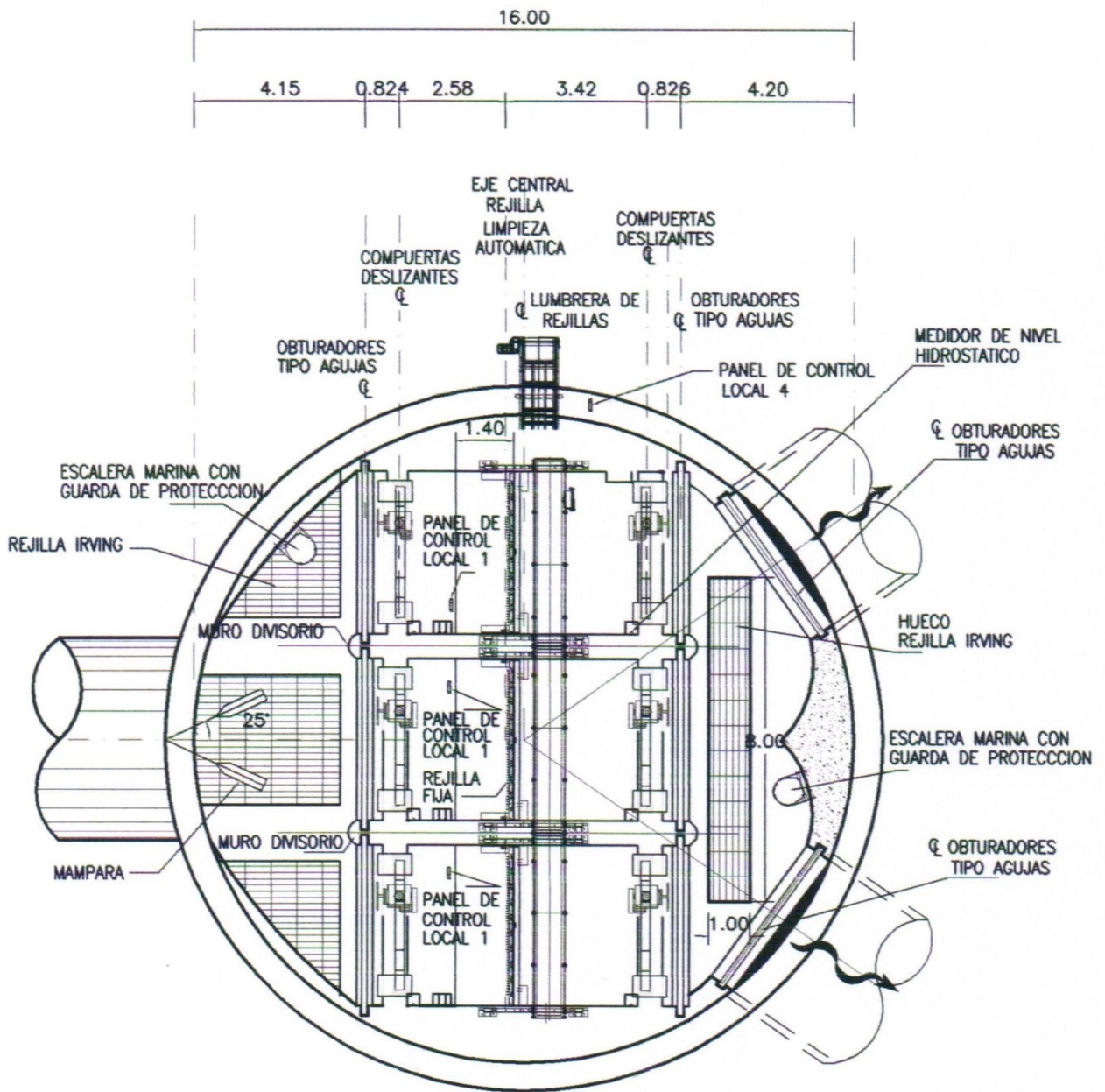


Figura 1.3 Lumbrera de Rejillas en Planta

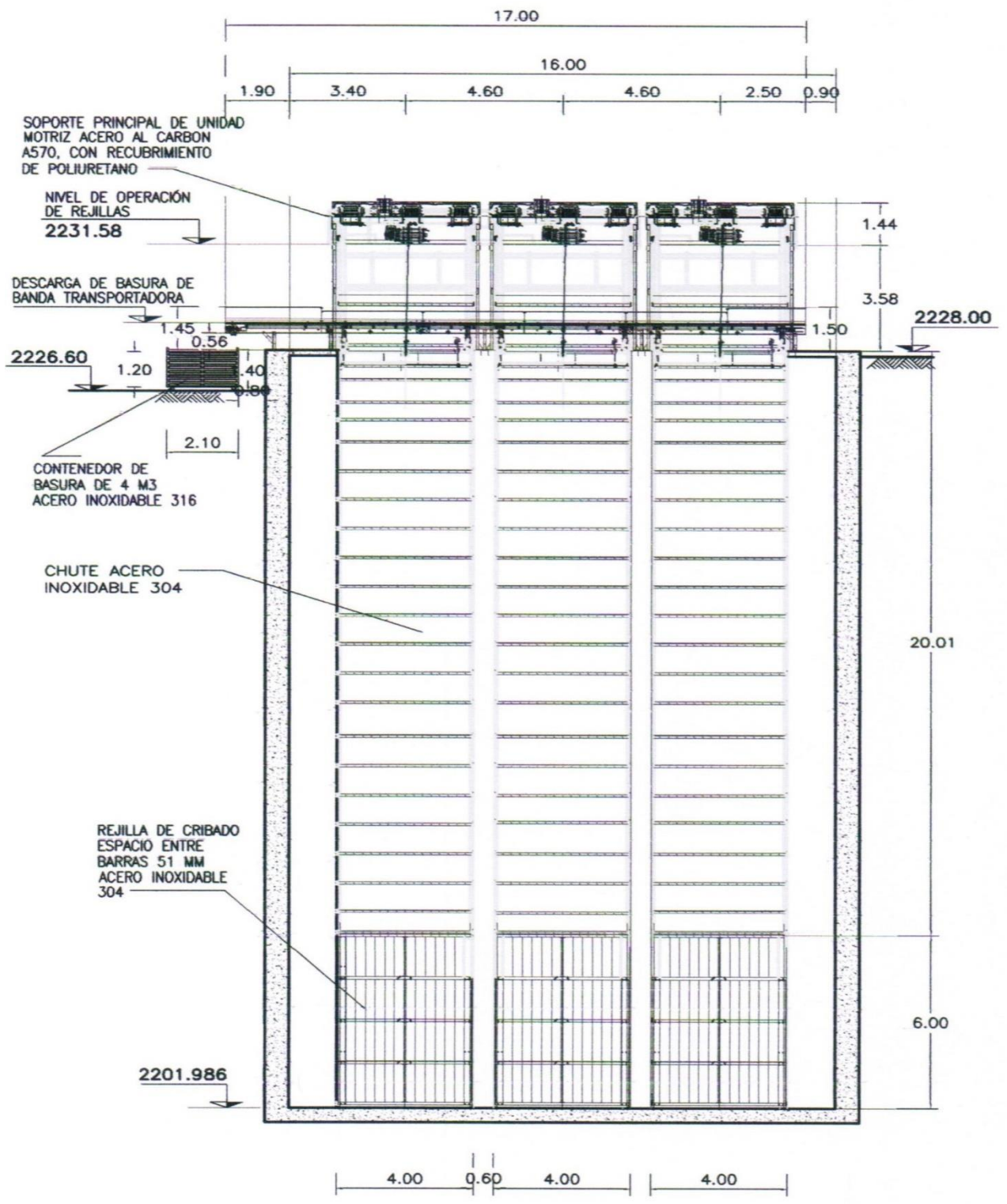


Figura 1.4 Rejillas Vista Frontal

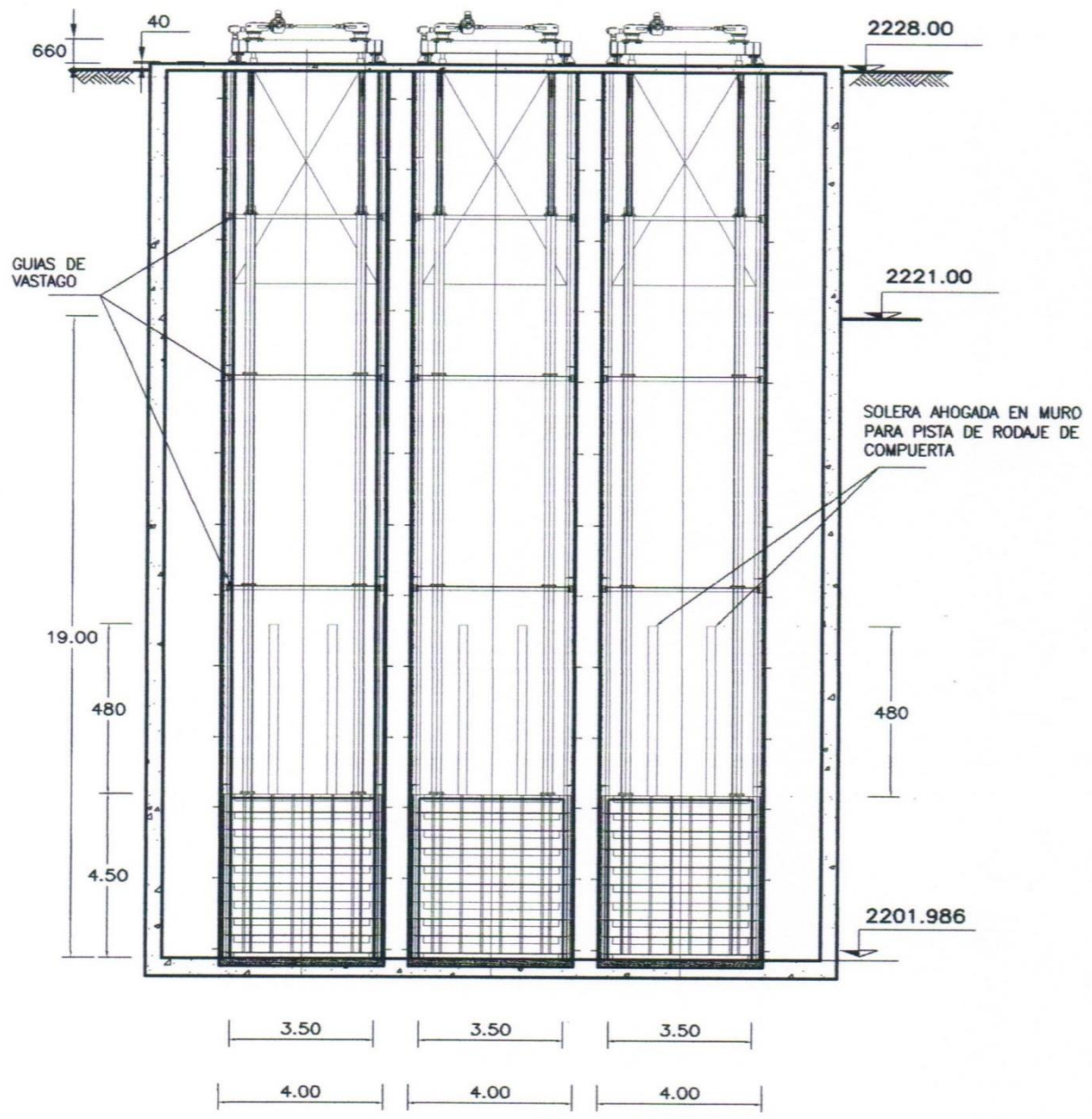


Figura 1.5 Compuertas Vista Frontal

CAPÍTULO 2

DISEÑO GEOMÉTRICO DEL CÁRCAMO DE BOMBEO

2.1 DISEÑO DEL CÁRCAMO

El diseño del cárcamo se hace de acuerdo a las recomendaciones de la extinta DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), actualmente SACM (Sistema de Aguas de la Ciudad de México), definiéndose las dimensiones esenciales en la cámara de bombeo, como son el ancho, longitud, distancia entre pared, fondo del cárcamo y campana de succión. El nivel de agua mínimo se establece tomando en cuenta los requerimientos antivórtice y de los márgenes mínimos entre el NPSH disponible de la instalación y el NPSH requerido por el equipo de bombeo, de tal forma que se asegure una operación libre de problemas, derivado como se dijo anteriormente de vórtices, remolinos o corrientes turbulentas.

Los parámetros a evitar en el diseño del cárcamo de bombeo son:

1. Subdimensionar compuertas, o canales de alimentación a la Planta de Bombeo.
2. Cambios abruptos en la dirección del flujo
3. Velocidades altas en la dirección del flujo, causadas por algún difusor con un ángulo pronunciado.
4. Fondo de cárcamos con escalones.
5. Vertedores sin la provisión de disipación de energía en la caída de este.
6. Columnas o guías que sobresalen a las paredes del cárcamo.
7. Cualquier modo de operación que contribuya a una distribución asimétrica del flujo en el interior del cárcamo de bombeo.
8. Entrada al cárcamo del tubo influente, arriba del nivel de agua.

La condición 1, 2, 3, 6 y 7 pueden causar vórtices en la campana de succión de la bomba. Entrada de aire y vórtices sumergidos pueden formarse en estos casos.

La condición 4, 5 y 8 produce generación de burbujas de aire, mientras que 3, 4 y 5 pueden causar flujo inestable dentro del cárcamo.

Resumiendo, podemos decir que el diseño del cárcamo se basa en proveer el almacenamiento del agua con buenas características de flujo hacia la bomba.

También se pueden mencionar otros parámetros que se consideran desfavorables y que no se permiten en el diseño del cárcamo de bombeo:

1. Flujos de alta velocidad que descarguen en un flujo sin movimiento o muy lento, provocando la formación de oleajes o la superposición de las ondas superficiales.
2. Velocidades de flujo mayor a 2 m/s.
3. Flujo inestable, con cambios bruscos de la velocidad, o caudal
4. Superficies libres de agua con ondas superficiales
5. Fluidos en caída libre
6. Cambio de áreas bruscas, que impliquen formación de remolinos o vórtices

Estas recomendaciones observadas para crear el diseño de la planta de bombeo, dan como resultado una operación hidráulicamente favorable, teniendo en cuenta los lineamientos de reglamentos internacionales tanto del HI como del BHRA, incluyendo las de reconocidos fabricantes como Sulzer o KSB.

Bajo estas consideraciones se elabora el diseño, que determina los gastos individuales de equipos de bombeo, eligiéndose de 2 m³/s y accionados mediante motor de combustión interna.

Estos motores se seleccionan con estas características, debido a que la planta solo tendrá alrededor de 500 horas de funcionamiento anuales, siendo su operación en los momentos donde existe lluvia considerable en la zona metropolitana.

El cárcamo de bombeo cuenta con una mampara amortiguadora, que provee a los equipos de un flujo estable, sin vórtices.

Cada equipo de bombeo, lleva su mampara divisoria, no adosada a la pared, con un espacio definido por las recomendaciones del HI, con sus cantos redondeados además de contar con una mampara antivórtice en la succión de la bomba, que sus dimensiones las determina el estudio hidráulico del cárcamo de bombeo mediante el modelo a escala.

Es importante mencionar que las paredes del cárcamo no deben ser pulidas o pintadas, ya que se reduce la fricción del agua con ellas y conduce al riesgo de formación de vórtices superficiales y sumergidos, recomendándose superficies con una rugosidad entre 1 a 3 mm.

2.2 MODELO HIDRAULICO

El objetivo de realizar las pruebas simulando el flujo de la Planta de Bombeo, en un modelo a escala, es ayudar a identificar la problemática que se pudiera presentar a través de vórtices o distribución de velocidades desiguales que pudieran presentarse en el funcionamiento bajo la filosofía de operación de la Planta.

Se puede tomar como el parámetro de decisión para la elección de efectuar un modelo a escala de una Planta de Bombeo, cuando uno o más de los siguientes criterios se cumplan.

1. El gasto bombeado por equipo mayor a $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ o $6.3 \text{ m}^3/\text{s}$ para la totalidad de la Planta de Bombeo.
2. Flujo asimétrico o no uniforme.

3. Operación alternada de los equipos de bombeo, en una planta con varios equipos de bombeo, que involucra cambios significativos en la dirección del flujo.
4. Cualquier Planta de Bombeo ya construida y que tiene problemas hidráulicos.

2.2.1 Objetivo

1. Evaluar las características de los patrones de flujo al interior del cárcamo de bombeo y determinar los problemas potenciales que puedan existir y que impacten de manera adversa al funcionamiento hidráulico del equipo de bombeo.
2. Desarrollar las modificaciones en el diseño e implementar las medidas correctivas que mitiguen o eliminen los problemas asociados con un patrón de flujo inadecuado.
3. Evaluar las condiciones de flujo en un amplio margen de niveles y equipos operando

2.2.2 Problemas Hidráulicos en el Equipo de Bombeo Derivado de un Mal Diseño del Cárcamo

El equipo de bombeo se diseña y es probado en sus características principales como es el gasto, carga, eficiencia, carga neta de succión positiva y potencia al freno, en un laboratorio de pruebas con una aproximación controlada de flujo a la succión del equipo, por lo que para preservar estas condiciones de trabajo, se requiere que se tenga similitud en tales características de flujo.

Cuando el equipo de bombeo no se le provee de las condiciones óptimas del flujo, el resultado es una disminución en la carga, gasto y eficiencia, aumento en la potencia consumida, hasta llegar a presentar fallas mecánicas derivadas de flujos no uniformes en la succión del equipo.

Fallas derivadas de diseños inadecuados conducen a un sinnúmero de problemas tales como entrada de aire, vórtices, distribución de velocidades que generan

vórtices y provocan turbulencia en el impulsor, teniendo como consecuencia una distribución desigual en la carga del impulsor y por lo tanto decremento del flujo, eficiencia, vibración y cavitación.

Un modelo físico es estudiado con el objeto de evaluar el nivel de las fluctuaciones de la turbulencia dentro de la campana de succión, o a su vez cambios en las presiones que a la vez están asociadas a las variaciones de la velocidad. Flujos con fluctuaciones de velocidad no son permitidos, ya que como se dijo anteriormente causan vibraciones que causan vibraciones y daños prematuros en todas las chumaceras del grupo motor-bomba. La prerotación de la vena líquida origina un choque al aproximarse al álabe del impulsor, ya que el ángulo de ataque es diferente al de diseño, teniendo como consecuencia la separación del flujo causando zonas de baja presión que son el resultado de áreas de cavitación.

La creación de vórtices es otro fenómeno que se identifica y se erradica en el estudio del modelo hidráulico. Los vórtices son flujos localizados formando un remolino en donde la velocidad en el ojo puede ser de tal magnitud que la presión caiga debajo de la presión de vapor del agua generando vapor. Se le llama vórtice superficial cuando su formación es en la superficie libre de agua y en el caso de que el vórtice se forme en el seno del fluido se llama vórtice sumergido, ambos pueden conducir el aire hasta la campana de succión del equipo teniendo como resultado cavitación, vibración y decremento en la capacidad de la bomba.

Como recomendación general se puede decir que habrá que considerar que cualquier fenómeno que tiene un efecto menor en el modelo puede tener un efecto considerablemente mayor en el cárcamo con dimensiones reales.

La formación de los vórtices en el modelo da una idea de que sucederá en la planta de bombeo real. En las plantas de bombeo es difícil detectar la formación de vórtices, sobre todo aquellos que son sumergidos. El criterio de diseño depende de la habilidad del diseñador, y varía dependiendo de las características del tipo de bomba y tamaño de la instalación.

2.3 CALCULO DE LAS DIMENSIONES DEL CARCAMO

De acuerdo a los lineamientos técnicos que han sido establecidos por la CONAGUA, la planta de bombeo Casa Colorada Profunda, será proyectada y construida para desalojar una capacidad nominal de 40.0 m³/s de aguas combinadas. También se ha establecido que por las condiciones de procedimientos constructivos, dimensiones de diámetro y altura esperada para las estructuras que alojaran los equipos de bombeo, estas sean de geometría circular, con esta premisa, se desarrollan los análisis y los diseños correspondientes a estos elementos. La capacidad de bombeo será proporcionada con el arreglo de dos módulos de bombas, contando cada módulo con 10 equipos.

Las bombas serán instaladas en dos cárcamos con geometría circular, de tal forma que con 2.0 m³/s de capacidad unitaria y con diez bombas, se obtenga la capacidad de 20.0 m³/s por modulo, entonces con la operación simultanea del total de los equipos de los dos módulos, dispondrá de un gasto total de bombeo de 40.0 m³/s. Asimismo, y de acuerdo a las condiciones mencionadas, las bombas por instalar, corresponden al tipo centrífuga vertical, las cuales serán accionadas por medio de motores de combustión interna a través de reductores de velocidad y flechas de transmisión tipo universal.

Por las condiciones que se han establecido, los cárcamos que alojaran las bombas corresponden a estructuras de concreto armado de geometría cilíndrica vertical, desplantadas bajo superficie, las cuales serán acondicionadas en su geometría interna, a fin de alcanzar condiciones hidráulicas que permitan que la incidencia del caudal hacia los equipos de bombeo sea la más adecuada y a la vez garantice condiciones operativas más eficientes. Como se indicó antes, la planta contara con dos módulos iguales por lo que el análisis y cálculo de los parámetros dimensionales que se presentan, rige para ambos cárcamos de bombeo. La geometría de los cárcamos de bombeo debe cumplir con ciertas condiciones establecidas por el Instituto de Hidráulica (Hydraulic Institute USA), recomendaciones de fabricantes de bombas y estudios experimentales realizados por otras instituciones, de tal forma

que con los resultados obtenidos, se logre la adecuada y eficiente operación de los equipos de bombeo.

En este sentido, cabe señalar que las recomendaciones y las magnitudes de la mayoría de los parámetros para la instalación de las bombas en cárcamos tipo húmedo indicadas por el Instituto de Hidráulica, corresponden a aplicaciones de geometrías rectangulares; sin embargo, modelos experimentales que se han realizado, han aplicado con cierta discreción estos parámetros en geometrías de cámaras de succión circulares en donde se aplican las similitudes hidráulicas, dinámicas y dimensionales con la aplicación de los modelos estudiados.

Con este antecedente, se continúa con la presentación del análisis geométrico e hidráulico de la Planta de Bombeo Casa Colorada Profunda. Dentro de las reglamentaciones y recomendaciones para el diseño de las geometrías y dimensiones del cárcamo de bombeo, se establecen, límites de energía cinética, dirección del flujo del caudal, elementos estructurales para la división de las celdas de las bombas, muro pantalla para disipar la energía hidráulica contenida en el agua y que perjudica la operación de las bombas; estos límites, finalmente se reflejan en garantías para evitar condiciones nocivas en la operación eficiente del sistema; condiciones originadas por la presencia de vórtices, cavitación, recirculación y fenómenos relacionados que influyen de forma negativa en el rendimiento hidromecánico del sistema de bombeo y que en condiciones operativas adversas ocasionarían daños y desgastes prematuros de los componentes de los equipos de bombeo.

De acuerdo a la capacidad nominal de la Planta de Bombeo Casa Colorada Profunda, el Instituto de Hidráulica, establece ciertos valores y parámetros dimensionales primarios que directamente relacionan la distribución y localización más adecuada de las bombas en el cárcamo de bombeo, de los cuales en forma particular se señalan los siguientes.

- ❖ Separación del centro de la bomba al muro posterior del cárcamo.
B=1194 mm; se establece 1200 mm.
- ❖ Distancia de separación entre el centro de dos bombas consecutivas.
S=2667 mm.
- ❖ Distancia de separación entre el fondo del cárcamo y la parte baja de la campana de succión de la bomba.
C=685 mm; se establece 650 mm.

También en el diseño del cárcamo, y en particular al diseño del muro amortiguador, es apropiado considerar las características del tubo de alimentaciones de caudal al propio cárcamo, el cual en este caso corresponde a 5.0 m, el cual está localizado a un nivel de plantilla de 2 201.986 msnm.

2.3.1 Diámetro del Cárcamo de Bombeo

Los lineamientos del proyecto han establecido el diámetro del cárcamo de 16.00 m, que será corroborado mediante el dimensionamiento seguido en este apartado; sin embargo, es de fundamental importancia la revisión en función de la capacidad de bombeo de 20.0 m³/s por cárcamo. El diámetro del cárcamo debe permitir alojar el total de los equipos de bombeo necesarios para proporcionar el gasto de diseño (20 m³/s); así mismo, debe admitir los elementos internos requeridos para acondicionar la dirección y energía del flujo de caudal a las celdas de succión de las bombas.

La revisión del diámetro del cárcamo propuesto, toma en consideración, como aspecto importante, el diámetro del tubo influente, el cual ha sido definido de 5.0 m en el proyecto del Tubo-Túnel y que precisamente alimentara la planta de bombeo Casa Colorada Profunda. También y en base a los estudios hidráulicos del túnel, se tiene que el cárcamo operara en sus condiciones normales con tirantes altos, provocando que el tubo influente de 5.0 m de diámetro trabaje hidráulicamente a presión o sea con carga hidrostática.

Bajo estas condiciones se determinan las condiciones hidrodinámicas que rigen en el tubo influente y que están relacionadas por la siguiente proporción hidráulica.

$$D = (4Q / \pi v)^{1/2} \quad [2.1]$$

Donde:

D= Diámetro del tubo, m

Q= Caudal influente, m³/s

v = Velocidad de flujo de caudal, m/s

Con objeto de disminuir la energía cinética del agua al llegar al cárcamo de bombeo, se ha determinado que las tuberías de interconexión entre la estructura de rejillas y los cárcamos, sea de concreto armado y de 5.0 m de diámetro.

Bajo esta condición y con la aplicación del principio de continuidad, se procede a revisar la velocidad del caudal a la llegada al cárcamo, considerando que el gasto es de 20.0 m³/s.

$$v = (4Q / \pi D^2)$$

$$v = (4 * 20 / \pi * 5^2)$$

$$v = 1.018 \text{ m / s}$$

La velocidad que prevalece en el tubo influente, para las condiciones de capacidad nominal de cada cárcamo de bombeo, es favorable para la distribución radial del caudal a las celdas individuales de las bombas.

Por otra parte, en el diámetro del cárcamo, en adición a las condiciones hidráulicas, se debe cumplir con los espacios que permitan los trabajos de operación y mantenimiento de los equipos de bombeo y de los componentes complementarios de los mismos de forma eficiente.

Tomando como base la geometría circular que se ha elegido, los equipos de bombeo, se colocaran distribuidos de forma radial al centro del propio cárcamo y sobre un círculo base que los mantenga en una posición favorable a las condiciones hidráulicas, a las condiciones de operación y a las condiciones de mantenimiento. Para este propósito, se determina que cada bomba, quede limitada por muros-mampara laterales los cuales en su conformación, también radial al centro del cárcamo, formen las celdas individuales de succión de cada bomba. La conformación de los elementos internos del cárcamo, se determina en congruencia también con el diámetro del cárcamo y así se establecen las geometrías y dimensiones de estos elementos internos, a fin de satisfacer las mejores condiciones hidráulicas para la operación satisfactoria de los equipos de bombeo.

Con esta filosofía, en lo siguiente se continua con la aplicación de un procedimiento analítico que permite determinar el diámetro del cárcamo y sus elementos internos, el cual combina los señalamientos del Instituto de HidraulicaHydraulic Institute de los Estados Unidos de Norte América y magnitudes de parámetros obtenidos en modelos hidráulicos a escala, realizados en el laboratorio experimental de la extinta DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Distrito Federal).

El modelo matemático que se aplica, señala la relación de parámetros para predeterminar el diámetro del cárcamo de bombeo; obviamente, el diámetro final también relaciona aspectos físicos y aspectos de procedimientos constructivos más favorables acorde a los estudios geotécnicos correspondientes.

$$DIC = \frac{1}{\Pi} [NB(SB + EM) + DC + 2EP] + 2B \quad [2.2]$$

Donde:

DIC = Diámetro del cárcamo, m.

NB = Número de bombas.

SB = Separación entre dos bombas, m.

EM = Espesor de mampara, m.

DC = Diámetro del colector Influyente al cárcamo de bombas, m.

EP = Espesor de pantalla o muro amortiguador, m.

B = Separación de centro de bomba a muro posterior, m.

Datos:

NB = 10

SB = 2.667 m

EM = 0.40 m

DC = 5.0 m

EP = 0.50 m

B = 1.194 m

$\Pi = 3.141592654$

Substituyendo valores se tiene:

$$DIC = \frac{1}{\Pi} [10(2667 + 400) + 5000 + 2(500)] + 2(1194)$$

$$DIC = 14060mm = 14.060m$$

$$DIC = 14.060m$$

Los valores anotados para los espesores del muro amortiguador y para las mamparas, puede variar ya que estos son determinados en el diseño estructural; sin embargo, el posible ajuste en estos espesores, no tendrá impacto sobre el diámetro pre calculado del cárcamo. En base al diámetro calculado, procedimientos constructivos, condiciones de operación y condiciones de mantenimiento, se establece que el cárcamo debe tener un diámetro de diseño de 16.00 m.

En la figura 2.1 se muestra de forma detallada los elementos constitutivos del cárcamo de bombeo, del cual se va a determinar las dimensiones y geometría interior, tomando en consideración que la campana de succión del equipo será el factor importante en el diseño. Cabe aclarar que las dimensiones de los equipos en la parte superior, es decir, en la losa del cárcamo o lumbrera también serán otro parámetro de análisis ya que debe existir el espacio suficiente para maniobras de operación y de mantenimiento.

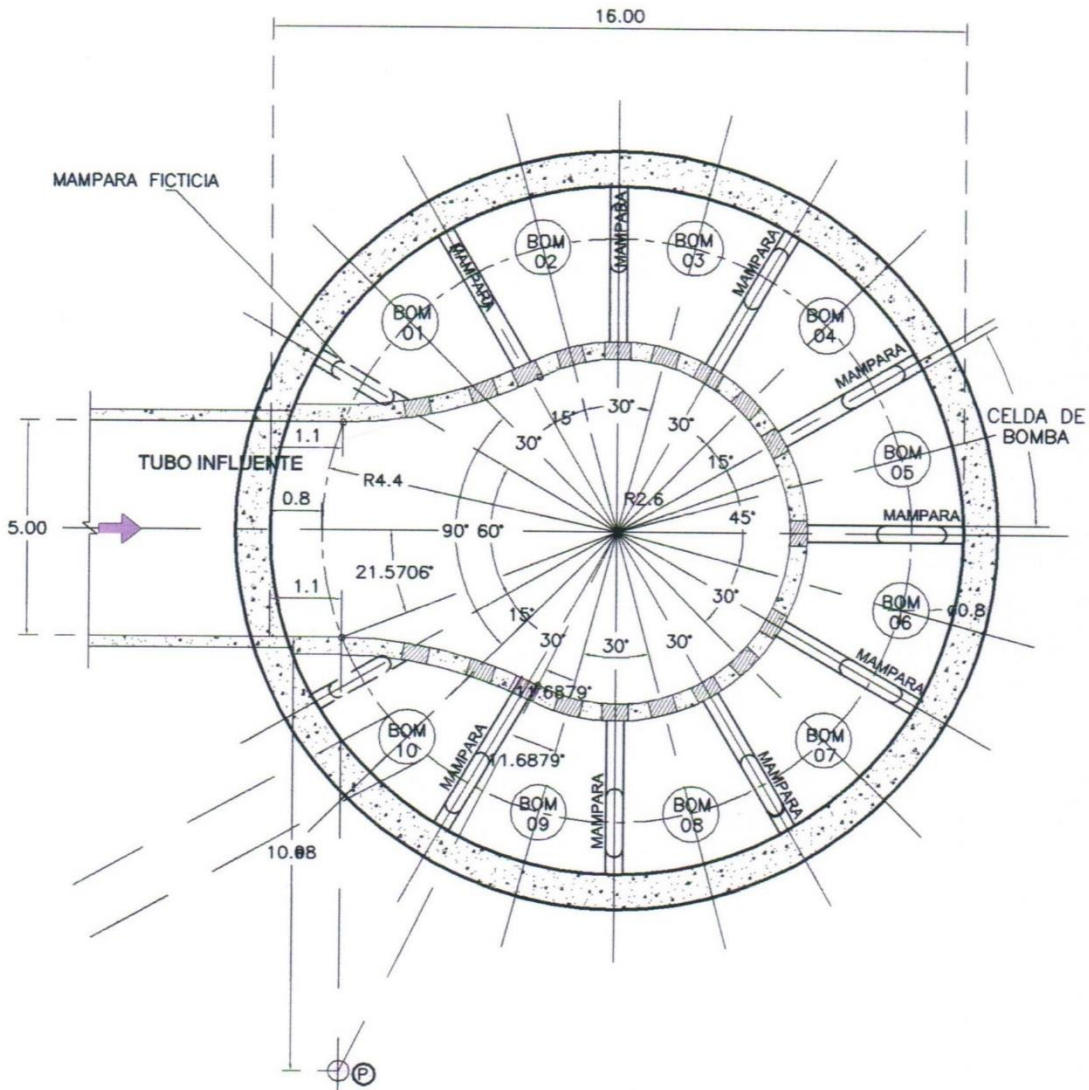


Figura No. 2.1 Geometría Interior del Cárcamo de Bombeo

2.3.2 Diseño del Muro Amortiguador

Con objeto de disminuir la energía cinética contenida en el agua influente al cárcamo y distribuir de forma proporcional el caudal a las bombas, se incluye en el interior del cárcamo un muro pantalla, este es de geometría circular, concéntrico al diámetro del cárcamo y se une en sus extremos con el tubo influente al cárcamo de bombeo (de 5.00 m de diámetro). La distribución de caudal hacia las bombas, se lleva a cabo a través de huecos localizados en el muro amortiguador y con centro en los ejes radiales de las bombas y mamparas.

De acuerdo a las recomendaciones para sus dimensiones, el muro amortiguador, debe cumplir con las siguientes condiciones de proporción:

$$1. \quad \text{RAP} \leq 0.63\text{RB}$$

Donde:

RAP = Radio interior de muro amortiguador

RB = Radio del círculo base del centro de bombas

Sustituyendo

$$\text{RB} = 6.80 \text{ m.}$$

$$\text{RAP} \leq 4.28 \text{ m}$$

$$2. \quad \text{RAP} \geq 0.5 \text{ DC ;}$$

Donde:

RAP = Radio interior de muro amortiguador

DC = Diámetro del tubo influente = 5 m

Sustituyendo:

$$\text{RAP} \geq 2.50 \text{ m.}$$

$$3. \quad RAP \geq \frac{Q}{1.3(H_{\min} + \Delta y)}$$

Donde:

RAP = Radio interior de muro amortiguador

Q = Capacidad nominal de bombeo por modulo (20 m³/s).

H_{min} = Tirante de agua en el cárcamo al nivel mínimo de bombeo.

Δy = Caída de presión en el paso de caudal por los huecos del muro amortiguador.

Sustituyendo:

$$H_{\min} = 4.6 \text{ m}$$

La caída de presión Δy, se obtiene de la siguiente ecuación:

Donde:

Δy= Caída de presión, m.

g = Constante de gravedad, m/s².

V_o = Velocidad promedio en el orificio, m/s.

C_d = Coeficiente de descarga, sin dimensiones.

$$\Delta y = \frac{1}{2} g \left(\frac{V_o}{C_d} \right)^2$$

Datos:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2.$$

$$V_o = 0.93 \text{ m/s.}$$

$$C_d = 0.48$$

Sustituyendo:

$$\Delta y = 1/2 * 9.81 (0.93 / 0.48)^2$$

$$\Delta y = 0.19 \text{ m}$$

$$RAP \geq \frac{20}{1.3(4.6 + 0.19)}$$

Por lo que:

$$RAP \geq 3.212 \text{ m}$$

2.3.3 Criterios para Dimensionar el Muro Amortiguador

De acuerdo con los resultados anteriores del cálculo, el muro amortiguador debe tener un radio mayor a 3.21 m y menor a 4.28 m por lo que se determina un radio de 4.0 m para aplicación en el proyecto. Como se indicó antes, los equipos de bombeo se colocaran de forma radial al centro del cárcamo. De acuerdo al análisis de distribución, a la cantidad de equipos y a las condiciones funcionales, se ha establecido ubicar las bombas a una separación angular entre ellas de 30°.

También y por condiciones de mantenimiento la distancia del paño interior del muro pantalla de energía al centro de las bombas corresponde a 2.8 m, y se toma teniendo en consideración a las acciones de mantenimiento en donde, previo al achique del cárcamo el personal deba realizar inspección o reparaciones civiles en la zona baja del cárcamo.

El muro dissipador de energía, para cumplir su función y distribuir equitativamente el caudal a las celdas de las bombas, con velocidades apropiadas, integrara ventanas localizadas estratégicamente y de acuerdo a las recomendaciones de los modelos experimentales de cárcamos a escala realizados por la extinta DGCOH.

Por lo que el muro pantalla, para alojar las ventanas de comunicación de flujo, de una dimensión tal que en cantidad suficiente puedan mantener las velocidades de transito de caudal próximas a 1.0 m/s.

De acuerdo a los cálculos, el muro amortiguador debe tener un radio mayor a 3.34 m y menor a 4.28 m; se establece para proyecto, 4.0 m.

De acuerdo a las condiciones y cálculo señalados, se reitera el diámetro del cárcamo corresponde a:

$$DIC = (4.00 + 2.80 + 1.20) \times 2$$

$$DIC = 16.0 \text{ m}$$

Diámetro que queda establecido como definitivo para la ejecución del proyecto estructural y ejecución de la obra de la Planta de Bombeo Casa Colorada Profunda.

Atendiendo a las recomendaciones de los resultados experimentales para la distribución de caudal a las bombas, y atendiendo a las recomendaciones para la localización de áreas de flujo tributarias para la alimentación de caudal a cada bomba, se han establecido y distribuido los huecos tal como se ilustra en la figura 2.2. Esta figura ilustra el muro amortiguador completo: es decir, la parte circular concéntrica al cárcamo, la curvatura de transición y la parte recta que conecta con el muro del cárcamo. Se espera que las bombas 10 y 1, operen de forma satisfactoria ya que el modelo experimental de referencia también ubica bombas en la zona de transición.

En condiciones operativas iniciales y transitorias se considera el caudal se distribuye radialmente a los equipos de bombeo de forma desigual por la dirección de incidencia del flujo del túnel en relación a la localización radial de los huecos en el muro amortiguador; sin embargo, cuando las celdas de succión alcanzan su nivel, se estabiliza el flujo, esto por las condiciones hidráulicas del túnel y la capacidad

unitaria de las bombas; se establece un tirante de agua en el interior del muro amortiguador, estabilizando la uniformidad y proporcionalidad de distribución de caudal a cada celda de succión de las bombas, incluyendo las que se encuentran más alejada al eje de incidencia del caudal influente con lo cual se garantiza la operación uniforme del total de las bombas consideradas en el cárcamo de bombeo.

También se incluye en planta, la representación de localización de las ventanas de flujo hacia las celdas de bombas, las cuales, coinciden con los ejes que corresponden a la localización de las bombas y a la localización de las mamparas divisorias. La separación angular entre centros de mamparas corresponde a 30 grados, igual ángulo de la separación entre bombas asimismo, la separación angular entre ejes de bomba y mamparas corresponde a quince grados.

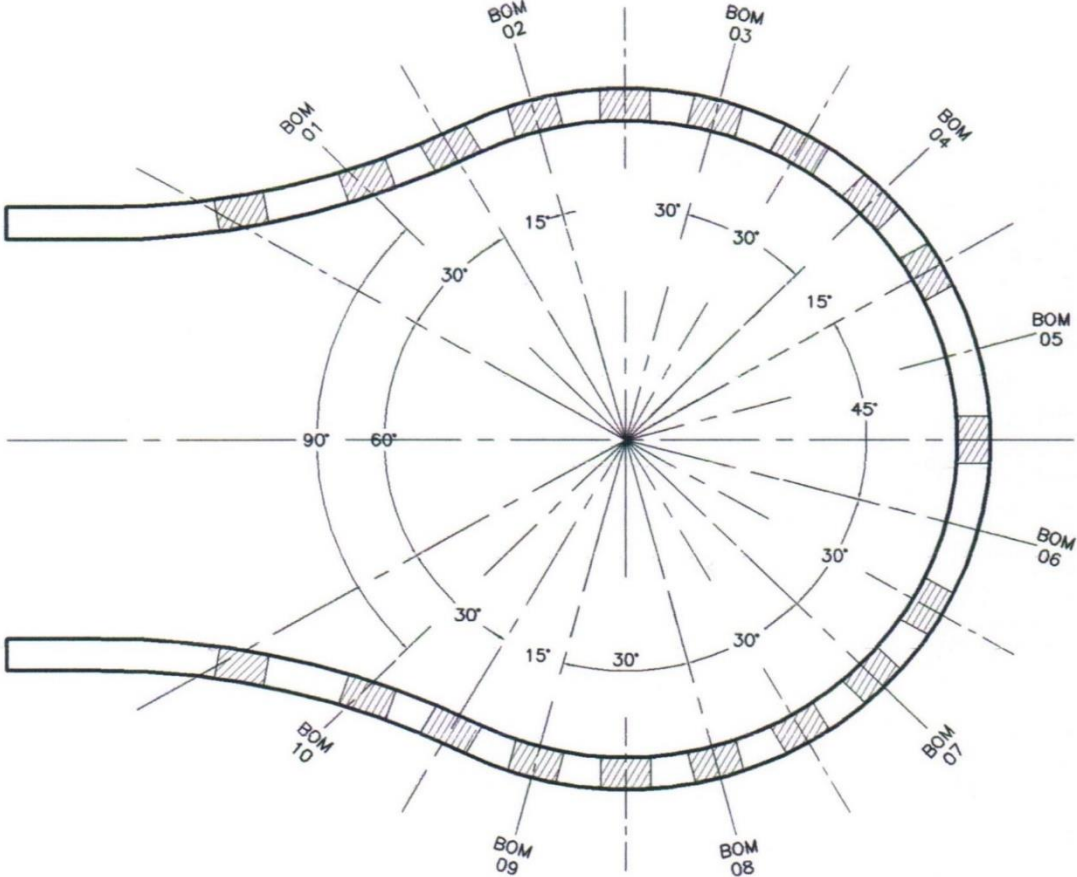


Figura No. 2.2 Muro Amortiguador-Vista en Planta

También y en atención a la distribución tributaria de áreas de flujo, se ha establecido que en el muro amortiguador de energía hidráulica se localicen 59 huecos. El número elegido de orificios y el caudal nominal de bombeo, determina la velocidad recomendada a las celdas de succión. La localización obedece a las recomendaciones del Manual de Diseño Hidráulico de Plantas de bombeo de Cárcamo Circular, de la extinta DGCOH. El corte se presenta en la Fig. 2.3.

$$\text{Ancho} = a = 0.60 \text{ m}$$

$$\text{Alto} = b = 0.60 \text{ m}$$

Con estas dimensiones se tiene la siguiente área unitaria de flujo.

$$Au = a * b$$

$$Au = 0.60 * 0.60$$

$$Au = 0.36m^2$$

Considerando que se contara con 59 huecos, la velocidad promedio de flujo hacia las celdas de las bombas corresponde a:

$$v = \frac{q}{a}$$

Donde:

v = Velocidad media de flujo, m/s.

q = Caudal nominal de bombeo, m³/s

a = Área total de flujo de caudal, m² (0.36 x 59) = 21.24 m

$$v = \frac{20}{21.24}$$

$$v = 0.94 \text{ m/s}$$

El área total de flujo hacia la celda de bombas, corresponde a la suma parcial del área unitaria de los orificios localizados en el muro amortiguador; es decir, $0.36 \text{ m}^2 \times 59$.

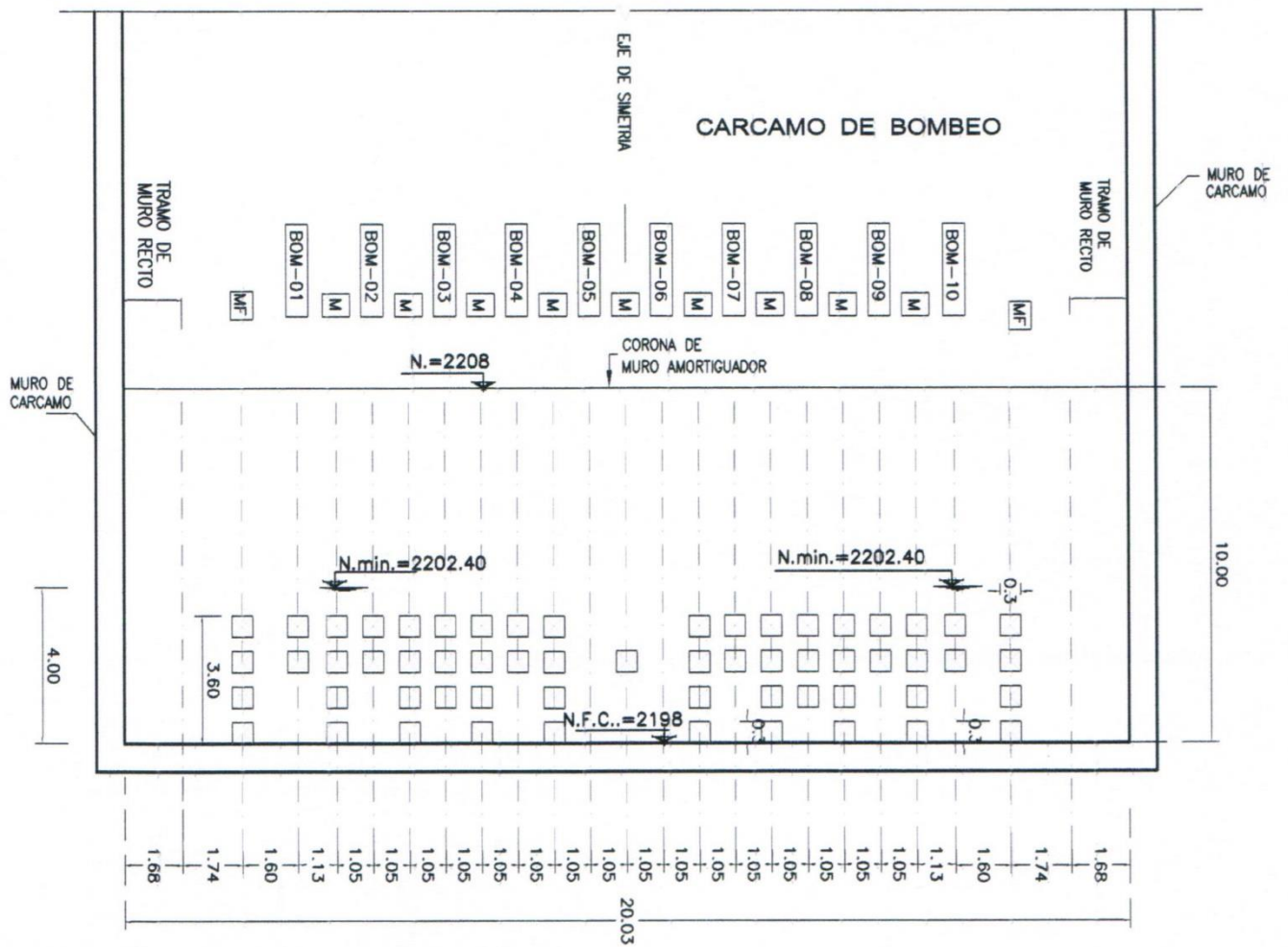


Figura No. 2.3 Desarrollo de Muro Amortiguador

2.3.4 Altura del Muro Amortiguador

La condición operativa de los huecos de paso de flujo de caudal hacia las bombas requiere que para cualquier condición de bombeo, estos trabajen sumergidos.

La altura recomendada para el muro amortiguador corresponde a:

$$H = H_d * 1.05 \quad [2.3]$$

Donde:

H = Altura recomendada del muro amortiguador

H_d = Nivel medio de operación

Sustituyendo:

$$H = 4.40 * 1.05$$

$$H = 4.62m$$

En la determinación de la altura del muro amortiguador, se debe tener presente la posición relativa del tubo influente respecto al nivel de corona del propio muro. De tal forma que la altura del muro absorba las sobre elevaciones del oleaje del flujo producido al choque con el muro el cual alcanza su mayor valor en el lado opuesto a la incidencia del tubo influente.

Como resultado de este análisis, se ha determinado que el muro amortiguador tenga una altura de 10.0 m a partir del fondo del cárcamo.

2.3.5 Análisis y Dimensiones de Mamparas Divisorias de Celdas

Como se ha mencionado antes en este rubro, las mamparas, son elementos estructurales localizados radiales al centro del cárcamo y su función primordial

corresponde a la formación de las celdas individuales de succión de las bombas. Se recomienda la utilización de mamparas en el interior del cárcamo por el Instituto de Hidráulica, y tienen como función evitar la formación de vórtices en la succión del equipo de bombeo. Es importante aclarar que su geometría obliga a tener una separación del muro interior del cárcamo de bombeo, permitiendo la comunicación de cada celda individual de la campana de succión.

La rigidez desde el punto de vista estructural está dada por la unión al muro amortiguador su parte superior, ya no interfiriendo con las condiciones hidráulicas en la succión.

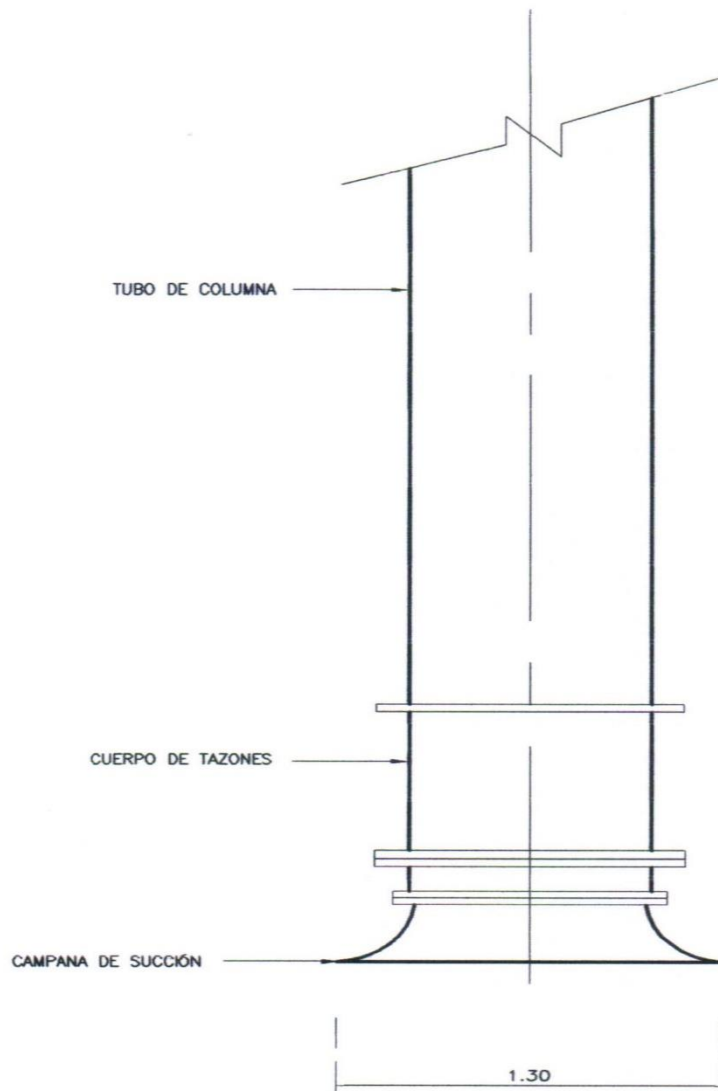


Figura 2.4 Dimensiones de la Campana de Succión de la Bomba

Fundamentalmente el tamaño de las mamparas obedece a la posición del centro de las bombas respecto al centro del cárcamo y el diámetro de la campana de succión de las mismas, que se indica en la figura No. 2.4.

Las dimensiones y la altura de las mamparas deben satisfacer ciertas condiciones dimensionales que se sujetan a las siguientes relaciones:

$$L = B + \frac{d}{2} \quad [2.4]$$

Donde:

L = Longitud de la mampara, mm

B = Separación del centro de la bomba al muro posterior a la incidencia del flujo, mm

d = Diámetro de la campana de la bomba, mm

Sustituyendo:

$$L = 1200 + \frac{1295}{2}$$

$$L = 1842.5 \text{ mm}$$

Se establece un valor de 2000 mm para la longitud de la mampara

También y para satisfacer las condiciones de recirculación de caudal en la parte posterior de la mampara, se considera un hueco (ventana) entre la parte posterior del cuerpo de la mampara y el muro del cárcamo, este hueco debe tener la siguientes dimensiones.

Fondo = Espesor de la mampara, m

Ancho = $a_m = 0.20 L$

Por tanto:

$$a_m = 0.20 * 2.0$$

$$a_m = 0.40 \text{ m}$$

Altura de la Mampara:

En el diseño del cárcamo se considera que la altura del muro sea un metro arriba de la clave del tubo influente, para evitar turbulencias inadecuadas, es decir 10.0 m. La altura mínima recomendable será regido por el nivel mínimo del agua.

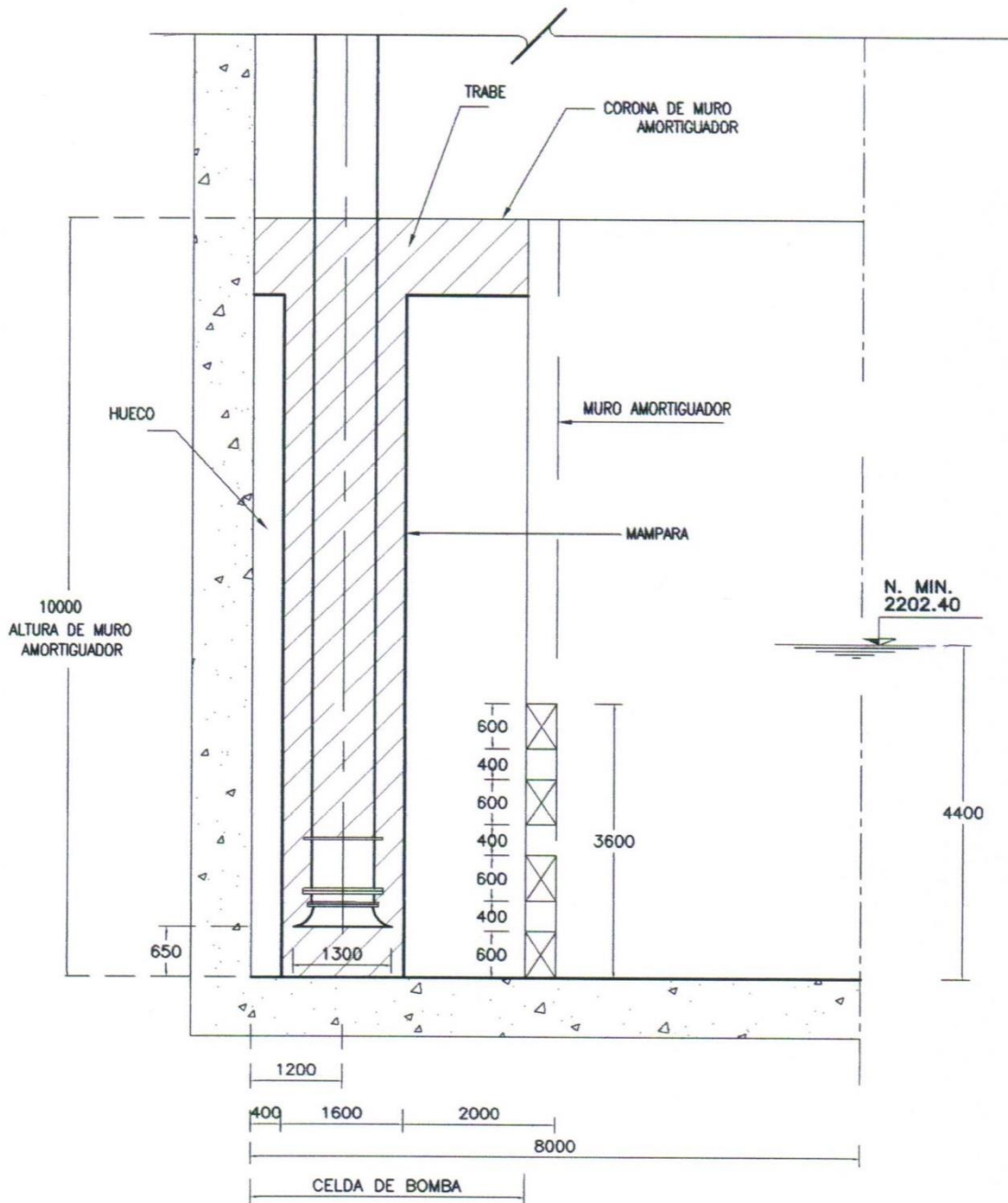


Figura No. 2.5 Celda del Equipo de Bombeo

Para ilustrar lo antes mencionado, se presenta el esquema en elevación las dimensiones de las mamparas en el interior del cárcamo de bombeo, en la figura No. 2.5 y 2.6 así mismo, se indica que las ventanas de paso de flujo en el muro amortiguador de energía tienen una dimensión de 0.60 m por 0.60 m.

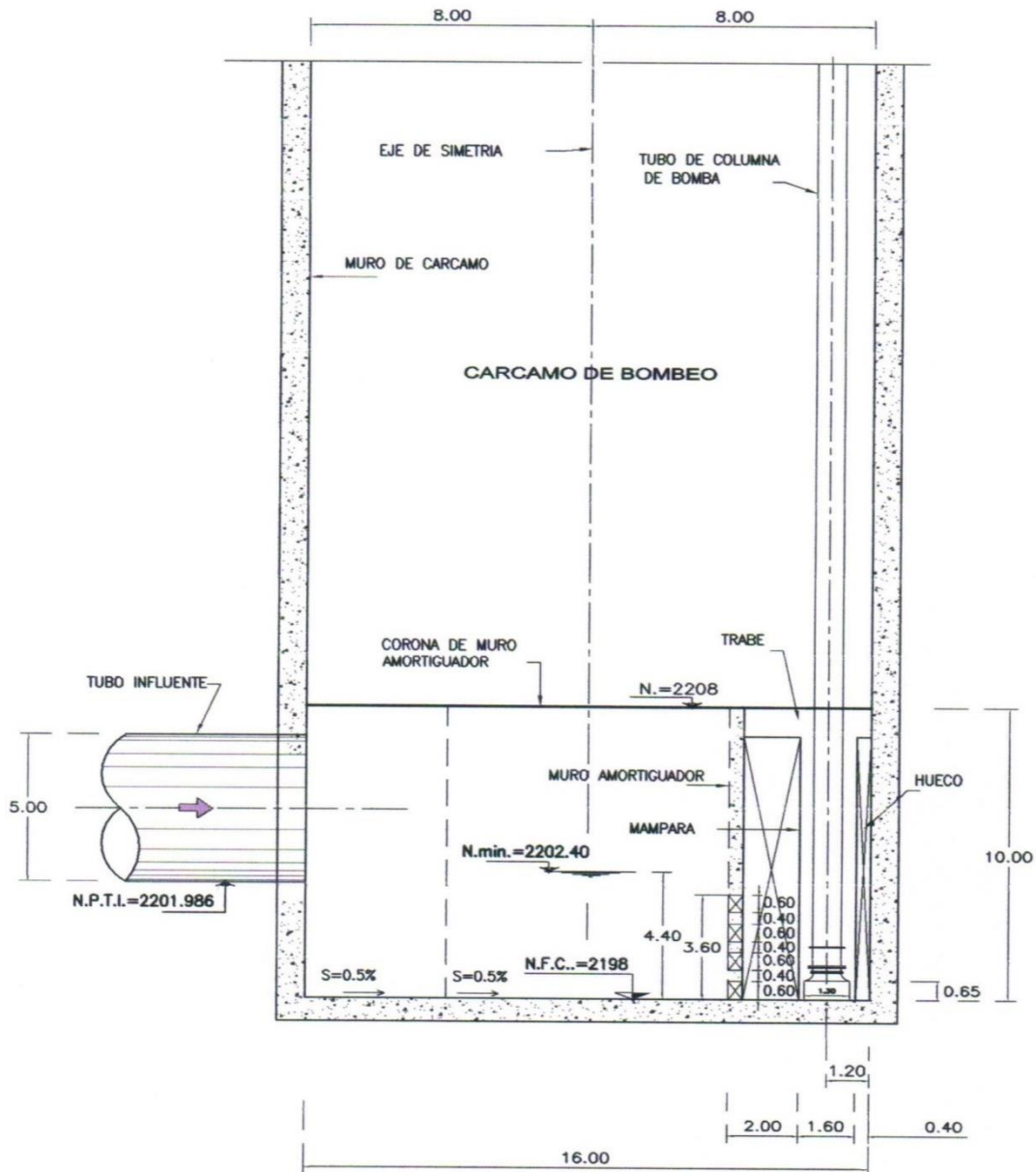


Figura No. 2.6 Geometría Interior de Cárcamo de Bombeo

Se consideró una pendiente del 0.5% en la zona del muro amortiguador y de 5% en las celdas de succión de bombas. Cabe aclarar que se contara en esta zona con un sistema para remoción de azolve en el cárcamo, mediante unas bombas slurry.

CAPÍTULO 3

CALCULO DE LA CARGA DINAMICA TOTAL DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO

3.1 CONDICIONES GENERALES DE DISEÑO DE LA PLANTA DE BOMBEO

La Planta de Bombeo Casa Colorada Profunda es parte integral del Proyecto de Saneamiento del Valle de México y del Sistema de Regulación Casa Colorada, del cual ya se tiene construido el túnel interceptor río de Los Remedios y finaliza en la lumbrera L-6. El sistema permitirá regulación de los escurrimientos pluviales de las zonas centro y sur del Valle, zona sur – oriente e interconectar los cauces y lagunas del oriente de la zona metropolitana con los de la parte central, con lo que podrá disminuir los riesgos de inundaciones en el Valle de México. Esta Planta de Bombeo funcionará con un servicio de bombeo intermitente, de los volúmenes hidráulicos excedentes de la infraestructura actual del sistema de drenaje profundo de la zona metropolitana de la Ciudad de México. La capacidad máxima de operación será $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$, la cual se enviará a la laguna de regulación Casa Colorada, con capacidad aproximada de $3\,750\,000 \text{ m}^3$.

Bajo la consideración de poder desalojar el agua cuando el drenaje profundo de la Ciudad de México llega a tener niveles de funcionamiento altos, esta planta se diseña en función de esa necesidad. La estación de bombeo tiene un esquema de accionamiento mediante motores de combustión interna con capacidad de desalojo de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua negra cruda séptica, contemplando captación hidráulica en lumbrera No. 6 del túnel interceptor río Los Remedios y descarga a la laguna de regulación Casa Colorada, ubicada en la zona federal del lago de Texcoco. Así mismo el diseño incluye la posibilidad de captar el agua del Dren General del Valle a una estructura de caída adosada a la parte interior de la mencionada lumbrera L-6, con capacidad de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua residual y posibilita, mediante acción de bombeo, traspasar a la laguna las aportaciones hidráulicas del Dren General. Finalmente el desagüe sur de la laguna de regulación, a través de la lumbrera 6, se

entregará al túnel semiprofundo Los Remedios con característica flujo inverso, permitiendo disposición futura definitiva en el Emisor Central (EC) y el Túnel Emisor del Oriente (TEO), observando las estructuras de descarga a EC y TEO.

El nivel en el cárcamo está asociado a la elevación de agua en si interior y la velocidad de operación del motor diésel, situación que se resuelve con la variación de la velocidad de la bomba de forma automática, con respaldo manual en adición al arreglo de sifón controlado y motor diésel. Es importante mencionar que debido a la utilización de motores de combustión interna, se podrá obtener la ventaja de variar la velocidad, para mantener el gasto constante de 2 000 lps, con sus diferentes niveles de operación, derivado de las características de la lluvia en el Distrito Federal y Zona Conurbada.

Los niveles de operación que se toman en cuenta para calcular la carga dinámica total, será la elevación 2 221.28 msnm como nivel máximo extraordinario (NAME). Por otra parte el nivel mínimo (NAMIN) será la elevación 2 204.63 msnm, es decir una variación de 16.65 m. Esta condición, después de efectuar el análisis se llega a concluir la operación del equipo será a gasto constante y la variación de carga se logra variando la velocidad de operación del equipo de bombeo, conservando los requerimientos de la carga neta de succión positiva (NPSH) constantes, así como el punto de operación muy cercano al punto de máxima eficiencia.

La carga dinámica total a nivel mínimo es de 25.16 mca y una velocidad de operación de 690 rpm, mientras que la carga a nivel máximo de 11.02 mca la velocidad requerida será de 551 rpm. Para lograr esta velocidad en el equipo de bombeo, se requiere un cabezal engranado que tenga una relación 5:2, lo cual implica que tenga una variación el motor de 1725 a 1377.5 rpm, para la carga dinámica total mínima.

En condición crítica de operación el equipo puede funcionar sin ningún problema a la elevación 2 203 msnm, como en el cálculo se demuestra, para lo cual el equipo

de bombeo trabajara a con una carga dinámica total de 26.80 mca, a una velocidad de operación del equipo de bombeo de 701 rpm y una velocidad del motor diésel de 1 753 rpm Los cálculos de la potencia del motor se efectuaran con esta condición de operación crítica, sin embargo las condiciones de operación a niveles más altos, tendrá una potencia menor a este punto más desfavorable, por lo que al satisfacer la potencia máxima los demás puntos quedan cubiertos.

Cabe aclarar que para verificar que el nivel máximo de agua en el cárcamo de bombeo no exceda la cota de plantilla de la obra de toma que está localizada en la elevación 2 221.307 msnm se realiza el levantamiento topográfico, cumpliendo con las previsiones que se tienen para evitar inundaciones según el Estudio Integral del Sistema Principal del Drenaje de la Zona Metropolitana del Valle de México y Conceptualización Geométrica e Hidráulica de las Captaciones al Túnel Emisor Oriente, donde se define que la Planta de Bombeo Casa Colorada operará desde los niveles ubicados dentro del tubo interceptor Río de los Remedios, hasta un nivel máximo localizado en esta obra de toma, por lo que el estudio cumple con estas condiciones al conceptualizar que la elevación 2 221.28 msnm de superficie libre de agua conceptualizada como nivel máximo (NAME) y como nivel mínimo (NAMIN) la elevación 2 204.63 msnm. Los niveles que se tienen de proyecto en la estructura del cárcamo de bombeo y obra de toma, son los siguientes:

1. Fondo de cárcamo de bombeo: 2 198.00 msnm
2. Elevación de la plantilla del conducto a la llegada al cárcamo: 2 201.29 msnm.
3. Elevación de la clave del tubo: 2 206.29 msnm
4. Elevación del piso de operación de la planta de bombeo: 2 228 msnm.
5. Elevación de la obra de toma (Av. Central): 2 221.307 msnm.

Dadas las condiciones de lluvia presentes en la Zona Metropolitana del Valle de México, se deberá considerar que cuando se genere la necesidad de poner en operación la planta de bombeo, se considere el arranque de los motores diesel, en

su totalidad, por cárcamo de bombeo, con el objeto de tener la plena seguridad del arranque, ya que el tiempo de respuesta debe ser inmediato, porque los periodos en los cuales estará bombeando, será en intervalos desde 40 a 105 minutos, que es el lapso de trabajo obtenido en la simulación. Esta forma de operación, aliviara la gran concentración de gasto presentes en el sistema del drenaje profundo.

El pre lubricado de la bomba y operar el motor diésel en vacío permite un arranque inmediato de los equipos.

Derivado de las condiciones planteadas anteriormente descritas se definen los siguientes parámetros de diseño:

1. La variación de velocidad en todos los puntos de operación, se establece para un gasto de 2 000 lps únicamente.
2. La variación de los niveles, es decir, la variación de la carga dinámica total se obtendrá en función de la variación de velocidad del equipo de bombeo. A menor carga dinámica total, le corresponde una menor velocidad de rotación, pero a gasto constante.
3. Con esta forma de operación de los equipos de bombeo, se obtiene puntos de operación con NPSH requeridos constantes.
4. La planta de bombeo operará para niveles desde la elevación 2 204.63 hasta la 2 221.28 msnm
5. Como una condición eventual el equipo puede trabajar con una carga dinámica total de 26.80 mca, y a una velocidad de operación del equipo de bombeo de 701 rpm y una velocidad del motor diésel de 1,753 rpm

Es importante aclarar que el equipo de bombeo puede trabajar dentro del intervalo establecidos en la curva de operación, figura 3.1, sin embargo para evitar problemas operativos, la generación de vórtices o vibraciones inadecuadas, se concluyó que el no variar el gasto, permitirá una operación libre de problemas. En esta curva se representa el intervalo de operación de 551 rpm a 703 rpm, con las características respectivas carga-gasto-NPSH-eficiencia y potencia hidráulica.

Curva múltiples de rendimiento

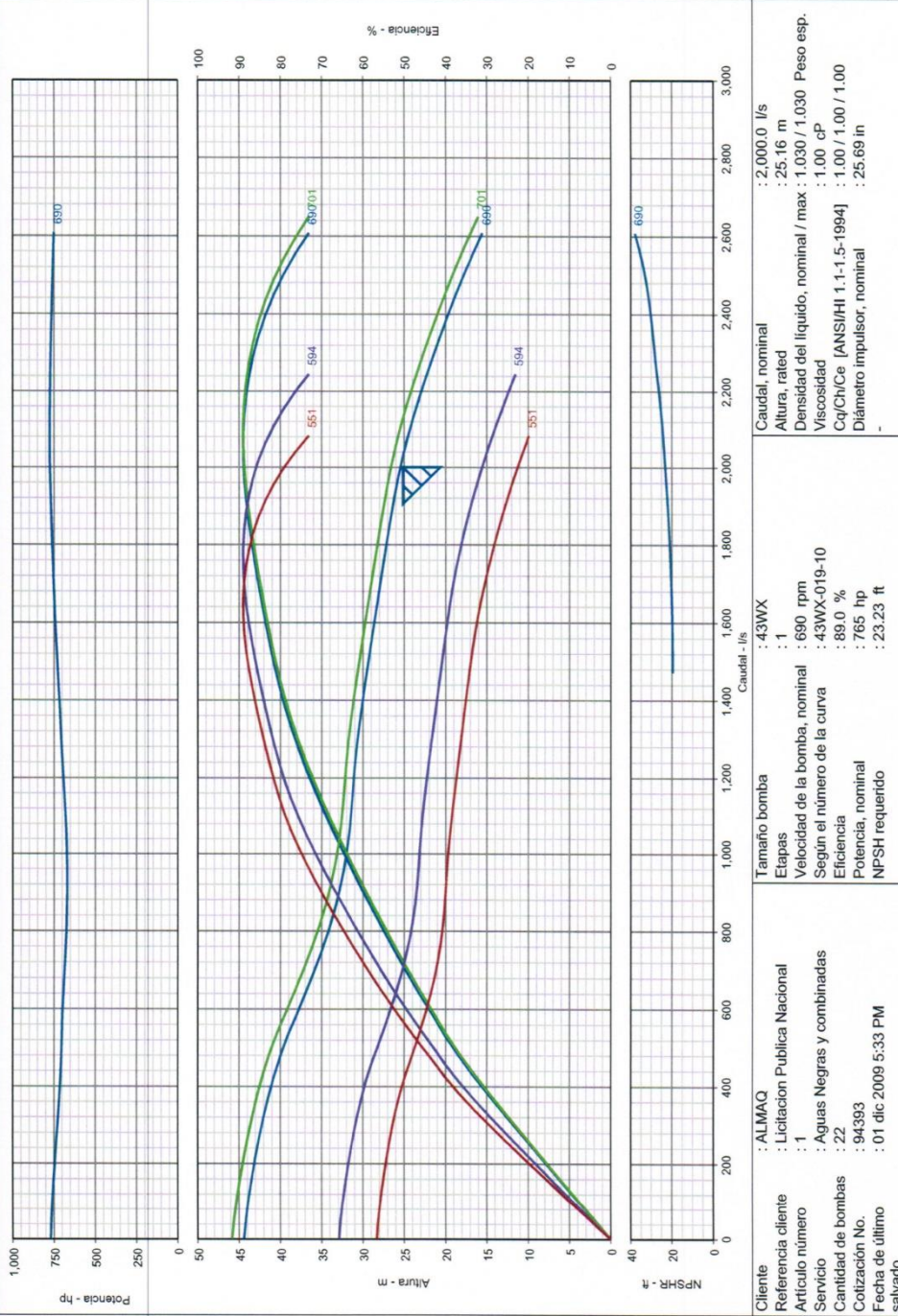


Figura No. 3.1 Curva Carga-Gasto Velocidad Variable

3.2 MEMORIA DE CÁLCULO PARA DETERMINAR LA CARGA DINAMICA TOTAL

El cálculo de la Carga Dinámica Total del Equipo, determina la potencia del motor diésel que se utilizará para el accionamiento del equipo de bombeo. Las variables que se utilizan en el cálculo serán:

Q	Gasto	lps
Pi	Constante	3.14159
A	Área	m ²
V	Velocidad	m/s
v	Viscosidad Cinemática	m ² /s
Re	Número de Reynolds	adicional
ε	Rugosidad	m
H _f	Pérdidas por Fricción	m
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
K	Factor de pérdida	adimensional
HP	Potencia	hp
η	Eficiencia	%
Pe _r	Gravedad específica	adimensional

Tabla No. 3.1 Variables y Constantes para para el Cálculo de la CDT

Cálculo de la Carga Dinámica Total

Datos

Gasto	2.00 m ³ /s (21 583 galones por minuto)
Nivel de la Descarga	2 229.29 msnm
Nivel de la Succión	2 205.40 msnm
Carga Estática	23.89 m

1.- Cálculo de Pérdidas de Fricción en Tubería

Diámetro interior de la fontanería 1 048 m (42 pulgadas)

$$Q = V * A \quad [3.1]$$

$$V_1 = \frac{Q}{A} = \frac{2}{\pi/4 \times 1.048^2}$$

$$V_1 = 2.32 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V \times D}{\nu} \quad [3.2]$$

$$Re = \frac{2.32 \times 1.048}{1 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 2.43 \text{ E} + 06$$

La Rugosidad relativa es:

$$\frac{e}{D} = \frac{0.00003}{1.067} = 2.86 \text{ E} - 8$$

Del Diagrama de Moody:

$$f = 0.019$$

Pérdidas en la Tubería:

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad [3.3]$$

$$H_f = 0.019 \frac{19.00}{1.048} \frac{2.32^2}{19.6}$$

$$H_f = 0.094 \text{ m}$$

$$\mathbf{2.- Pérdidas en Accesorios} \quad \left(H_f = K \frac{V^2}{2g} \right) \quad [3.4]$$

$$\text{Carga de Velocidad} = 1 \frac{2.32^2}{19.6} = 0.27$$

$$5 \text{ Codos de } 90^\circ = 0.33 \times 5 \frac{2.32^2}{19.6} = 0.45$$

$$\text{Campana de Succión} = 0.09 \frac{2.32^2}{19.6} = 0.02$$

$$\text{Pérdidas en Cabezal} = 0.1697$$

$$\text{Pérdidas en Columna} = 0.25$$

$$\text{Perdida de Carga Total} = 1.27$$

$$\text{Carga Estática} = 23.89 \text{ mca}$$

$$\text{Carga Dinámica Total} = 25.16 \text{ mca}$$

3.- Cálculo de la Potencia de la Bomba

$$\text{Gasto} = 2\,000 \text{ lps}$$

$$\text{Eficiencia} = 0.89$$

$$\text{Gravedad Especifica} = 1.03$$

$$HP = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{76 \cdot \eta} = \frac{2\,000 \cdot 25.16 \cdot 1.03}{76 \cdot 0.89} = 766.12$$

$$\text{Potencia Hidráulica} = 766.12 \text{ hp}$$

$$\text{Perdidas en la Flecha} = 3.04 \text{ hp}$$

$$\text{Potencia Total} = 769.16 \text{ hp}$$

$$\text{Eficiencia del Cabezal Engranado} = 96\%$$

$$\text{Potencia en la Flecha del Motor} = 801.21 \text{ hp}$$

$$\text{Potencia del Motor Elegido} = 1\,000.00 \text{ hp}$$

$$\text{Potencia Disponible del Motor} = 946.64 \text{ hp}$$

En el cálculo se obtiene una potencia requerida en la flecha de 801.21 hp, por lo que la elección del motor diésel de 1 000 hp, permitirá tener las condiciones de potencia adecuada, en todo el intervalo de operación de la curva del equipo de bombeo, según se puede corroborar en la curva característica, Figura 3.1, ya que a la derecha del punto de máxima eficiencia la potencia decrece.

3.3 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS EN LAS TUBERÍAS DE DESCARGA

Gasto Total por Cárcamo	20	m ³ /s	
Cota de descarga	2 230.75	m	
Diámetro del Tubo	1.524	m	
Área Hidráulica	1.82	m ²	
Número de Tubos	4.00		
Gasto por Tubo	5.00	m ³ /s	
Operación normal			
Velocidad en la descarga	2.74	m/s	
Carga de Velocidad	0.38	m	
Perdidas en Piezas Especiales			
Codo de 45°	5	Piezas	
K =	0.183		
Pérdida en codo de 45°	0.07		
5 codos	0.35		
Pérdidas en la Entrada a Tuberías			
Entrada a tubería	1		
K =	0.5		
Pérdida en la Entrada	0.19		
Pérdidas por Conducción en Tubería			
Tubería			
Longitud de la tubería	84.00	m	
Ecuación de Manning	$H_f = KLQ$		[3.5]
Ecuación	$K = 10.3 n^2 / d^{16/3}$		[3.6]
	$n = 0.015$		
	$K = 0.00024$		
Pérdida	0.51	m	
Pérdida Acumulada	1.057	m	
Elevación Piezométrica en Tanque de Carga	2 231.81	msnm	

Las pérdidas de energía en la tubería, determinaran la elevación piezométrica en el tanque de carga, con lo cual se elige su altura y es el dato con el cual se calculará la Carga Dinámica Total del equipo de bombeo.

Gasto Bombeado	Elevación Piezométrica Tanque Carga	Nivel en Cárcamo	Carga Estática	Pérdidas Tuberías y Fontanería	Carga Dinámica Total	Carga Dinámica Máxima Transitoria
m ³ /s	Msnm	msnm	M	m	mca	mca
20	2 231.81	2 222.05	9.76	1.27	11.02	13.95
18	2 231.61	2 220.20	11.41	1.27	12.67	15.8
16	2 231.43	2 218.35	13.08	1.27	14.34	17.65
14	2 231.27	2 216.50	14.77	1.27	16.03	19.5
12	2 231.13	2 214.65	16.48	1.27	17.75	21.35
10	2 230.50	2 212.80	17.7	1.27	18.97	23.2
8	2 230.30	2 210.95	19.35	1.27	20.62	25.05
6	2 230.03	2 209.10	20.93	1.27	22.19	26.9
4	2 229.72	2 207.25	22.47	1.27	23.74	28.75
2	2 229.29	2 205.40	23.89	1.27	25.16	30.6

Tabla 3.2 Resumen de las Cargas de Bombeo

Se observa que la variación de la Carga Dinámica Total está dentro del intervalo de 11.02 mca a 25.16 mca, lo cual nos da idea que solo la velocidad variable del motor será la adecuada para poder obtener el intervalo de operación deseado.

En la figura No. 3.2 se muestra esquemáticamente los niveles de operación, y piezométricas de operación para gasto máximo y mínimo, con su respectiva carga dinámica total. La figura No. 3.3, indica las velocidades de operación para las cargas máximas y mínimas calculadas y graficadas en la curva de operación.

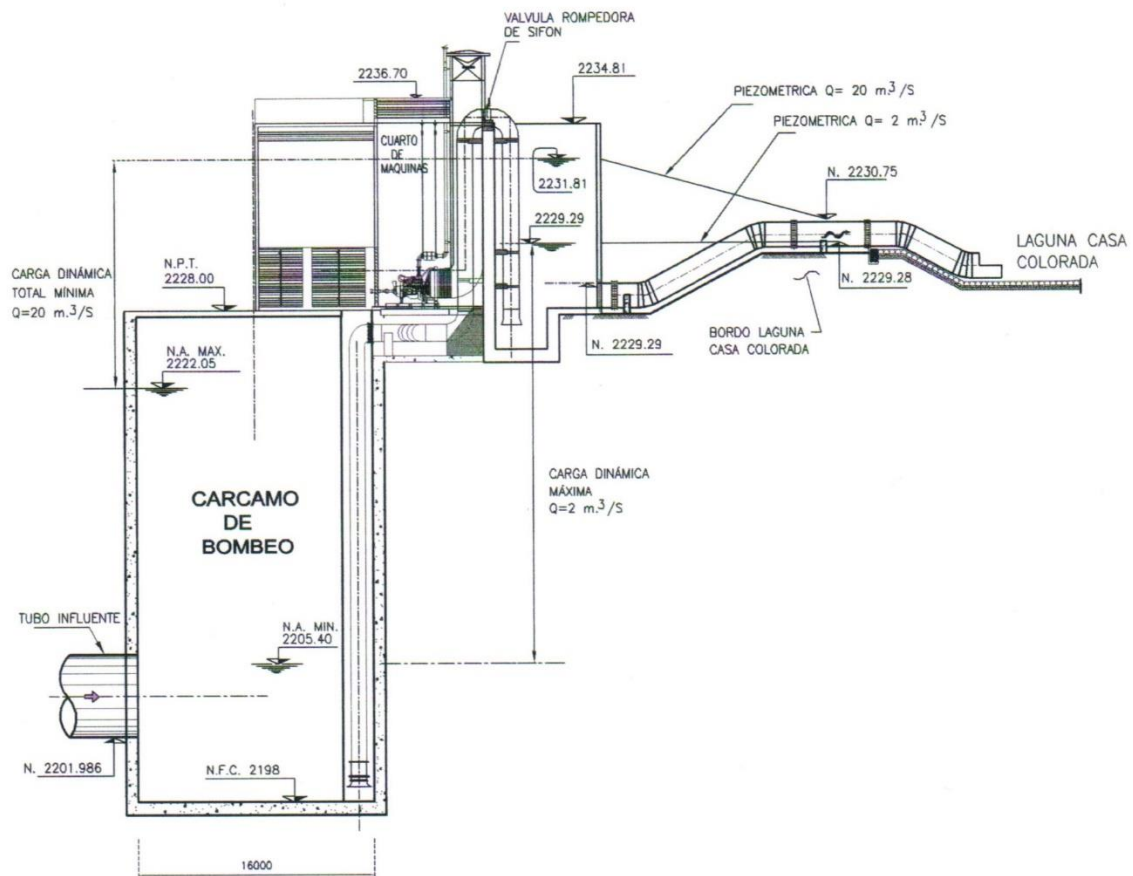


Figura No. 3.2 Diagrama de la Carga Dinámica Total Máxima y Mínima

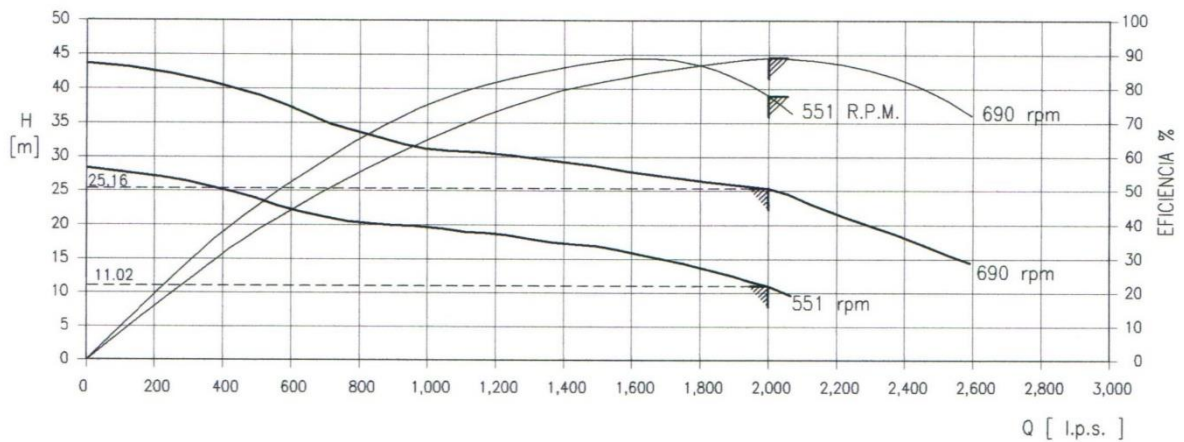


Figura No. 3.3 Curva carga-gasto para las velocidades de operación máximas y mínimas

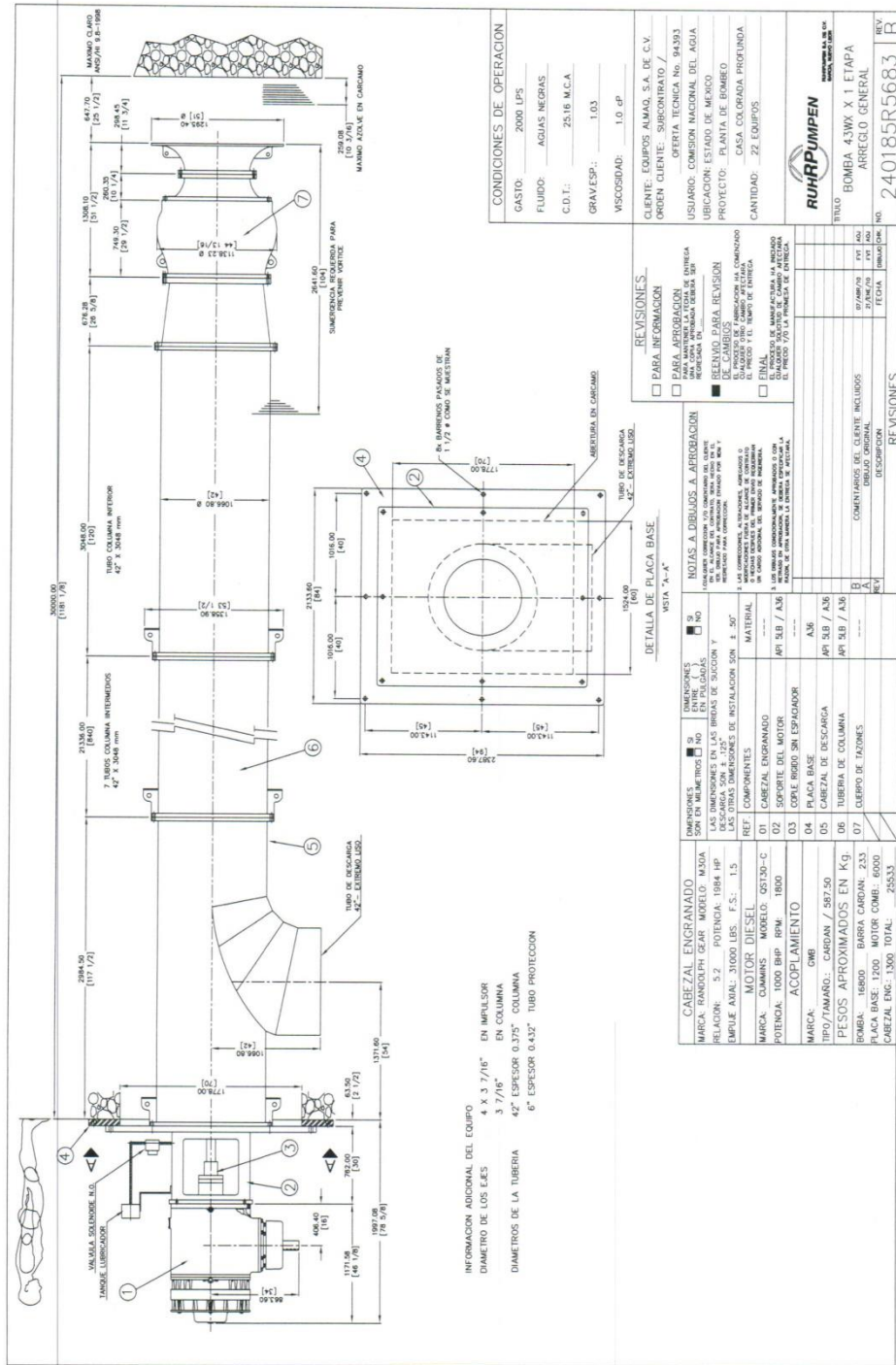


Figura No. 3.4 Dimensiones Generales del Equipo de Bombeo Vertical

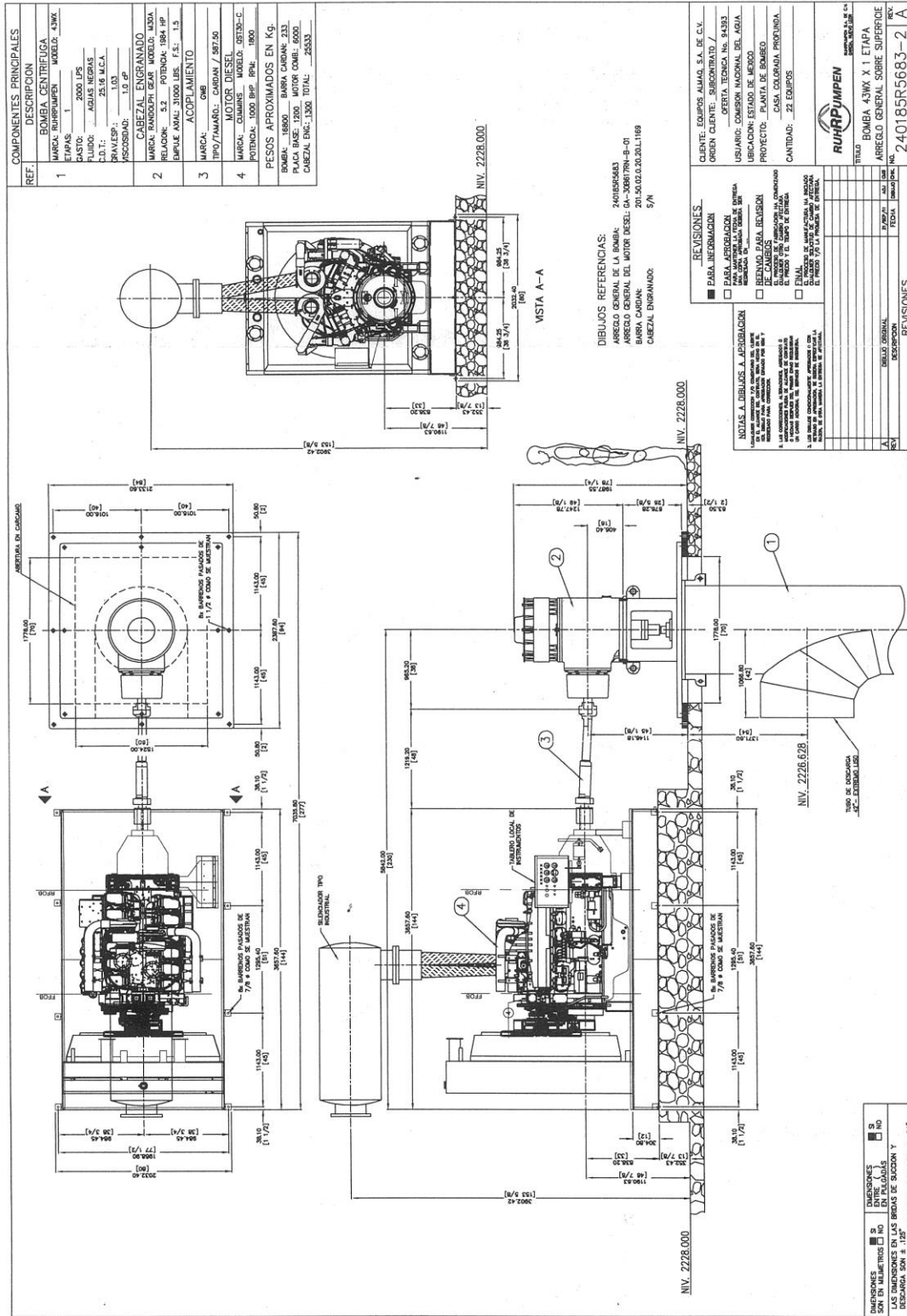


Figura No. 3.5 Dimensiones Generales del Grupo Motor Diesel-Flecha Cardan-Cabezal Engranado

3.4 CÁLCULO DE LA POTENCIA A NIVEL MÍNIMO

Dentro del cálculo de la Carga Dinámica Total, es necesario verificar todos los puntos de operación, por lo que la potencia máxima se obtendrá en el caso de trabajar en el nivel mínimo de operación, lo cual no es una constante de trabajo, sin embargo, se debe tener la plena seguridad de que el motor cubre todo el intervalo de posibilidades de operación. Así mismo se determina el valor de la velocidad de rotación para este punto de operación.

Gasto = 2 000.00 lps
 Carga = 26.80 mca
 Eficiencia = 0.89
 Gravedad Especifica = 1.03

$$HP = \frac{Q H P_{e_r}}{76 \eta} = \frac{2\,000 \times 26.80 \times 1.03}{76 \times 0.89} = 816.20$$

Potencia Hidráulica = 816.20 hp
 Perdidas en la Flecha = 3.04 hp
 Potencia Total = 819.20 hp
 Eficiencia del Cabezal Engranado = 96%
 Potencia en la Flecha del Motor = 853.38 hp
 Potencia del Motor Elegido = 1 000.00 hp
 Potencia Disponible del Motor = 840.33 hp

VELOCIDAD DE ROTACION DE LA BOMBA PARA NIVEL MINIMO CRITICO			
GASTO BOMBEADO (LPS)	CARGA DINAMICA TOTAL (MCA)	NIVEL EN CARCAMO (M)	VELOCIDAD DE LA BOMBA (RPM)
2,000.00	26.80	2,202.99	701

Tabla No. 3.3 Velocidad del equipo de bombeo a Carga Máxima

Potencia Requerida por el Equipo de Bombeo y la Suministrada por el Motor Diesel						
Velocidad de la Bomba	Velocidad del Motor	Relación de Engranajes	Velocidad de Salida (Bomba)	Potencia Neta Continua del Motor	Potencia Requerida en la Flecha del Cabezal	Exceso de Potencia
701	1,753	5:2	701.00	952.39	853.38	12%
690	1,725	5:2	690.00	946.64	801.21	18%
600	1,485	5:2	600.00	884.56	530.36	67%
551	1,378	5:2	551.00	841.69	410.82	105%

Tabla No. 3.4 Potencia requerida por la Bomba y potencia entregada por el Motor

Para cada condición de operación, se obtiene la potencia requerida, que se indica en el resumen de la tabla No 3.4, donde se analiza la potencia que entrega el motor y la potencia que requiere el equipo de bombeo.

3.5 CALCULO DE LA POTENCIA UTIL DEL MOTOR DIESEL

El motor marca CUMMINS modelo QST30-C1000, (calibración FR-5241), desarrolla una potencia de 1,000 hp (746 kw) @ 1800 rpm y un torque de 2,918 lb-ft (3,956 n-m) @ 1800 rpm respectivamente.

Estos datos son obtenidos en condiciones controladas de prueba, conforme hoja de especificación técnica. No incluye alternador, ventilador ni equipo opcional de componentes de mando. La aplicación del motor en este intervalo de potencia, es para una aplicación tipo intermitente.

Dicho motor puede estar operando hasta una altura de 3,700 m (12,139 ft), sin que por ello sufra derrateo alguno tal cual lo muestra la curva de comportamiento de dicho motor (calibración FR-5241).

Sin embargo, para la aplicación que concierne dicho motor puede proporcionar una potencia continua en la flecha del clutch de **952.39 hp** a una velocidad de **1753 rpm**, de acuerdo a lo que se detalla a continuación:

$$\text{Potencia Real} = \text{Potencia nominal} - \text{Perdidas por (Ventilador - Alternador - Clutch - Flecha Cardán)}$$

Para este tamaño de motor, el fabricante Cumins, recomienda un tamaño de ventilador de 60", de las tablas de potencia demandada del ventilador se tiene lo siguiente:

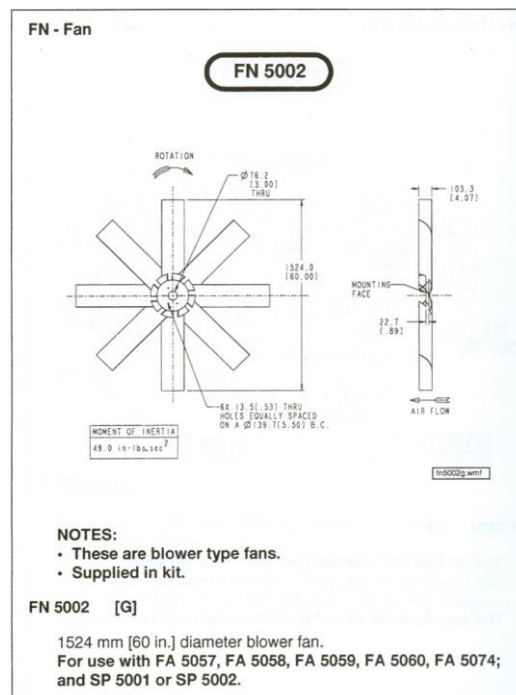


Figura No. 3.6 Dimensiones del Ventilador

La velocidad de giro del ventilador es 756 rpm, ya que la relación de velocidad entre la polea del ventilador y la motriz es de 0.42:1, por lo que la potencia que demanda el ventilador, de acuerdo a su curva de comportamiento es de 26.24 hp

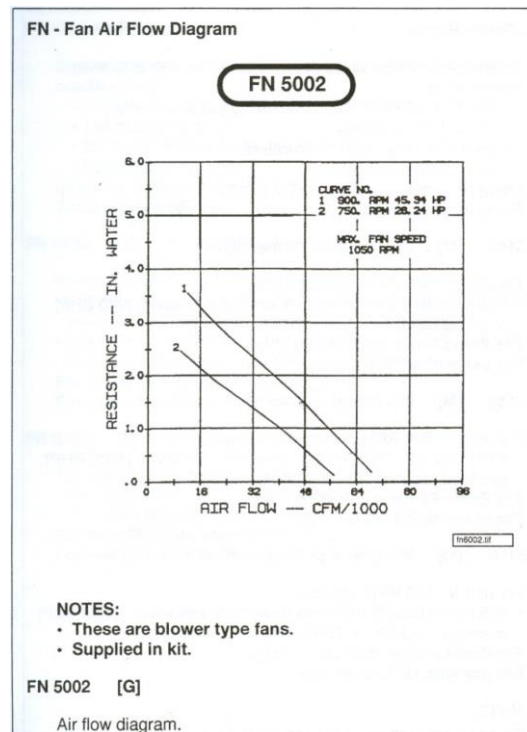


Figura 3.7 Potencia Demandada por el ventilador

El alternador se puede considerar que demanda un 0.1% de la potencia, por lo que se tiene:

$$1000 \text{ hp} * 0.001 = 1.0 \text{ hp}$$

El Clutch, tiene una pérdida de potencia de 0.5 hp

Para la Flecha Watson las pérdidas que se consideran son del orden de los 10 hp, de acuerdo a la información del fabricante.

Por lo tanto la potencia real es: $\text{hp Potencia Real} = 1,000 \text{ hp} - 26.46 \text{ hp} - 1.0 \text{ hp} - 0.5 \text{ hp} - 10 \text{ hp} = \mathbf{962.04 \text{ hp}}$

Se concluye que el motor QST30-C1000 con calibración FR-5241, en la aplicación intermitente para bombeo nos otorga una potencia de **962.04 hp**, suficientemente adecuada para la aplicación que nos compete.

Sin embargo, la velocidad a la cual estará realmente girando dicho motor es de **1753 rpm**, para obtener la velocidad de operación de la bomba, que es de **701 rpm**, con un cabezal engranado relación 5:2.

Por lo tanto la potencia que dicho motor entrega a dicha velocidad es del orden de los **989.6 hp**, de los cuales se tiene:

$$\text{Potencia Real} = 989.6 \text{ hp} - 25.77 \text{ hp} - 1.0 \text{ hp} - 0.5 \text{ hp} - 10 \text{ hp} = \mathbf{952.39 \text{ hp}}$$

La máxima potencia demandada por la bomba es de 853.38 en la flecha cardan y el motor diésel entrega en la misma flecha cardan 952.39 hp., por lo que se considera adecuada su selección. Esta información se obtiene de la Tabla No. 3.4, denominada Potencia requerida por la Bomba y Potencia entregada por el Motor.

Con el dato de la potencia del motor se verifica la potencia comercial del Cabezal Engranado en la figura No. 3.9, teniendo que el modelo M26A a 720 rpm, tiene una capacidad de 775 hp por lo que resulta inadecuado para los requerimientos de potencia y el modelo M30A, puede manejar una potencia de 1,984 hp, con una relación de engranes 5:2, y tener una velocidad de salida de 720 rpm y del motor de 1800 rpm, y por lo tanto se considera adecuada su selección.

Las condiciones de operación del equipo de bombeo están regidas por su velocidad de rotación, de tal forma que también es necesario conocer las características mecánicas del motor de combustión interna, como son el torque, potencia entregada

y consumo de combustible, de acuerdo a su velocidad de rotación, expresadas en revoluciones por minuto

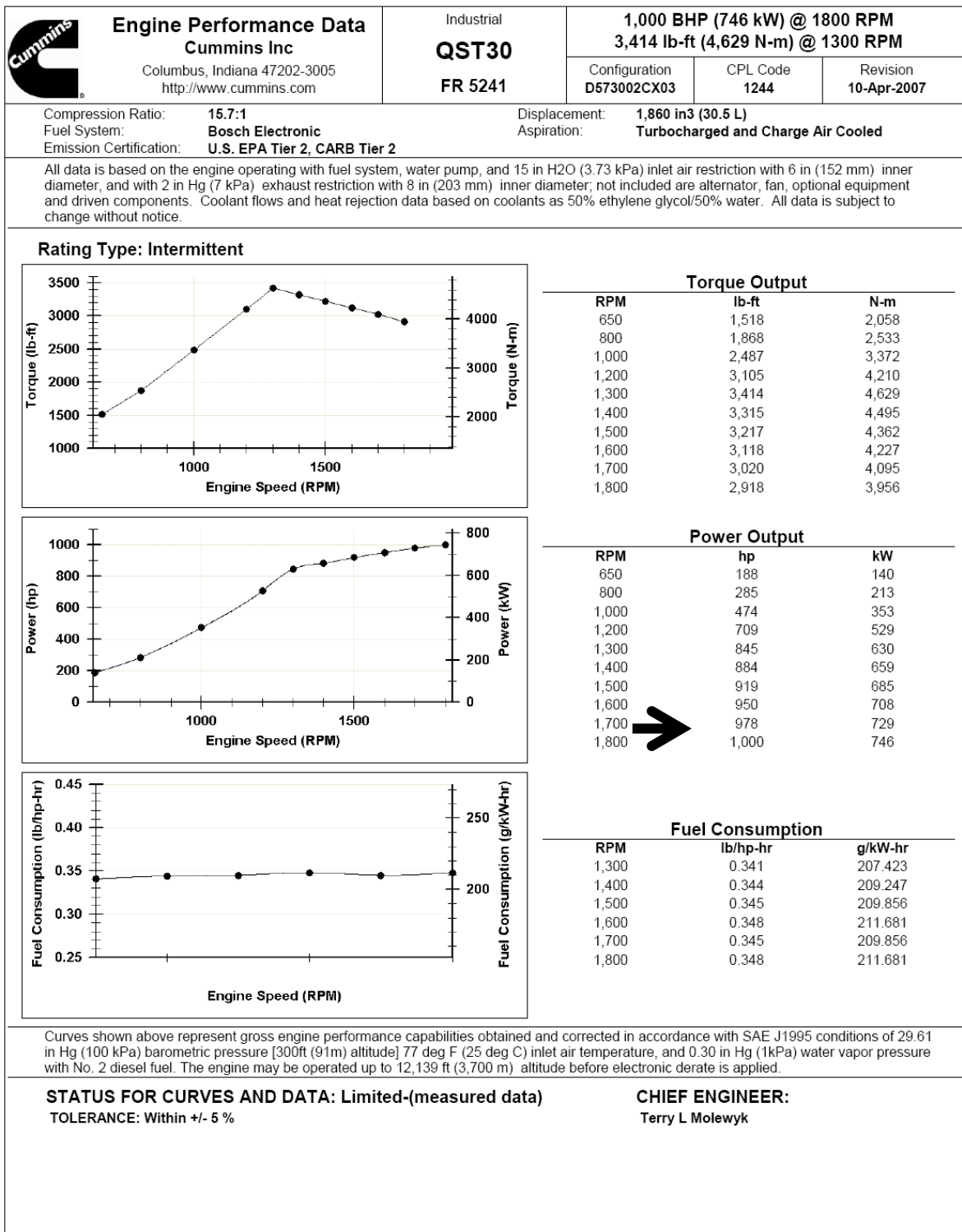


Figura 3.8 Ficha Técnica Motor Diésel

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA REALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LA LUMBRERA DE REJILLAS

4.1.1 Análisis de los patrones de flujo en el interior de la Lumbrera de Rejillas

Se presentan los resultados del análisis del patrón de flujo en la lumbrera, mediante un modelo matemático tridimensional, para evaluar sus condiciones. El análisis se efectúa para las condiciones de flujo extremas en la operación de la planta de bombeo, es decir 4 y 40 m³/s, bajo las consideraciones siguientes:

1. Gasto de 4 m³/s y un nivel de operación en la elevación 2 205.40 msnm
2. Gasto de 40 m³/s y un nivel de operación en la elevación 2 222.05 msnm
3. Análisis para un Gasto de 40 m³/s y 2 canales en operación
 - a. Canal 1 y 2
 - b. Canal 1 y 3.

La simulación se realiza con el programa FLUENT 6.3 (ANSYS, 20008), mediante la solución numérica de las ecuaciones usando el método del elemento finito aplicado a volúmenes, así como también para conocer el patrón de flujo, se utiliza la ley de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes.

La generación del modelo con la geometría de la lumbrera, es realizada mediante el programa GAMBIT 2.4.

4.1.2 Planteamiento del problema y criterios de solución

El diseño de la lumbrera sin alguna mampara que distribuya el flujo implica que el canal central tenga la mayor afluencia de gasto, lo cual no es aceptable y de ahí se genera la necesidad de tener un elemento que permita tener una distribución de flujos más adecuada.

La utilización de mamparas es limitada ya que el manejo de aguas negras que provocan el arrastre de fibras, arena, basura de todos tipos y tamaños generan como limitante el problema de azolvamiento y obstrucción de las rejillas, las cuales no son aceptables ya que se pueden dañar o destruir.

Esta condición obliga a tener una solución parcial, no obstante el análisis es enfocado a determinar las condiciones de flujo para en otros estudios se genere la solución mediante un modelo físico que permita ensayar las posibles soluciones.

El estudio implica el análisis del patrón de flujo en diferentes niveles, así el análisis del porcentaje de flujo en cada canal, que nos permite evaluar el diseño.

Para el caso de tener una rejillas fuera de operación, también se realizó el análisis, por lo que la mampara debe cumplir todas las expectativas de no obstrucción y distribución del flujo.

En la figura 4.1, se muestra en planta y en elevación con sus dimensiones generales.

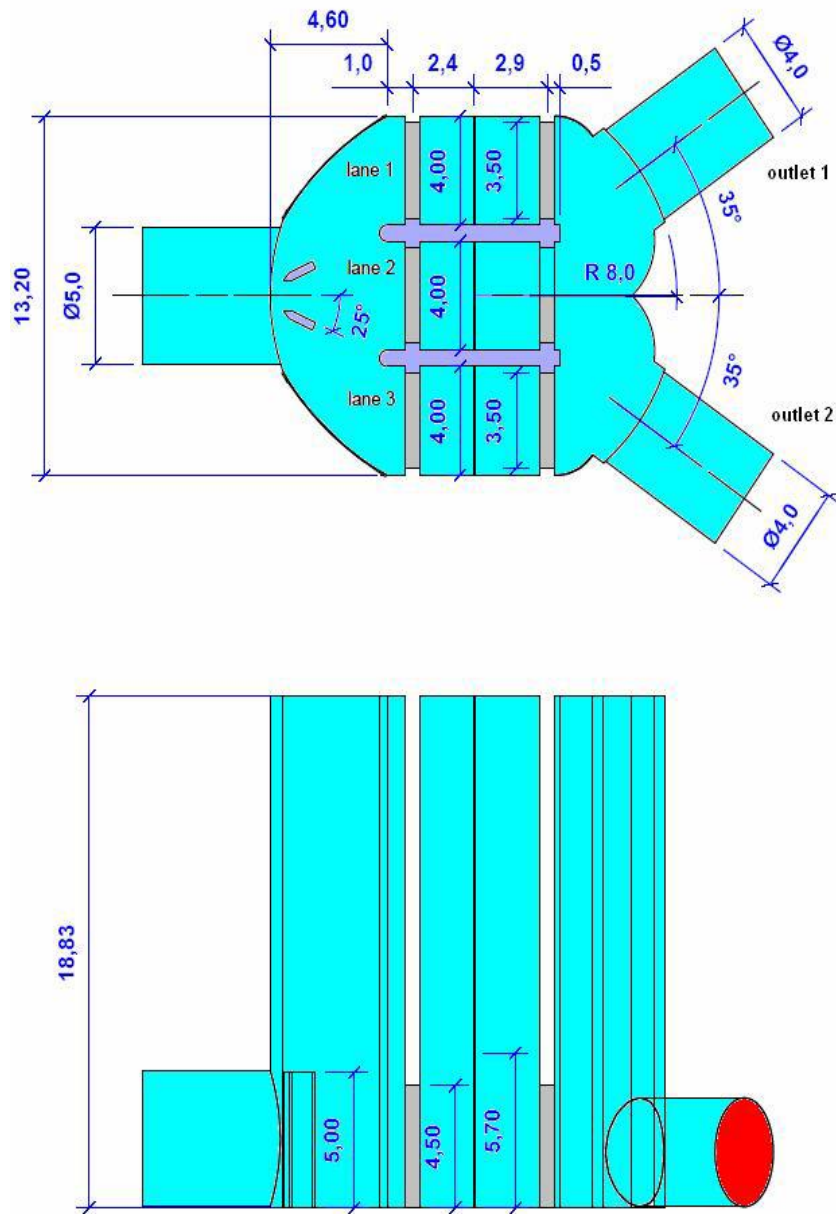


Figura No. 4.1 Vista esquemática de la Lumbreira de Rejillas

En la figura 4.2, se indica el modelo geométrico utilizado, en donde el color azul marca el límite de entrada al modelo y el rojo es el límite de salida del mismo. Las áreas verdes indican las rejillas, que se modelan con el coeficiente de pérdida hidráulica que le corresponde a su diseño y el área gris representa las compuertas.

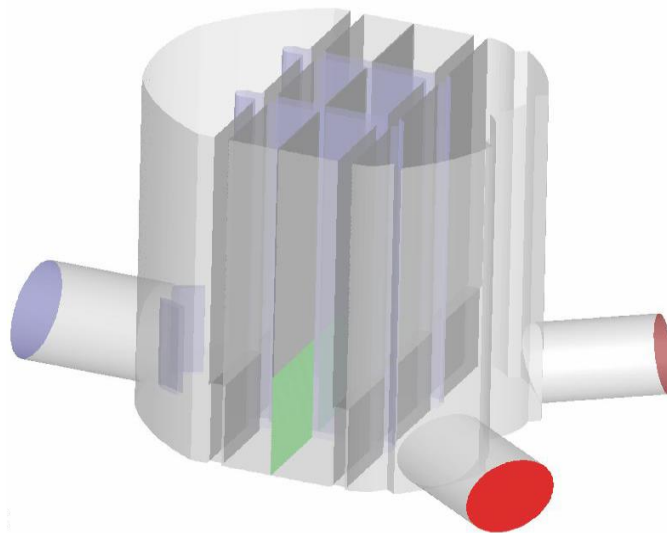


Figura No. 4.2 Geometría del Modelo esquemático de la Lumbreira de Rejillas

4.1.3 Análisis para un Gasto de 4 m³/s y Nivel de operación en la elevación 2205.40 msnm

La figura No. 4.3 presenta la distribución de velocidades dentro del sistema a diferentes alturas. Se elige 0.2 y 3.41 m, para el análisis de las líneas de corriente y así determinar el efecto del flujo sobre la rejilla.

Todas las figuras indican mediante color, la magnitud de la velocidad y los vectores la dirección del flujo en el plano de análisis, es decir a la altura que se indica en cada figura.

Se muestran las líneas de corriente para una altura de 0.2 y 3.41 m, donde el flujo sigue el contorno de las mamparas formando una corriente de chorro que induce la rotación del fluido cerca de la pared circular de la lumbreira. Áreas de baja velocidad cerca del canal No. 2 ó sea el central, en la zona de aguas abajo de la rejilla se forman, provocando zonas de sedimentación de sólidos. De forma general, es notoria la distribución heterogénea de las líneas de flujo, lo que genera zonas de inestabilidad y velocidades concentradas, formando corrientes no deseadas.

La distribución de las velocidades en los canales es de la siguiente forma:

Canal No. 1 – 22 % del flujo total

Canal No. 2 – 53 % del flujo total

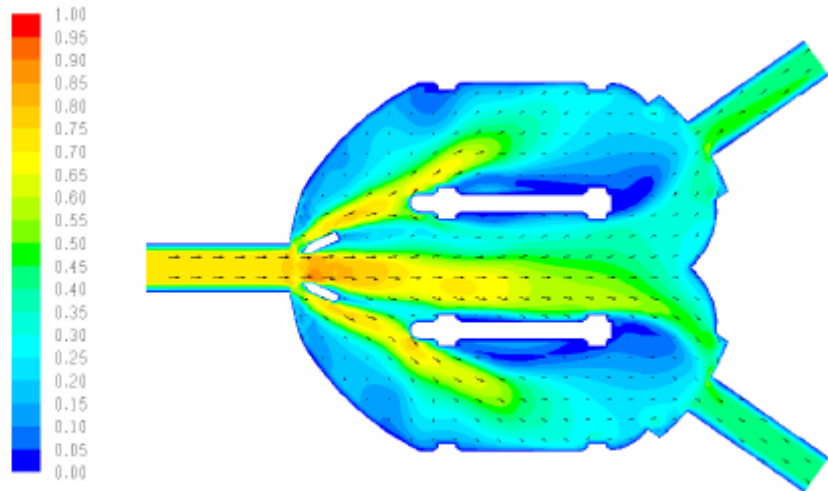
Canal No. 3 – 25 % del flujo total

Para el caso de las tuberías de salida el flujo se comporta de la siguiente forma:

Tubería de Salida No. 1 – 50 % del flujo total

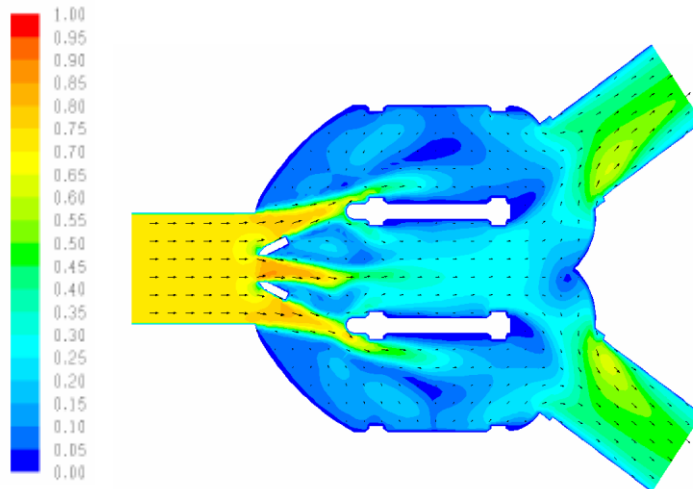
Tubería de Salida No. 2 – 50 % del flujo total

Resultados de la simulación para un gasto de 4 m³/s



Velocidad en [m/s]

Líneas de Corriente a una altura de 0.2 m del fondo de la lumbrera.



Velocidad en [m/s]

Líneas de Corriente a una altura de 3.41 m del fondo de la lumbrera.

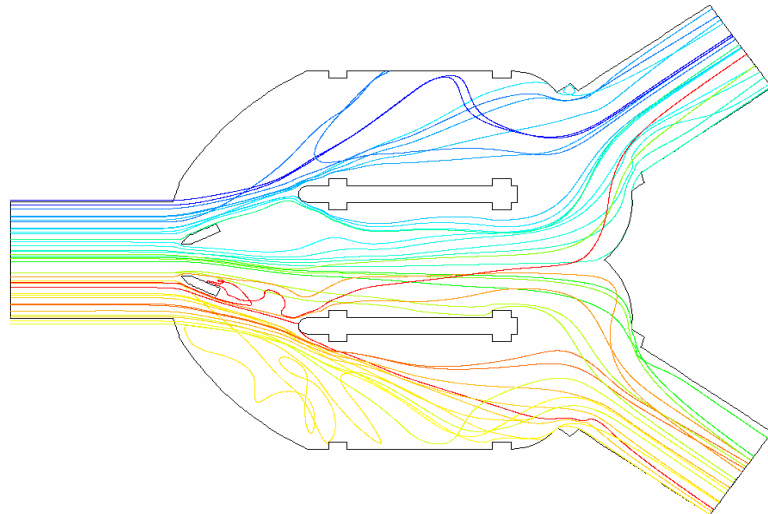


Figura No. 4.3 Líneas de corriente para un Gasto de 4 m³/s

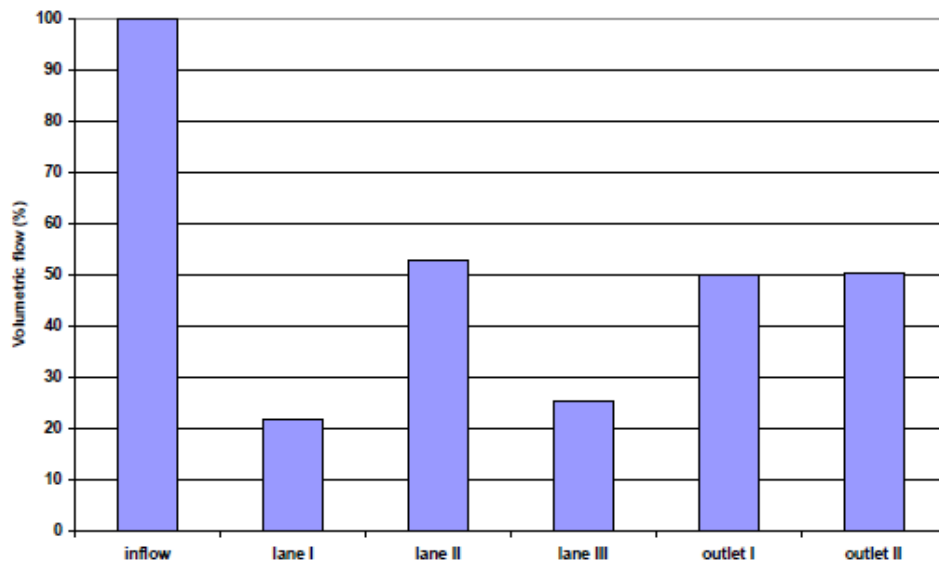


Figura No. 4.4 Distribución del gasto de 4 m³/s en la lumbrera de rejillas

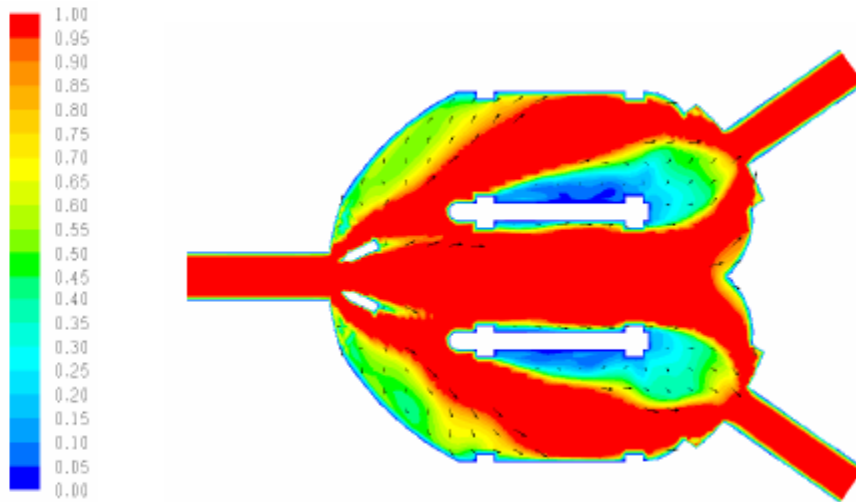
4.1.4 Análisis para un Gasto de 40 m³/s y Nivel de operación en la elevación 2 222.05 msnm

Se indican las líneas de corriente para una altura de 0.2 y 4.5 m, donde el flujo sigue el contorno de las mamparas formando una corriente que aún no llena el ancho del canal. De forma general, es notoria la distribución heterogénea de las líneas de flujo, y se repite en comportamiento con un gasto de 4 m³/s, lo que genera zonas de inestabilidad y velocidades concentradas, formando corrientes no deseadas. La distribución de las velocidades en los canales es de la siguiente forma:

Canal No. 1 – 23 % del flujo total
Canal No. 2 – 50 % del flujo total
Canal No. 3 – 22 % del flujo total

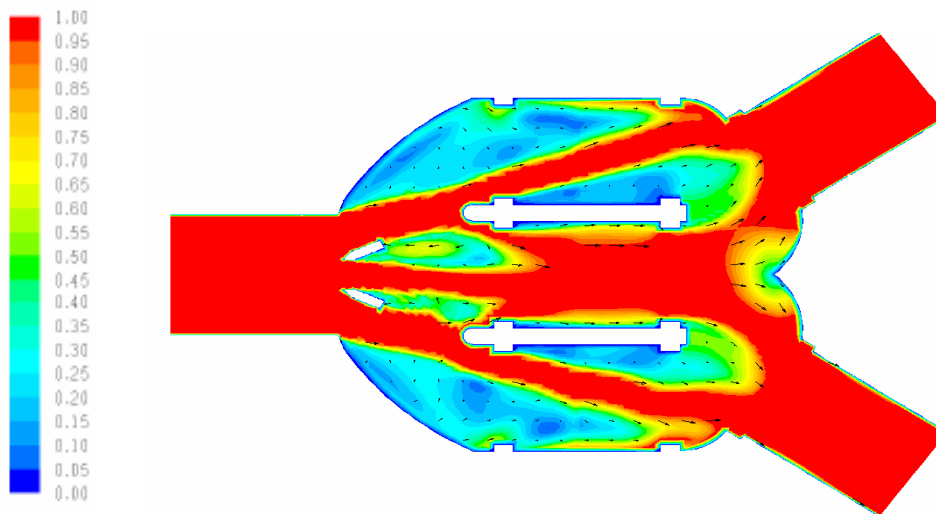
Para el caso de las tuberías de salida el flujo se comporta de la siguiente forma:
Tubería de Salida No. 1 – 50 % del flujo total
Tubería de Salida No. 2 – 50 % del flujo total

Resultados de la simulación para un gasto de 40 m³/s



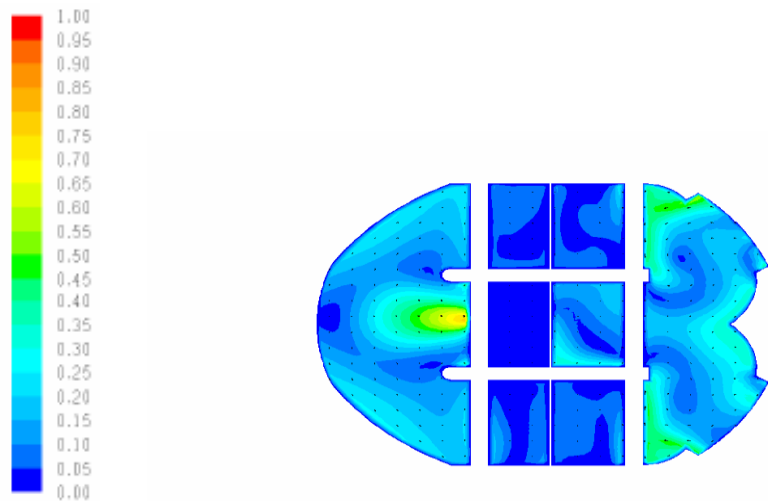
Velocidad en [m/s]

Líneas de Corriente a una altura de 0.2 m del fondo de la lumbrera.



Velocidad en [m/s]

Líneas de Corriente a una altura de 4.5 m del fondo de la lumbrera.



Velocidad en [m/s]

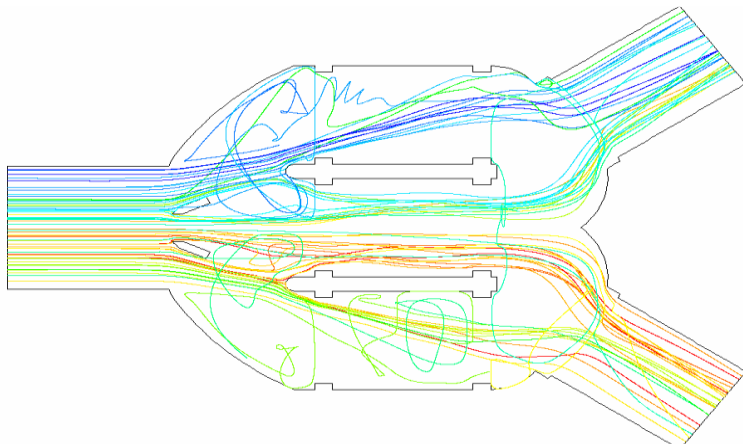


Figura No. 4.5 Líneas de corriente para un Gasto de 40 m³/s

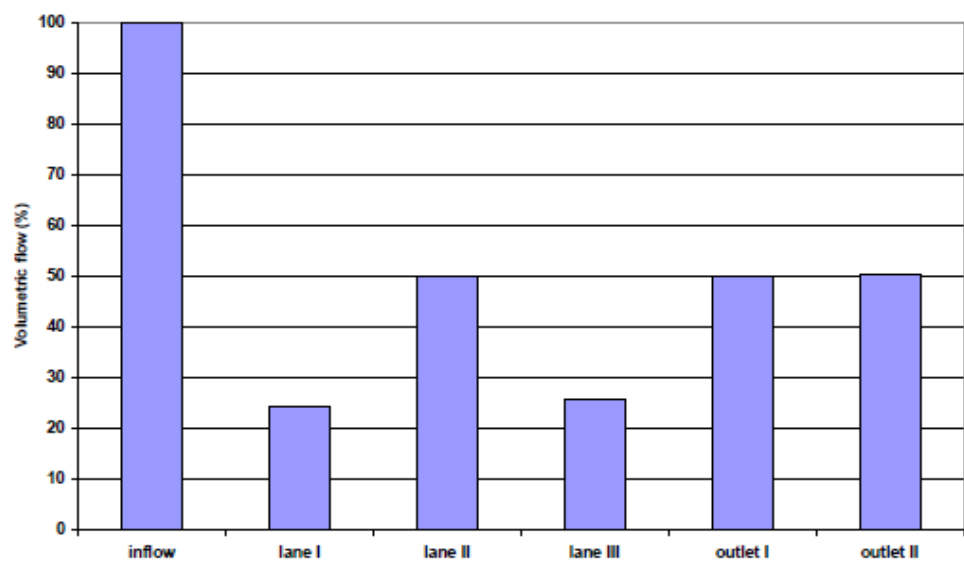


Figura No. 4.6 Distribución del gasto 40 m³/s en la lumbrera de rejillas

4.1.5 Análisis para un Gasto de 40 m³/s y 2 Canales en operación - C 1 y C 2

En este análisis se evidencia las líneas de corriente con una distribución heterogénea que indican un alto grado de zonas inestabilidad y velocidades concentradas, formando corrientes no deseadas y con flujos inadecuados, con un flujo desigual que se observan en la Figura No. 7. Esta forma de operación no es adecuada ya que se sobrepasa el gasto máximo de diseño de la rejilla, de 20 m³/s. La distribución de las velocidades en los canales es de la siguiente forma:

Canal No. 1 – 28 % del flujo total

Canal No. 2 – 72 % del flujo total

Canal No. 3 – 0 % del flujo total

Para el caso de las tuberías de salida el flujo se comporta de la siguiente forma:

Tubería de Salida No. 1 – 58 % del flujo total

Tubería de Salida No. 2 – 42 % del flujo total

Canal No. 1 y 2 en operación

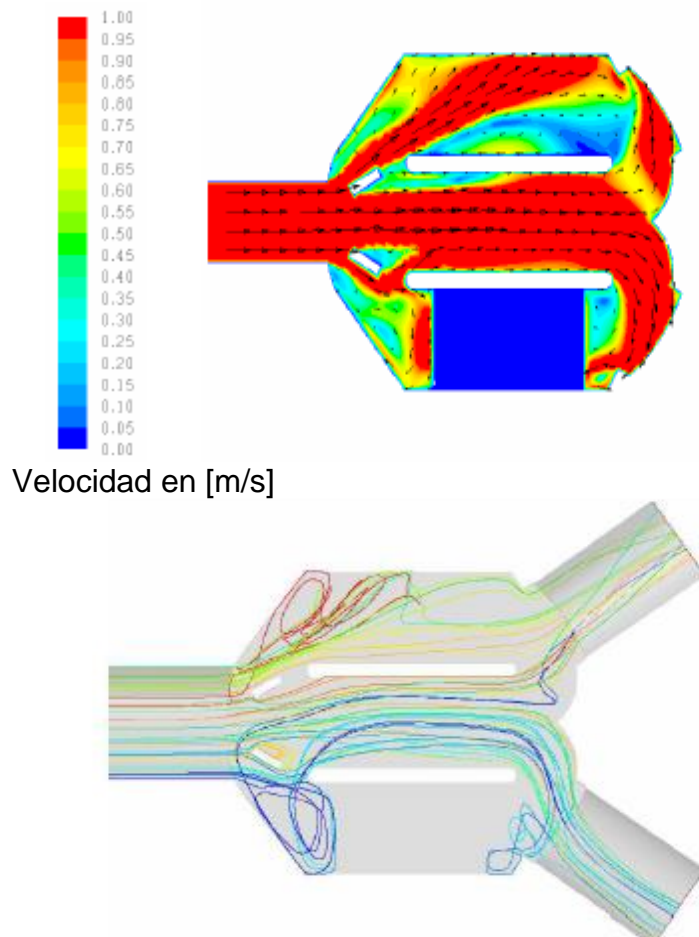


Figura No. 4.7 Líneas de corriente en canales No. 1 y 2, de la lumbrera de rejillas

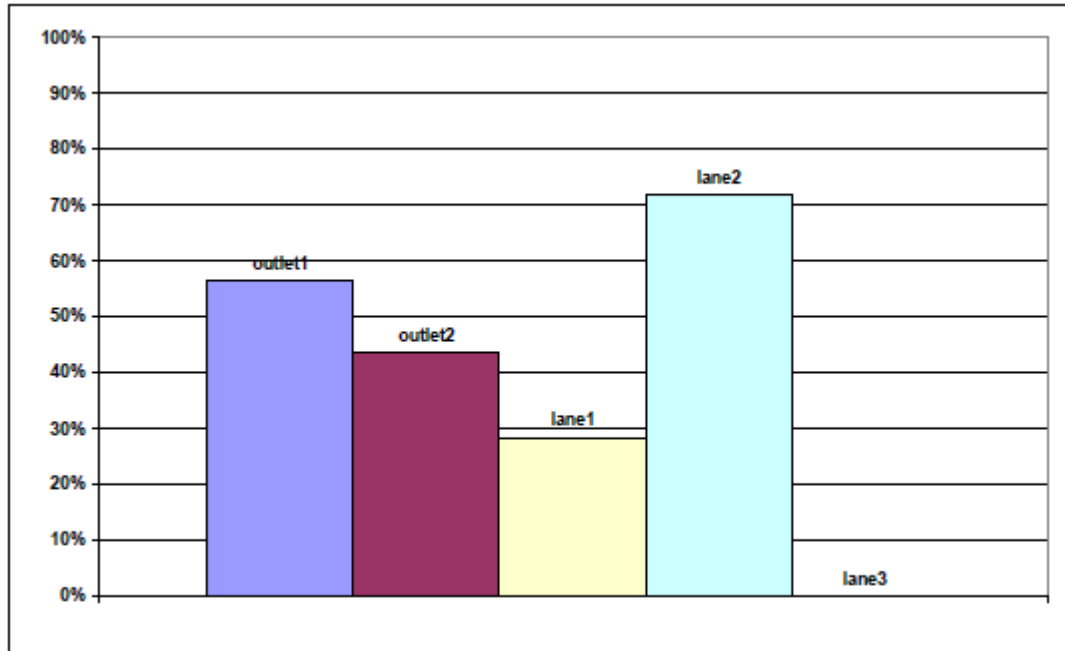


Figura No. 4.8 Distribución del gasto en los canales No. 1 y 2, de la lumbrera de rejillas

4.1.6 Análisis para un Gasto de 40 m³/s y 2 Canales en operación - C 1 y C 3

Se muestran las líneas de corriente con una distribución heterogénea de las líneas de flujo con velocidades concentradas, formando corrientes no deseadas y con flujos inadecuados, en la Figura No.4.9.

La distribución de las velocidades en los canales es de la siguiente forma:

- Canal No. 1 – 50 % del flujo total
- Canal No. 2 – 0 % del flujo total
- Canal No. 3 – 50 % del flujo total

Para el caso de las tuberías de salida el flujo se comporta de la siguiente forma:

- Tubería de Salida No. 1 – 50 % del flujo total
- Tubería de Salida No. 2 – 50 % del flujo total

Canal No. 1 y 3 en operación

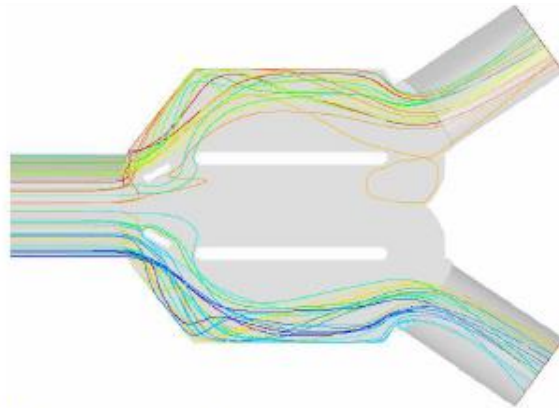
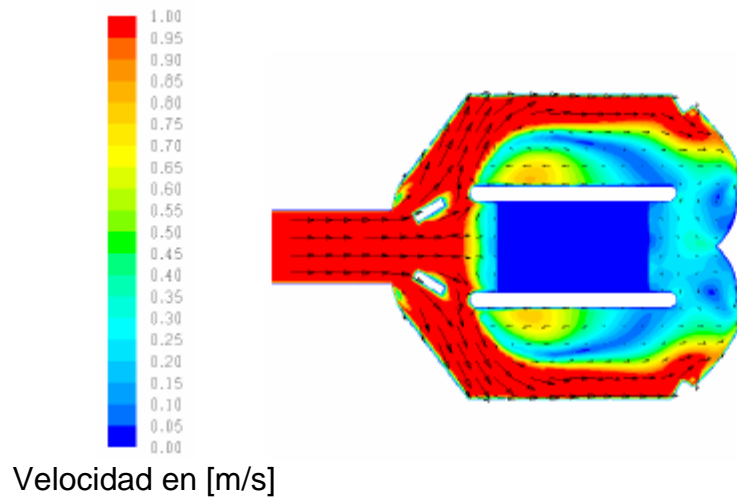


Figura No. 4.9 Líneas de corriente en canales No. 1 y 3, de la lumbrera de rejillas

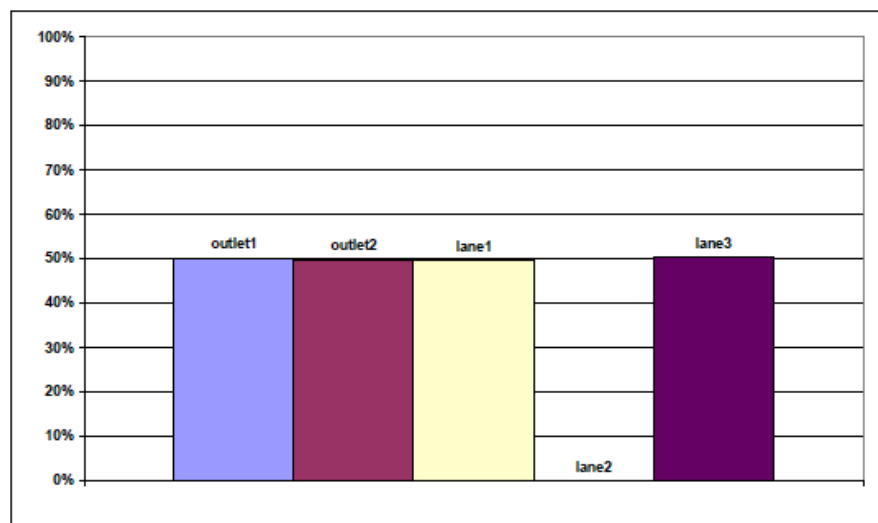


Figura No. 4.10 Distribución del gasto en los canales No. 1 y 3, de la lumbrera de rejillas

Se concluye que la utilización de mamparas como modificación al diseño original, que no las contemplaba, permite aumentar el flujo a los canales extremos, obligando a que se tenga el gasto de diseño de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ en el canal central y de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ en los canales adyacentes.

Es importante mencionar que se requiere de efectuar un modelo hidráulico a escala que permita ensayar distintos elementos que proporcionen un flujo más distribuido en el ancho del canal y que no se formen flujos tipo chorro que tendrán un efecto de pistón que empujen la basura al interior del cárcamo de bombeo, bajando la eficiencia en el trabajo de limpieza de las rejillas.

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA REALIZACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DEL CÁRCAMO DE BOMBEO

4.2.1 Cálculo de las Dimensiones del Modelo

Con el objeto de transferir las condiciones de flujo real de la estructura al modelo, números adimensionales como Reynolds, Froude y Weber deben de ser aplicados en su diseño. Estos números adimensionales, describen las fuerzas actuando en el fluido, las cuales deben ser idénticas tanto en el modelo, como en la estructura a tamaño real. Las fuerzas relevantes son la gravedad, aquellas resultantes de la viscosidad, la tensión superficial y la inercia del fluido en movimiento.

Todas estas características son en cierta forma independientes, siendo imposible aplicarlas todas al mismo tiempo en un modelo a escala. Es importante encontrar el equilibrio entre todos estos factores para la aplicación del modelo.

Para tener una exactitud entre los resultados obtenidos del modelo físico y el prototipo, debe existir similitud dinámica. En plantas de bombeo donde existe una superficie libre de agua, la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales, es decir, el número de Froude, debe de mantener de igual magnitud entre el modelo y el prototipo para obtener la similitud requerida. Los efectos de escala entre la viscosidad y la tensión superficial son despreciables para valores altos del número

de Reynolds. El Hydraulic Institute recomienda que el número de Reynolds en la campana de succión sea mayor de 6×10^4 para evitar efectos de la viscosidad. En nuestro caso, se determinarían las dimensiones con un Reynolds de 1.1×10^5 que es un valor que permite eliminar los efectos de escala y estar del lado de la seguridad. El número de Weber será mayor de 120 para evitar efectos de la tensión superficial, que para el diseño del modelo tendrá un valor de 750.

$$\text{Número de Freude} \quad F = \frac{U}{\sqrt{gL}} = \frac{\text{FUERZAS INERCIALES}}{\text{FUERZAS GRAVITACIONALES}} \quad [4.1]$$

$$\text{Número de Reynolds} \quad Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\text{FUERZAS INERCIALES}}{\text{FUERZAS VISCOSAS}} \quad [4.2]$$

$$\text{Número de Weber} \quad We = \frac{U^2}{\sigma/\rho L} = \frac{\text{FUERZAS INERCIALES}}{\text{FUERZAS DE TENSION SUPERFICIAL}} \quad [4.3]$$

U = Velocidad

g = aceleración de la gravedad

L = diámetro de la campana

ρ = Densidad

ν = Viscosidad Cinemática

σ = Tensión Superficial

De acuerdo con el número de Freude del prototipo (p) debe ser igual al del modelo (m), resulta que el valor del gasto del modelo será:

$$F_p = F_m$$

$$\frac{U_p}{\sqrt{gL_p}} = \frac{U_m}{\sqrt{gL_m}}$$

$$\frac{U_p}{L_p^{1/2}} = \frac{U_m}{L_m^{1/2}}$$

$$Q = UA \quad [3.4]$$

$$U = \frac{4Q}{\pi L^2}$$

$$\frac{Q_p}{L_p^{5/2}} = \frac{Q_m}{L_m^{5/2}}$$

$$Q_m = Q_p \left(\frac{L_m}{L_p} \right)^{5/2}$$

De tal forma que a través de consideraciones como el gasto del equipo de bombeo para simular el funcionamiento del cárcamo prototipo, se determina la construcción con una escala 1:7.3, por lo que ahora se determinará el valor del número de Reynolds que corroborara la similitud requerida.

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad [4.5]$$

Para un gasto de 2 m³/s en cada equipo de bombeo, se obtiene que el gasto del modelo es:

$$Q_m = 2 \left(\frac{1}{7.3} \right)^{5/2}$$

$$Q_m = 0.01389 \quad m^3/s$$

La campana de succión del equipo de bombeo tiene 1.30 m de diámetro y de acuerdo a la escala el modelo tiene 0.178 m. Con este valor se determina el número de Reynolds

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

U = Velocidad - m/s

L = diámetro de la campana - m

v = Viscosidad Cinemática – m² / s

$$U = \frac{4 \times (0.01389)}{\pi \times (0.178^2)}$$

$$U = 0.56 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{0.56 \times 0.178}{8.93 \times 10^{-7}}$$

$$Re = 1.11 \times 10^5$$

Para el satisfacer la condición del número de Weber, se calcula con los datos anteriormente determinados:

$$We = \frac{U^2}{\sigma / \rho L} \quad [4.6]$$

$$We = \frac{U^2 \rho L}{\sigma}$$

U = Velocidad - m/s

L = diámetro de la campana - m

σ = Tensión superficial – N / m

ρ = Densidad del agua – kg/m³

$$We = \frac{0.56^2 \times 0.178 \times 1000}{0.072}$$

$$We = 769$$

Los valores de la tensión superficial y viscosidad cinemática son tomados a una temperatura de 25 °C. De esta forma se demuestra que las dimensiones para la construcción del modelo cumplen con las condiciones determinadas por el Instituto de Hidráulica, para que exista similitud entre el prototipo y el modelo hidráulico ya que tanto el número de Weber como el de Reynolds están dentro de los lineamientos que se requieren.

Para el cálculo del tamaño de los orificios se considera el valor seleccionado en la escala dimensional que es de 1:7.3, la cual rige relación entre el modelo y prototipo

Dimensiones de los orificios: 0.6 x 0.6 m

Número de orificios: 59

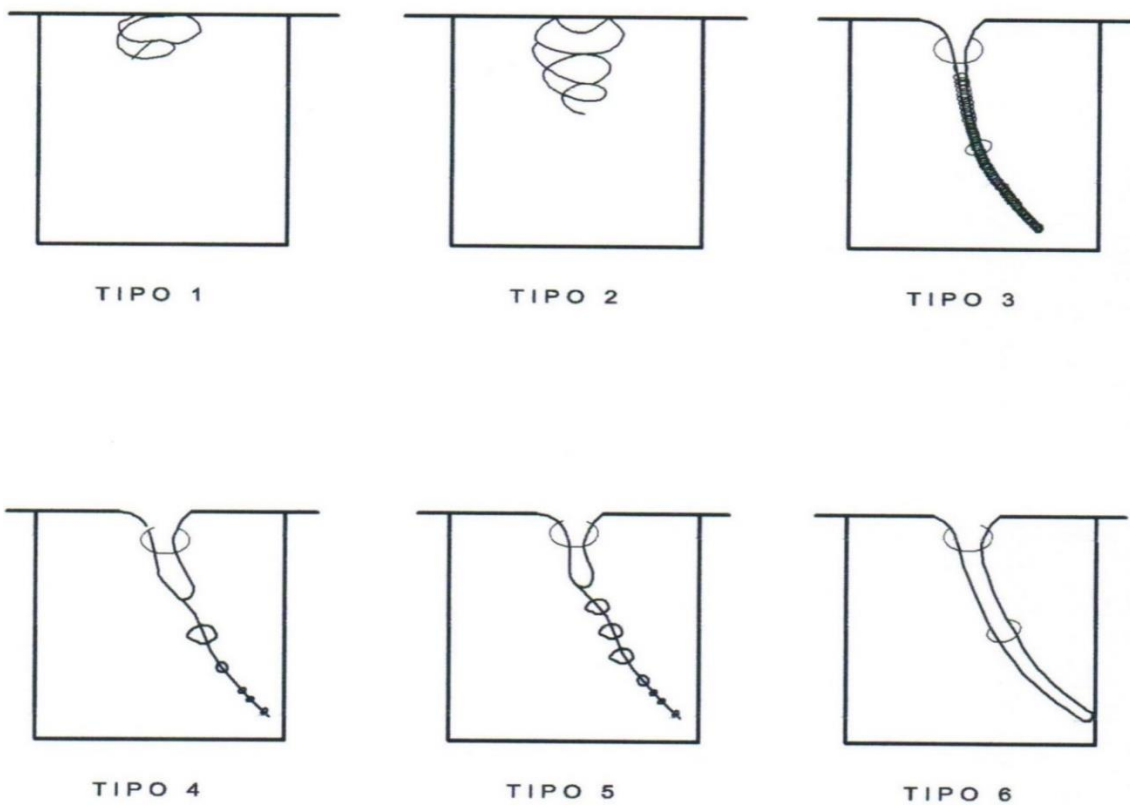
$$\text{Orificio} = \frac{600}{7.3}$$

$$\text{Orificio} = 82\text{mm}$$

El modelo tendrá 59 orificios cuadrados de 82 mm dispuestos de la misma forma que el prototipo.

4.2.2 Clasificación de los Vórtices

Los vórtices superficiales son clasificados de acuerdo a Hecker en 6 categorías (1= Ligero, 6 = muy alto) y se representan en las figuras 2.1 y 2.2.



Tipo 1: Remolino o vórtice muy ligero.

Tipo 2: Vórtice superficial con agujero.

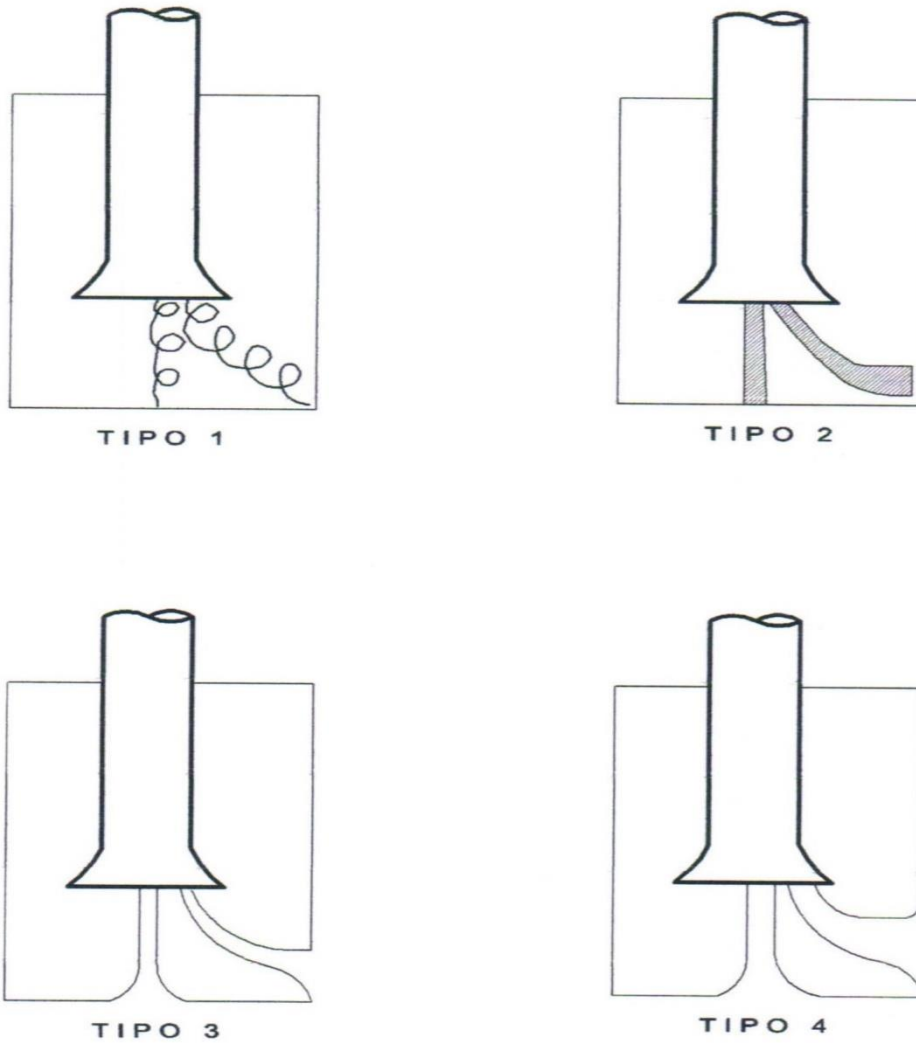
Tipo 3: Vórtice intenso, con hoyuelo y la vena del mismo puede ser vista.

Tipo 4: Vórtice que se genera contaminando el seno del líquido.

Tipo 5: Vórtice que jala gotas de aire a la succión de la bomba.

Tipo 6: Vórtice completo con una vena de aire que alcanza la campana de succión.

Figura No. 4.11 Vórtices Superficiales



Tipo 1: Remolino suave en piso y pared.

Tipo 2: Vórtice en piso y pared.

Tipo 3: Vórtice con aire entrando a la campana de succión en piso y pared

Tipo 4: Vórtice con vena de vapor de aire.

Figura 4.12 Vórtices Sumergidos

4.2.3 Criterios de Aceptación del Modelo Hidráulico

El Instituto de Hidráulica, determina que los criterios para la aceptación del modelo son los siguientes:

1. Los vórtices superficiales del tipo 1, son permitidos. El vórtice sumergido del tipo uno se acepta siempre y cuando su presencia no sea mayor del 10% del tiempo. Para el caso de este estudio no se aceptan vórtices sumergidos de ningún tipo.
2. La prerotación no debe ser mayor a un ángulo de 2.5 grados.
3. Las velocidades promedio dentro de la columna de la bomba no deben fluctuaciones mayores del 10%.
4. La turbulencia que se pueda presentar no debe de ser mayor del 10% del tiempo.

4.2.4 Características del Modelo

Cuando se evalúa las condiciones de operación de la planta de bombeo, se debe incluir los elementos que modifiquen los patrones de flujo estables en la dirección de la campana de succión de la bomba. El modelo reproduce el tubo de entrada al cárcamo, de 5 m de diámetro, que descarga el flujo de agua a una cámara central que direcciona la vena líquida a través del muro amortiguador a cada celda de bombeo. Las diez bombas con sus tuberías de descarga y campanas de succión son simuladas a detalle. El impulsor de la bomba no se simula y se toma en cuenta solo el gasto del equipo de bombeo, con las dimensiones a escala de columna y campana de succión. En lugar del impulsor de la bomba, se utiliza un equipo para medir los vórtices, el cual mediante la velocidad de rotación provee la información de la formación de vórtice en la succión de la bomba y por consiguiente en la celda de bombeo. El gasto es constante, por lo que el modelo considera los distintos niveles de operación de la planta.

4.2.5 Material de Construcción del Modelo

El modelo se construyó tomando en cuenta la facilidad de la obtención de datos y el poder tener la capacidad de observación adecuada de todas las variables que

deben ser medidas y controladas. Tanto del fondo del cárcamo, estructura exterior de las paredes es construida con madera tratada a prueba de agua, la tubería de entrada al cárcamo, el cárcamo, tuberías de descarga, campana de succión se construyó de acrílico transparente que permite la visión al 100%. Las tuberías de descarga individuales son controladas mediante válvulas de seccionamiento y salen de un múltiple común que permite la uniformidad en el flujo.

El uso de tubos de acrílico ayudara a tener una visión perfecta de los fenómenos que se presenten.

Cada tubería de descarga cuenta con una válvula de seccionamiento, para controlar el flujo, así como en el múltiple de descarga para el control total del flujo. El modelo tiene una bomba aguas abajo del modelo para efectuar la recirculación. En la tubería de entrada al cárcamo existe una unas mamparas para dirigir el flujo sin turbulencias al interior del cárcamo.

4.2.6 Instrumentación y Procedimiento de Prueba

El gasto individual de la tubería de succión de cada bomba, así como el flujo total de los 10 equipos es medido con una placa de orificio con dimensiones de acuerdo a normas ASME y manómetro diferencial tipo U, con fluido de trabajo de mercurio Marca Dwyer Serie 475. Los instrumentos fueron calibrados antes de efectuar las mediciones. La abertura de las válvulas fue ajustada para tener el gasto constante requerido.

El nivel cárcamo es medido con un manómetro referenciado al nivel de fondo. La formación de vórtices es visualizada con permanganato de potasio, y su magnitud es comparada en la escala de Hecker de las figuras 4.11 y 4.12.

Las fluctuaciones de la velocidad y niveles de turbulencia fueron medidas aguas arriba de la campana de succión con una propela libre de giro, modelo 412 Nixon Streamflow. El panel de control conectado a la propela, toma 9000 lecturas en un lapso de 30 segundos, mediante el software denominado HPVVEE que determina las velocidades promedio y desviación estándar de las lecturas. La sonda para medir la velocidad en la campana de succión está localizada a intervalos de 45° en puntos fijos.

La medición del ángulo de la turbulencia en la tubería de descarga es obtenida con la siguiente relación:

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{V_r}{u} \right) \quad [4.7]$$

V_r = Velocidad tangencial de la Hélice

u = Velocidad axial promedio en el tubo $\left(\frac{Q}{A} \right)$

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\pi dn}{u} \right)$$

d = Diámetro de la hélice del rotámetro

n = Velocidad de rotación en revoluciones por segundo

u = Velocidad axial promedio en el tubo $\left(\frac{Q}{A} \right)$

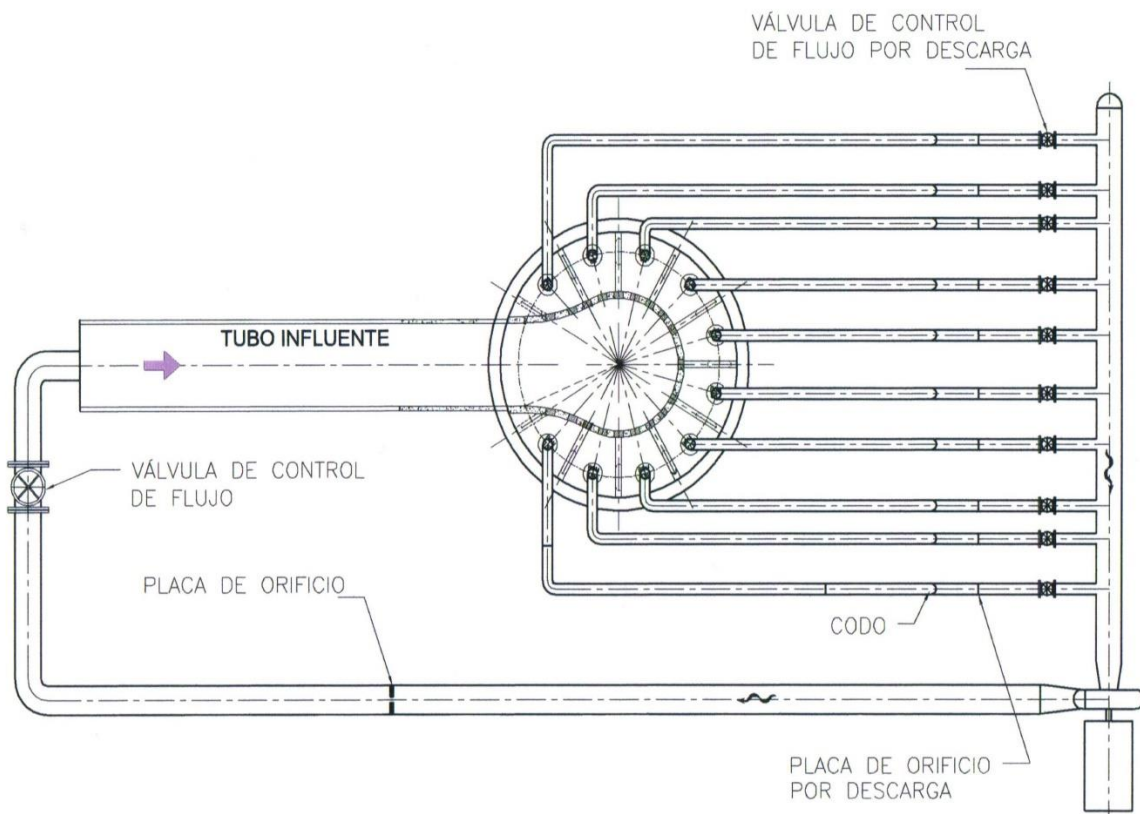


Figura No. 4.13 Arreglo del modelo hidráulico

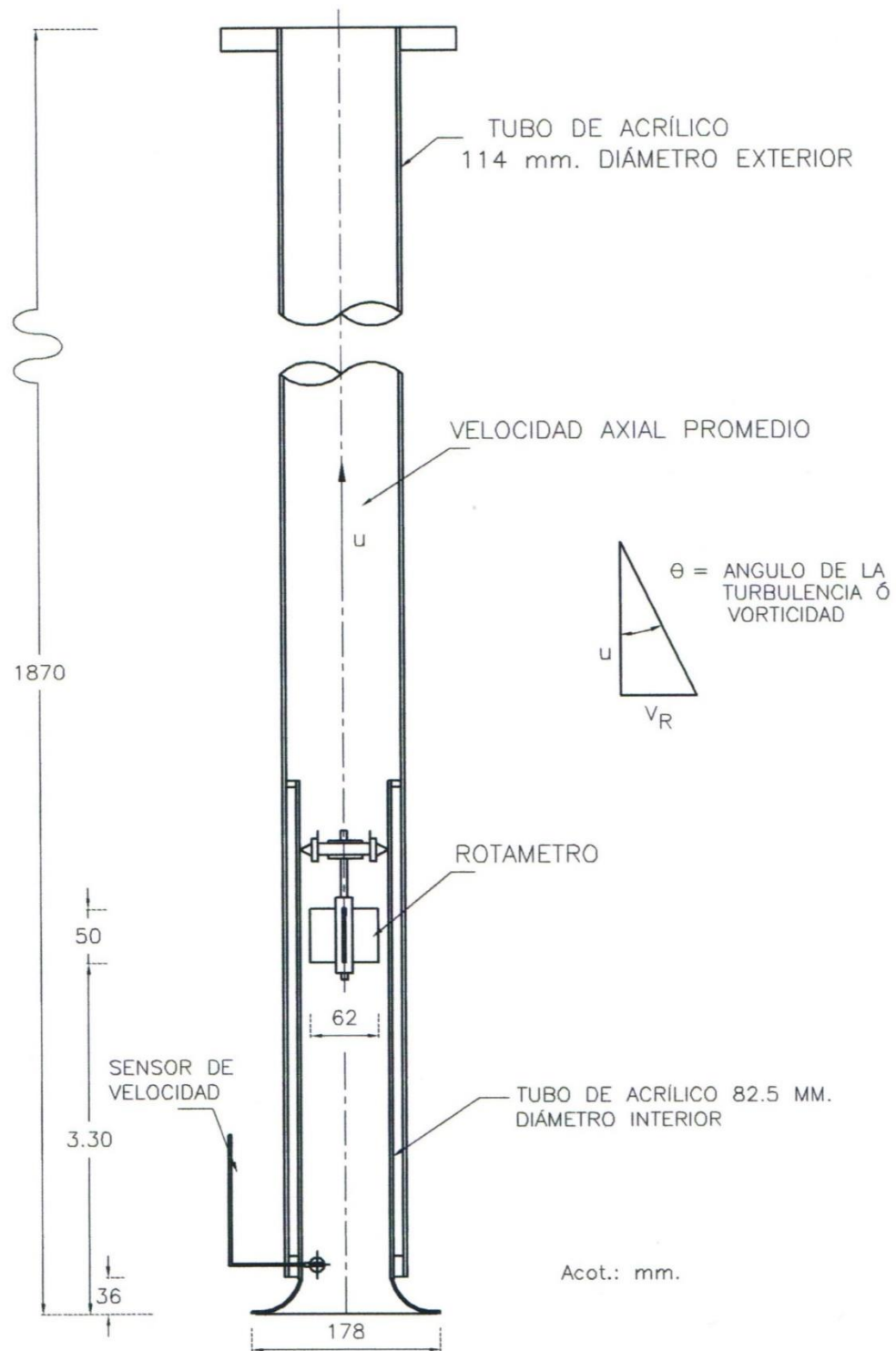


Figura 4.14 Instrumentación en la tubería de descarga del modelo hidráulico y dimensiones

4.2.7 Metodología del Procedimiento de Prueba.

1. Prueba del modelo según el proyecto original

La prueba es conducida con las dimensiones del proyecto original, el objetivo primordial evalúa las condiciones de la proximidad de flujo a la campana de succión y determinar las condiciones adversas. En general la formación de vórtices, prerrotación, distribución de velocidades, niveles de turbulencia y condiciones de flujo se evalúan.

2. Prueba para efectuar modificaciones al modelo

La prueba tiene como finalidad realizar las modificaciones que alivian o minimizan los efectos potenciales dentro del cárcamo. Las pruebas se conducen sistemáticamente para buscar los cambios requeridos para estar dentro de los criterios de aceptación establecidos.

3. Prueba para comprobar modificaciones

De acuerdo los datos obtenidos en las pruebas se realizan las modificaciones requeridas y se verifican los patrones de flujo de acuerdo a las restricciones y objetivos expresados en las dos fases de pruebas anteriores.

4.2.8 Reporte de los Resultados de la Prueba.

4.2.8.1 Prueba del modelo según el proyecto original

Esta prueba se efectúa como se indicó, con las dimensiones del proyecto y las condiciones de operación reales, simulando el comportamiento que tendrá la planta de bombeo y se obtienen las siguientes observaciones.

1. La prueba revela que al interior del muro amortiguador las condiciones de flujo son inestables y con relativa turbulencia, sin embargo disipa de una

forma muy conveniente los disturbios e inestabilidades que presenta el fluido al entrar a la zona de las celdas de bombeo.

2. Todas las celdas de bombeo tienen actividad de vórtices de forma constante e intermitente tanto en las mamparas, como en la zona de la campana de succión y la pared interior del cárcamo.
3. Se observa también que el valor de la prerrotación varía significativamente cuando entran en operación más de dos equipos, observándose esta tendencia que es mayor en los equipos próximos al tubo de entrada al cárcamo de bombeo.
4. Derivada de la prerrotación las lecturas de turbulencia están fuera de los criterios de aceptación.
5. El nivel del agua no tiene influencia en las condiciones de vorticidad, por lo tanto en la buena operación de la bomba. La razón es derivada de que el dimensionamiento de los orificios en el muro amortiguador permite tener la velocidad dirigida de tal forma que se eviten corrientes parasitas.
6. Las bombas 5 y 6 fueron las más afectadas con la formación de vórtices y prerrotación en los patrones de aproximación de flujo a la campana de succión.

1.2.8.2 Prueba para efectuar modificaciones al modelo

Las pruebas efectuadas indican que existe una actividad de vórtices que evitan patrones de flujo deseables, por lo que las acciones preventivas conducirán a tener valores que sean dentro de las recomendaciones descritas con anterioridad.

1. Debido a que se trata de una planta de bombeo de agua residual o combinada, no es posible adoptar por soluciones que conduzcan el flujo por medio mamparas o paneles y disminuir la actividad de los vórtices, ya que se crearían zonas de azolvamiento.

2. El cierre del espacio entre el baffle adyacente a la campana de succión y que forma la celda de bombeo, no se recomienda eliminarla, ya que se incrementan la recirculación entre las campanas de succión adyacentes.
3. Antes de llegar a la solución definitiva en la succión del equipo de bombeo, se probaron varios tipos de dispositivos antivórtices, para medir su eficacia. Una simple cruz que se utilizó en las pruebas, demostró que se produjo separación del flujo frente a las campanas de succión. Otro dispositivo que se ensayó fue un prisma cónico, con una cruz que nace del prisma, lo que condujo a una solución más efectiva, derivado de la conducción con cambios de dirección suaves y el no tener zonas muertas en la distribución del flujo.
4. Mientras que en todas las celdas de bombeo los prismas antivórtices demostraron su efectividad, en las celdas 5 y 6 se seguía presentando la misma problemática de recirculación entre campanas de succión del equipo de bombeo por la interacción de las mamparas divisorias entre cámaras de bombeo.
5. Se ensayó aumentar 8 celdas frente a la bomba 5 y 6, y el resultado que se obtuvo fue la disminución del flujo requerido a los lados de la campana de succión y que es ahora aportado por el aumento de los orificios en el muro amortiguador.
6. Estas modificaciones permiten tener los perfiles de velocidades y la prerrotación dentro de los criterios establecidos de aceptación.
7. La turbulencia en algunos casos es mayor al 15%, pero con muy baja frecuencia.
8. El colorante en el fluido indica con estas modificaciones, un flujo estable alrededor de las campanas de succión se logra.

4.2.8.3 Prueba para comprobar modificaciones

De acuerdo los datos obtenidos en las pruebas se concluyen que deberán realizarse las siguientes acciones:

1. Todas las campanas de succión tendrán un prisma antivórtice en la parte inferior.

2. Adicionar 8 orificios al muro amortiguador frente a la bomba No. 5 y No. 6.

RESULTADOS SIN MODIFICACIONES AL MODELO HIDRAULICO DEL CARCAMO DE BOMBEO											
No.Prueba 6	Prototipo	Actividad de los Vórtices Sumergidos (I= Intermitente C= Constante)					Velocidad (% del Promedio) y Turbulencia			Prerrotación Máxima (Grados)	
		Bomba	Flujo (l/s)	Superficiales	Pared Cárcamo	Pared Adyacente	Piso	Mitad Celda Bombeo	Velocidad Mínima		Velocidad Máxima
1	2000	no	I3	I3	C3	no					3.6
2	2000	no	I3	I3	C3	no					4.0
3	2000	no	I3	I3	C3	no					4.9
4	2000	no	I3	I3	C3	no					6.8
5	2000	no	I3	I3	C3	no	-9.6	8.9	21.8		1.4
6	2000	no	I3	I3	C3	no					1.0
7	2000	no	I3	I3	C3	no					6.1
8	2000	no	I3	I3	C3	no					1.2
9	2000	no	I3	I3	C3	no					2.4
10	2000	no	I3	I3	C3	no					2.1
Nivel del agua: 2 210.95 msnm Nivel Fondo de Cárcamo: 2 198.00 msnm											
El nivel de agua de la prueba corresponde a 2 m arriba del muro amortiguador											
Condiciones de la superficie libre de agua al centro del cárcamo y en la celda de bombeo estables											
Condiciones en la celda de bombeo inestables con cambios en la dirección de los patrones de flujo											
Aproximación del flujo a las campanas de succión no uniforme											
Actividad alta de formación de vórtices											
Prerrotación elevada											

Tabla No. 4.1 Resultados Sin Modificaciones

RESULTADOS CON MODIFICACIONES AL MODELO HIDRAULICO DEL CARCAMO DE BOMBEO											
No.Prueba 6	Prototipo	Actividad de los Vórtices Sumergidos (I= Intermitente C= Constante)					Velocidad (% del Promedio) y Turbulencia			Prerrotación Máxima (Grados)	
		Bomba	Flujo (l/s)	Superficiales	Pared Cárcamo	Pared Adyacente	Piso	Mitad Celda Bombeo	Velocidad Mínima		Velocidad Máxima
1	2000	no	I2	I2	no	no					1.5
2	2000	no	no	no	no	no					no
3	2000	no	I2	I2	no	no					2.4
4	2000	no	no	no	no	no					no
5	2000	no	I2	I2	no	no	-6.8	8.9	14.5		1.6
6	2000	no	I2	I2	no	no					0.9
7	2000	no	I2	I2	no	no					3.8
8	2000	no	no	no	no	no					no
9	2000	no	no	no	no	no					no
10	2000	no	no	no	no	no					no
Nivel del agua: 2 210.95 msnm Nivel Fondo de Cárcamo: 2 198.00 msnm											
El nivel de agua de la prueba corresponde a 2 m arriba del muro amortiguador											
Placa antivórtice tipo cono instalada en bombas No. 7											
Placa antivórtice tipo cruz instalada en bombas No. 1,3,5 y 6											
Ocho orificios se adicionaron al muro amortiguador frente a la Bomba No. 5 y 6											
El uso de la placa antivórtice tipo cono es la solución a la prerrotación											

Tabla No. 4.2 Resultados Con Modificaciones

La tabla No. 4.1 indica los resultados del modelo hidráulico como fue diseñado originalmente y la tabla No. 4.2 las mediciones ya efectuadas con las modificaciones donde se eliminaron tanto los vórtices como el flujo inestable.

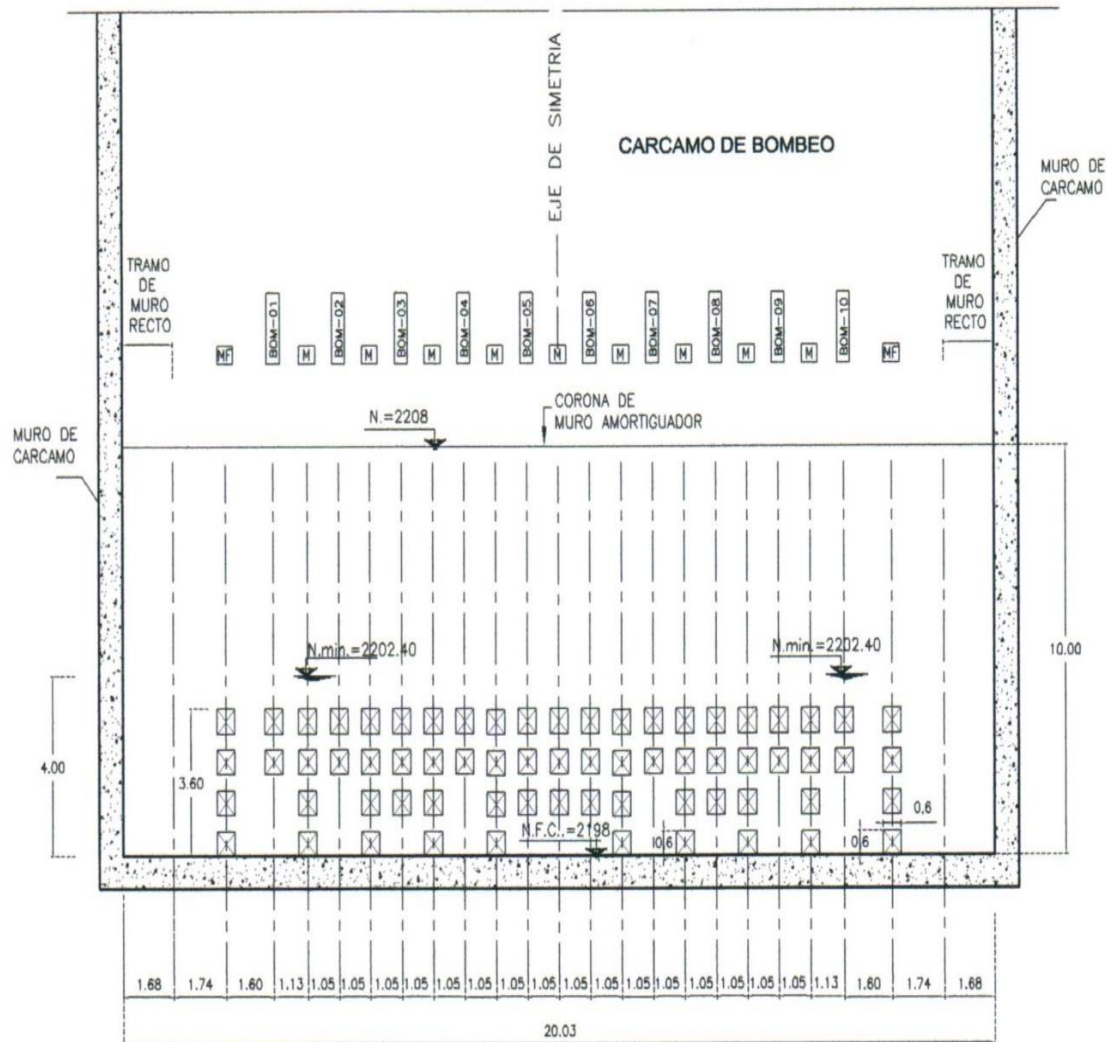


Figura No. 4.15 Diseño modificado del muro amortiguador

En la figura No. 4.15 donde se localiza el eje de la bomba No. 5 y 6, se adicionaron 8 orificios que permiten aportar a cada celda de bombeo una cantidad de agua suficiente para que no exista la interacción con las bombas adyacentes, tal como se

demonstró en el los cuadros No. 4.3 y 4.5 de los resultados obtenidos en dicha prueba.

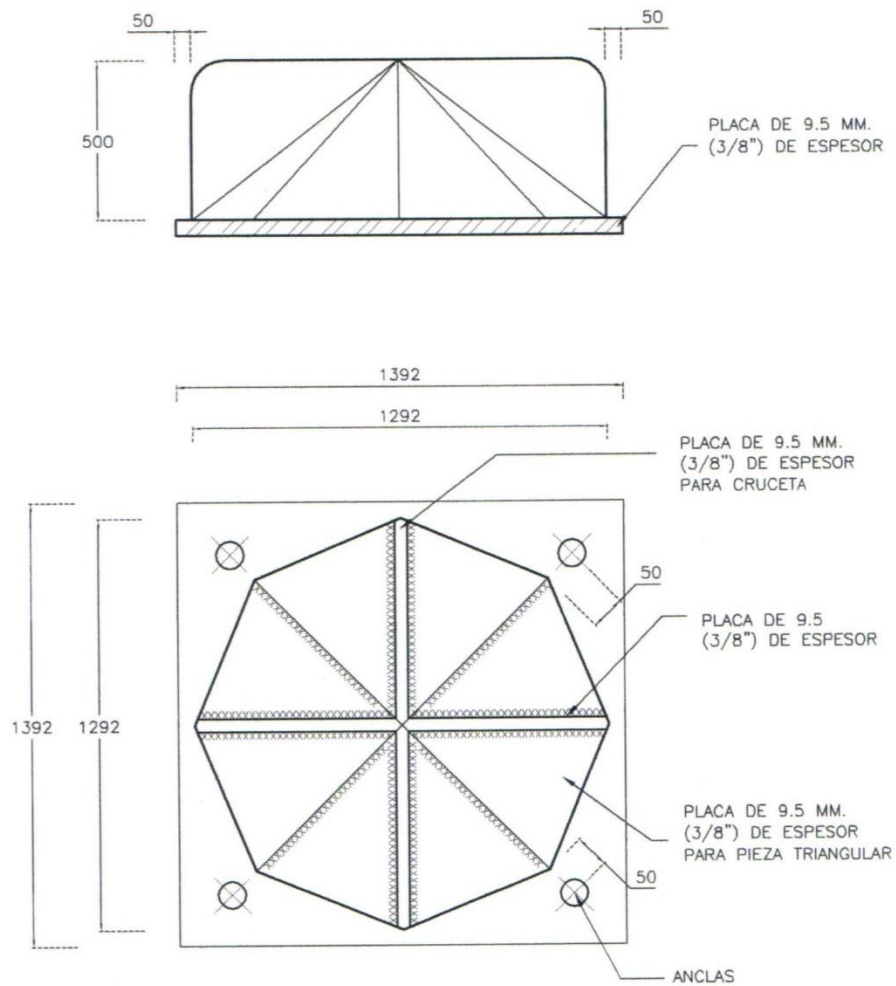


Figura 4.16 Dispositivo Antivórtice

El dispositivo antivórtice que se muestra en la figura 4.16 es el resultado de varios ensayos, que durante la operación del equipo permite que se disminuya al mínimo la formación de vórtices que deriven en la operación con vibración del equipo y por lo tanto un desgaste prematuro del mismo. El diseño de estos dispositivos en el caso de no tener la opción de efectuar una prueba se debe de recurrir a las recomendaciones del fabricante del equipo de bombeo.

4.3 RESULTADOS DEL CÁLCULO PARA DETERMINAR LAS VELOCIDADES DE LA BOMBA, CON SUS RESPECTIVOS NIVELES DE OPERACIÓN

4.3.1 Cálculo de las Velocidades de Operación para las Distintas Cargas de Bombeo

De acuerdo con la Tabla No. 4.3 en donde se resumen de resultados de las Cargas de Bombeo, y de acuerdo a las leyes de afinidad, se calculan las velocidades que proporcionen las características del bombeo requerido para los distintos niveles de operación que se presentan en el cárcamo, derivado de las condiciones imperantes en el drenaje profundo de la Ciudad de México. Es importante mencionar que el criterio de operación para evitar muchas variables se reduce a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y para cada nivel de operación está asociada una diferente velocidad de operación, de tal manera que las dos variables de operación son únicamente el nivel en el interior del cárcamo y la velocidad del equipo de bombeo.

Así mismo es conveniente determinar la forma en que se todos los equipos entran en funcionamiento, para cubrir las condiciones de gasto requeridas, siendo relevantes las siguientes condiciones:

1. La planta de bombeo siempre se trabaja a gasto constante, para cada uno de los equipos de bombeo, a pesar de las variaciones tan grandes entre el nivel máximo y mínimo. Esta variación es de 16.65 m.
2. No existe variación de la eficiencia prácticamente, ya que el intervalo de operación es de 1.85 m.
3. Las posibles afectaciones por vibración, derivadas de trabajar al equipo de bombeo fuera de sus intervalos óptimos de eficiencia se eliminan.
4. La operación de la planta se reduce al máximo, ya que solo hay que indicar el número de equipos que trabajan a los distintos niveles y su velocidad de rotación.

CUADRO RESUMEN VELOCIDADES DE OPERACIÓN			
GASTO BOMBEADO (lps)	CARGA DINAMICA TOTAL (mca)	NIVEL EN CARCAMO (m)	VELOCIDAD DE LA BOMBA (rpm)
20,000.00	11.02	2,222.05	551
18,000.00	12.67	2,220.20	578
16,000.00	14.34	2,218.35	600
14,000.00	16.03	2,216.50	620
12,000.00	17.75	2,214.65	637
10,000.00	18.97	2,212.80	648
8,000.00	20.62	2,210.95	661
6,000.00	22.19	2,209.10	673
4,000.00	23.74	2,207.25	682
2,000.00	25.16	2,205.40	690

Tabla No 4.3 Resumen de las Velocidades de Operación

Como se describió anteriormente, el resultado del cálculo para determinar la carga dinámica total de la bomba y los niveles que la generaron, determinan la velocidad de rotación del equipo, resultados que se presentan en las tablas No 4.4 y 4.5, en donde se muestra solo un resumen para ejemplificar la forma de operación de cada cárcamo de bombeo con gastos de 2 m³/s, 4 m³/s, 18 m³/s y 20 m³/s.

Esta forma de operación simplificada, facilita las acciones al medir el nivel del agua en el cárcamo y relacionarlos con el número de equipos y su velocidad de rotación. Dicho de otra forma, la operación de la planta se reduce al manejo de 3 variables.

GRUPO No. 1 $Q_t = 2 \text{ m}^3/\text{s}$			GRUPO No. 2 $Q_t = 4 \text{ m}^3/\text{s}$		
EQUIPOS EN OPERACIÓN	NIVEL EN CARCAMO (m)	VELOCIDAD DE LA BOMBA (rpm)	EQUIPOS EN OPERACIÓN	NIVEL EN CARCAMO (m)	VELOCIDAD DE LA BOMBA (rpm)
1	2,205.40	690	1	2,207.25	682
			2	2,207.25	682

Tabla No 4.4 Número de equipos en operación para entregar $2 \text{ m}^3/\text{s}$ y $4 \text{ m}^3/\text{s}$

GRUPO No. 9 $Q_t = 18 \text{ m}^3/\text{s}$			GRUPO No. 10 $Q_t = 20 \text{ m}^3/\text{s}$		
EQUIPOS EN OPERACIÓN	NIVEL EN CARCAMO (m)	VELOCIDAD DE LA BOMBA (rpm)	EQUIPOS EN OPERACIÓN	NIVEL EN CARCAMO (m)	VELOCIDAD DE LA BOMBA (rpm)
1	2,220.20	578	1	2,222.05	551
2	2,220.20	578	2	2,222.05	551
3	2,220.20	578	3	2,222.05	551
4	2,220.20	578	4	2,222.05	551
5	2,220.20	578	5	2,222.05	551
6	2,220.20	578	6	2,222.05	551
7	2,220.20	578	7	2,222.05	551
8	2,220.20	578	8	2,222.05	551
9	2,220.20	578	9	2,222.05	551
			10	2,222.05	551

Tabla No 4.5 Número de equipos en operación para entregar $18 \text{ m}^3/\text{s}$ y $20 \text{ m}^3/\text{s}$

4.3.2 Metodología para la Operación

Derivado del cálculo de las velocidades de trabajo de los equipos de bombeo, se genera el procedimiento para la obtención de una operación segura y sencilla y por consiguiente libre de riesgos de descomposturas por desconocimiento. En los cuadros anteriores, se define la política de trabajo, en donde el intervalo de operación se divide en 10 niveles, el primer nivel, en la parte inferior del cárcamo, corresponde a la operación de un equipo, es decir el gasto bombeado es de $2\text{m}^3/\text{s}$, mientras que el nivel 10, le corresponde la operación del conjunto de 10 equipos, con un gasto total de $20\text{ m}^3/\text{s}$, en la parte superior.

Con el trabajo de los dos cárcamos, la planta puede bombear $40\text{ m}^3/\text{s}$, para entregar el gasto de diseño. Cabe hacer notar, que todo esto se da en el marco de un gasto constante de 2,000 lps, para todos los niveles de trabajo. La nomenclatura que se eligió para definir el número de equipos en operación, es por ejemplo; al grupo 10, le corresponden el trabajo en conjunto de 5 bombas, con el nivel de operación 10 y la velocidad definida también como 10, las cuales vienen reflejadas en la tabla de trabajo de grupo 10.

Pasos a seguir en el arranque de los Equipos de Bombeo

1. Prelubricar el equipo de bombeo.
2. Realizar la secuencia de arranque verificando que los permisivos y parámetros de arranque del motor diésel sean correctos para su adecuado funcionamiento.
3. Si se presenta falla en el equipo correspondiente, enviara una señal sonora después de tres intentos de arranque.
4. Trabajar el motor en vacío para que tome la temperatura de trabajo.

5. Llevar al equipo a la velocidad requerida para efectuarse el embrague entre motor y equipo de bombeo.
6. Se dará paso a iniciar la secuencia de arranque en el equipo subsecuente.
7. Si no se presenta falla se sigue con la secuencia de arranque.
8. Todo el grupo o equipos se llevaran a la velocidad que corresponde a su nivel.
9. Después de 20 segundos de haberse completado el ciclo del arranque, se deberá cerrar la válvula rompedora de presión.
10. Todos los parámetros de trabajo del motor diésel son monitoreados durante toda la operación de la planta, como son temperatura del agua, presión del aceite, nivel de refrigerante, velocidad del motor.
11. La temperatura del cabezal engranado, así como la vibración se estarán verificados durante todo el tiempo de operación de la planta.
12. Todas las variables objeto de la medición o señalamiento del control supervisorio deberá ser visualizada mediante pantallas mímicas de cada zona de control
13. Si ocurre durante la operación de la planta de bombeo una falla, se emitirá una señal audible, asociado al reporte de falla correspondiente, teniendo en cuenta que se pondrá en la pantalla el equipo fuera de operación por falla con un color rojo. Cabe aclarar que el verde será para los equipos en operación y amarillo aquellos que están fuera de operación.
14. Todas las fallas de los equipos se podrán visualizar en la pantalla de control, mandando una señal visual en cualquier escenario que se encuentre el operador.

15. Todas las fallas deberán ser enviado al archivo de historial de fallas.
Cuando el nivel del cárcamo suba, se agregara otro equipo de bombeo, posicionando todo el grupo a la velocidad correspondiente.
Si el nivel del cárcamo baja, se procederá a sacar la operación del equipo que sea el indicado para llevar al sistema al grupo de equipos que le corresponda al nivel asignado.
Es importante aclarar que los equipos deberán tener una rotación constante, para que su desgaste sea uniforme.
16. La falla en un equipo bloqueará su operación, hasta que se repare y se agregue al sistema.
17. Cada que un equipo se ha sacado del bombeo, se procederá a abrir la válvula de sifón, bajar la velocidad y desembragar, ya que el equipo cuenta con embrague neumático. Una vez efectuado esta operación se dejara al motor diésel trabajar.
18. Si el nivel del cárcamo sube, el proceso interrumpirá el ciclo de apagado, retrocediendo la secuencia descrita, ejecutándose el proceso relatado con anterioridad.
19. La operación de las rejillas no tiene efecto en la decisión de número de equipos que entran en operación, considerándose independiente su funcionamiento, ya que cuentan con una medición diferencial, es decir antes y después de la rejilla que bajo una diferencial de carga determinada, arrancan de forma automática.

CONCLUSIONES

Se diseñó planta de bombeo de 40 m³/s, en donde se observan dos estructuras principales las cuales se dan las recomendaciones o conclusiones importantes el proyecto, construcción y su operación.

El diseño de la Lumbrera de Rejillas logró tener una uniformidad de gasto en cada canal y con ello la eficiencia de la remoción de basura. Esto se obtuvo mediante la verificación y optimización del diseño través de un modelo matemático que corrobora y se logró el dimensionamiento geométrico adecuado del sistema de rejillas, canales y compuertas, Las características del arreglo mecánico contemplaron dos compuertas para darle mantenimiento a cada canal además de la zona que puede seccionar cada canal, por medio de tabletas de acero, en caso de que llegaran a fallar las compuertas. De estas experiencias es importante mencionar que no solo la selección del equipo es adecuada, sino que también el comportamiento hidráulico es de suma importancia, Es recomendable que el flujo a través de las rejillas sea uniforme, libres de remolinos y que la velocidad sea constante, lo cual evitara un efecto de pistón que provoque que la basura se incruste y pase de lado al lado de la rejilla. Es importante mencionar, para una planta de bombeo de vital importancia no tener solidos que puedan obstruir el funcionamiento libre del impulsor.

Las características principales de los equipos seleccionados en la lumbrera de rejillas son:

Lumbrera Rejillas	16 m de diámetro 26.01 de altura
Compuertas	3.50 m ancho 4.50 m alto
Carga Hidrostática de la Compuerta	17.51 mca

Gasto en la Compuerta	20 m ³ /s
Numero de compuertas	6
Rejillas	4.0 m ancho 6.0 m altura
Abertura en rejilla	51 mm
Gasto en la rejilla	20 m ³ /s
Numero de rejillas	3

Para el Cárcamo de bombeo que se diseña con este caudal es obligada la verificación del comportamiento hidráulico por medio de un modelo a escala, donde se compruebe que el dimensionamiento de las celdas de bombeo, mamparas y muro amortiguador, sea eficaz, reduciendo la formación de vórtices y confirmando la política de operación en cuanto a la secuencia de operación de los equipo y a sus niveles de arranque y paro. El uso de rompedores de vórtices en la succión del equipo de bombeo también deberá ser analizado, siendo modelado también, para que exista una afinidad entre ambos diseños.

Es muy importante involucrar a los fabricantes, de los equipos, para que estos tengan la plena responsabilidad del funcionamiento del conjunto.

Para tener la seguridad completa en el comportamiento del equipo en conjunto con el cárcamo de bombeo, es recomendable hacer las pruebas para verificar la sumergencia antivórtice, así como la prueba de NPSH, lo que dará certeza de todas las variables que se tienen en juego son tomadas en cuenta en el diseño y elección de los niveles de operación.

Aunque no es objeto de estudio en la tesis, también como conclusión hay que destacar análisis del comportamiento del conjunto grupo motor bomba y losa de operación, que nos permita tener la certeza de un trabajo libre de vibraciones en todo el intervalo de operación del equipo de bombeo.

Para que un sistema de bombeo, cumpla con su finalidad, libre de problemas de operación, se debieron de analizar tanto fenómenos hidráulicos como mecánicos de todos los elementos que entran en funcionamiento, así como su relación con las obras civiles que los alojan. No debe de seccionarse el análisis de trabajo de conjunto, siendo responsabilidad del diseño el buen funcionamiento de la Planta de bombeo, auxiliándose de las mejores prácticas técnicas de ingeniería que se tienen hasta ese momento

Cárcamo	16 m diámetro
	30 m de profundidad
Numero de Cárcamos	2

Bombas

Carga	25.16 mca
Gasto	2 m ³ /s
Eficiencia	89%
Número de bombas/Cárcamo	10/2
Cabezal engranado	1 984 hp potencia máxima transmitida
Motor Diésel	1 000 hp nominales

BIBLIOGRAFIA

- [1] Manual de Diseño Hidráulico de Plantas de Bombeo de Cárcamo Circular
Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica
Secretaría General de Obras
Departamento del Distrito Federal
1989
- [2] Centrifugal Pump Handbook, Sulzer Pumps, Editorial Elsevier, Tercera Edición 2010
- [3] Garr M. Jones, Pumping Station Design, Editorial Elsevier, Tercera Edición 2006
- [4] Igor Karassik, Pump Handbook, Editorial Mc Graw Hill, Tercera Edición 2001
- [5] John L Dicmas, Vertical Turbine, Mixed Flow and Propeller Pumps, Editorial Mc Graw Hill, 1987
- [6] Kurt Hölzenberger, Klaus Jung, Centrifugal Pump, KSB, Tercera Edición 1990
- [7] A.J. Stepanoff, Centrifugal and Axial Flow Pumps, Editorial John Wiley & Sons, 1976
- [8] Ion I Inel, Pumps and Pumping, Elsevier, 1986
- [9] Val S Lobanoff, Centrifugal Pumps Design & Application, Editorial Gulf Publishing Company, 1985
- [10] John Tuzson, Centrifugal Pump Design, Editorial John Wiley & Sons, 2000