



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"SISTEMA CUTZAMALA: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL
DE LA PLANTA DE BOMBEO 5 Y PROPUESTAS DE SOLUCION
PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DE SU OBRA DE
EXCEDENCIAS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A:
MIRIAM BENITEZ BOLAÑOS

DIRECTOR DE TESIS:
ING VICTOR FRANCO



MEXICO, D.F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

"SISTEMA CUTZAMALA: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL
DE LA PLANTA DE BOMBEO 5 Y PROPUESTAS DE SOLUCION
PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DE SU OBRA DE
EXCEDENCIAS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERA CIVIL

P R E S E N T A:
MIRIAM BENITEZ BOLAÑOS

DIRECTOR DE TESIS:
ING VICTOR FRANCO



MEXICO. D.F.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/ 106/02

Señorita
MIRIAM BENITEZ BOLAÑOS
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. VÍCTOR FRANCO**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tema de tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"SISTEMA CUTZAMALA: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE LA PLANTA DE BOMBEO 5 Y PROPUESTAS DE SOLUCIÓN PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DE SU OBRA DE EXCEDENCIAS"


INTRODUCCIÓN

- I. **ESTADO DEL ARTE: INFRAESTRUCTURA DEL SISTEMA CUTZAMALA**
- II. **UBICACIÓN DE LA PLANTA DE BOMBEO No. 5**
- III. **DISEÑO, DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN EL INSTITUTO DE INGENIERÍA.**
- IV. **RECOMENDACIONES**
- V. **CONCLUSIONES**

Ruego a ustedes cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo les recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberán prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitario a 1º de julio de 2002.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.



Agradecimientos


A la Universidad Nacional Autónoma de México y de especial manera a la Facultad de Ingeniería, por mi formación y conocimientos.

*Agradezco al Instituto de Ingeniería por
El tiempo, las facilidades y el apoyo
recibido para desarrollar este trabajo.*

*Al Ing. Victor Franco por su enorme
Paciencia, motivación y confianza
depositada en mí.
Lo logré Ing., tarde pero seguro.*

*A cada uno de los seres que
Estuvieron apoyándome y motivando
A seguir adelante y que de igual manera
Mantuvieron su confianza depositada
En mí.
Familiares y amigos.*

*Un gracias enorme para mi primo
Chuchín, que me ayudo a ultimar detalles
De mi presentación .Gracias, gracias, gracias...*



*También agradezco a Fidel el
Haberme apoyado en los momentos
Críticos y de dudas. Por su
Enorme paciencia y apoyo.*

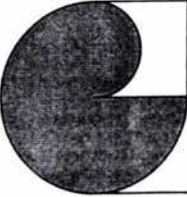


Dedicatorias

*A ese alguien especial que
Me motiva a ser mejor cada día
Que no me juzga, cuestiona o crítica.
Ese ser que me dio la oportunidad
De estar en este instante de tiempo
Que me otorgo el milagro de pensar,
De vivir, de amar, cuestionar y disfrutar.*

*En especial a mis dos abuelos.
Que se fueron antes de que yo pudiera
deleitarme de sus anécdotas, pero que los
Conservo en mi corazón y memoria.*

*Para cada uno de mis profesores
que tuve en la carrera y de los cuales
no solo obtuve conocimiento, sino
también apoyo, compañía, motivación y amistad.*



INDICE

INTRODUCCION	i
OBJETIVO	ii

CAPITULO 1 ESTADO DEL ARTE: SISTEMA CUTZAMALA(SC)

1.1	Sistema Cutzamala (SC)	1
1.1.1	Presas que integran al SC	4
1.2	Planta Potabilizadora "Los Berros"	6
1.3	Plantas de Bombeo	8
1.3.1	Fenómenos transitorios que se presentan en las plantas de bombeo	9
1.3.2	Torres de oscilación y sumergencia	13
1.4	Obras de Excedencias	16

CAPITULO 2 UBICACIÓN DE LA PLANTA DE BOMBEO # 5 (PB 5)

2.1	Infraestructura existente y descripción	18
2.1.1	Sistema de seguridad: Obras de exedencias y elementos que la integran	21
2.2	Problemas que se presentan por un corte de energía eléctrica en la PB 5	23
2.2.1	Algunas alternativas para mejorar la eficiencia de la obra de exedencias	24

CAPITULO 3 DISEÑO, DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EN EL INSTITUTO DE INGENIERÍA

3.1	Elementos fundamentales en Modelos	28
3.2	Planteamiento y proceso de desarrollo del modelo	29
3.2.a	Visitas al lugar donde se encuentra la PB5	30
3.2.b	Determinación del área de trabajo y pruebas	31
3.2.c	Utilización del número de Froude para diseñar el modelo	32
3.3	Selección de escalas	35
3.4	Diseño del modelo	36
3.4.1	Aspectos generales en canales	36
3.4.2	Selección del material de construcción del modelo	39
3.5	Construcción y Operación del modelo	40

3.5.1.....Construcción del modelo	40
3.5.2.....Operación del Modelo	42

CAPITULO 4 PRESENTACION DE RESULTADOS

4.1 Solución del tramo: Tubo de descarga – Caja de captación	46
4.2 Solución del tramo: Caja de captación	50
4.3 Solución del tramo: caja de amortiguamiento	53
4.4 Solución del tramo: Tuberías de descarga aguas arriba	58
4.5 Propuesta de diseño de cimacio en la zona de llegada	61
4.6.a.....Vertedor tipo Cimacio	62
4.6.b.....Diseño de Cimacio	62

CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES **64**

ANEXO A

ANEXO B

ANEXO C

ANEXO FOTOGRAFICO

BIBLIOGRAFIA

REFERENCIAS

INTRODUCCIÓN

El agua es el elemento fundamental que ha acompañado a toda civilización desde el inicio de los tiempos.

La fundación de la Gran Tenochtitlan fue un caso particular, de entre todas las culturas que han poblado la tierra. La nuestra floreció en un complejo lacustre, a más de 2,240m sobre el nivel del mar, en un llano rodeado por lagos y montañas; por lo que desde ese entonces el suministro de agua a los habitantes y el poder controlar los efectos destructivos que se originaban por las constantes inundaciones, nos han llevado una incesante y continua búsqueda y lucha por el agua y contra el agua.

De toda la gran problemática a la que se enfrenta la Cd de México, el abastecimiento de agua que se le hace a esta gran metrópoli, es de suma importancia, ya que es el agua un elemento vital, necesario e importante en cualquier lugar en donde se encuentre una población. Es necesario remarcar que el crecimiento de la población ha provocado la reducción de las zonas naturales de recarga, motivo por el cual se origina la desequilibrada distribución del vital líquido; así como la dispersión en los componentes del sistema hidráulico por la necesidad de utilizar fuentes cada vez más alejadas, haciéndolo complejo y costoso en su operación.

Las fuentes con que actualmente cuenta la ciudad para abastecer de agua se encuentran, fundamentalmente, en la zona poniente, norte y sur del Distrito Federal, es por eso que la zona más conflictiva, es la que se encuentra en la zona oriente.

Para que el suministro de agua sea satisfactorio, es necesario que las componentes del sistema hidráulico funcionen de manera continua durante los 365 días del año, esto provoca que su vida útil disminuya rápidamente y a la vez hace vulnerables a los componentes más antiguos del sistema.

En el año de 2000, al Distrito Federal se le abastecía con 35 m³/s de agua potable, provenientes principalmente del subsuelo del Valle de México que aporta el 58% de dicho caudal; otro 27% proviene de la Cuenca del Cutzamala y es transportada desde una distancia de 127 kilómetros y bombeada a una altura de más de 1,000 metros para introducirla al valle de México; el resto es aportado por manantiales de la Ciudad y por el Acuífero del Valle de Lerma.

Por el continuo crecimiento de la población de la Ciudad de México, la demanda del agua es cada día en mayores volúmenes. Para satisfacer esta necesidad se ha tenido que sobre explotar el acuífero de la cuenca, razón por la cual los niveles del acuífero se están abatiendo con rapidez, un metro al año en promedio, al extraérseles entre 30 y 65% mas agua que la que reciben como recarga. Los pozos tienen que ser cada vez más profundos, incrementándose así el costo de perforación y de bombeo. A medida que la extracción es más profunda, gradualmente disminuye la calidad del agua para consumo humano.

Las consecuencias negativas de la sobreexplotación de los acuíferos locales se han estado viviendo con mayor preocupación. El suelo arcilloso de los antiguos lagos se compacta y se hunde entre 6 y 28 cm anuales, dependiendo de la zona. Con el hundimiento del suelo, se quiebra la infraestructura hidráulica de la ciudad y se dañan los cimientos de los edificios. Los daños a la red de distribución propician fugas de agua potable calculadas en 30% del caudal conducido, reduciendo el abasto a los hogares. Adicionalmente, al quebrarse los tubos del drenaje, las aguas residuales se infiltran en el subsuelo contaminando progresiva y crecientemente los mantos acuíferos.

También han obligado buscar fuentes adicionales cada vez más lejanas y progresivamente se ha tenido que construir una gigantesca, sofisticada y vulnerable infraestructura de distribución de agua y desalojo de drenaje, cuya inversión y costo de operación es cada día mas alto. Primero Lerma, luego Cutzamala y ya esta en proceso la cuarta etapa de este último, Temascaltepec.

OBJETIVO

Como parte de un proyecto solicitado por la Comisión Nacional del Agua (CNA) al Instituto de Ingeniería de la UNAM, se encuentra la solución y la modelación de un problema en uno de los elementos de protección (obra de excedencia) del Sistema Cutzamala, el cual se encuentra en el tanque de aguas claras o tanque de sumergencia de la Planta de Bombeo #5 (PB5).

Este elemento de protección entra en funciones cuando se presenta un paro de bombas no programado, y es precisamente su capacidad de descarga la que se estudiara en este trabajo, ya que la obra de excedencia esta diseñada para desalojar el gasto en función de $24 \text{ m}^3/\text{s}$, situación que será verificada en este trabajo. Así también, se presentarán y propondrán los cambios necesarios para poder desalojar dicho gasto.

No se profundizará en los fenómenos transitorios que se originan; si no, más bien a los cambios que fueron necesarios hacerle a este elemento de seguridad para que desalojara un gasto de $24 \text{ m}^3/\text{s}$

- ✓ El primer capítulo se abordará comentarios, notas, elementos y características del Sistema Cutzamala en su conjunto.
- ✓ En el capítulo 2 se dará la ubicación de la Planta de Bombeo # 5 , así como los elementos que la componen, las fallas que se presentan y las posibles consecuencias que éstas podrían acarrear si no se subsanan adecuadamente.
- ✓ El tercer capítulo se refiere a la construcción de un modelo a escala en las áreas del Instituto de Ingeniería. Con el fin de analizar el comportamiento del agua y los cambios que fueran necesarios.
- ✓ En el cuarto capítulo se darán a conocer los resultados y
- ✓ En el quinto Capítulo se darán las conclusiones en el funcionamiento del modelo, así como las soluciones a los problemas que se presentaban en el prototipo para que éste trabaje eficientemente

*Cuando está suficientemente oscuro
puedes ver las estrellas
Charles A. Beard*

Capitulo 1

ESTADO DEL ARTE: SISTEMA CUTZAMALA

La finalidad de la construcción de cualquier obra hidráulica es el manejo del agua, ya sea para fines de aprovechamiento o de defensa, y es frecuente que se cumplen esas dos actividades en una misma obra.

Para determinar el tipo de obra a construir es necesario primero, como con cualquier obra de gran magnitud y que sirve para satisfacer las necesidades del ser humano, contar con el criterio de costo y justificar la construcción de la obra.

El crecimiento de los asentamientos humanos ocasiona un aumento de la demanda de agua potable, lo cual ha llevado a construir presas, ó en su defecto, traer el agua de corrientes naturales que se encuentran alejadas al sitio de consumo. Por ello, se dice que existe una relación estrecha entre la economía y el agua, esto es:

“Todas las acciones que se realizan respecto al manejo y preservación del agua deben estar sustentadas en principios de equidad social y equilibrio económico, financiero y ambiental”

(ORTIZ Rendon Gustavo, Ing. Hid. Mex-Vol.XII, #3. Pags 59-70)

En forme general, los elementos que forman una obra de aprovechamiento hidráulico de escurrimiento superficial se ilustran en la siguiente figura (Fig 1.1).*

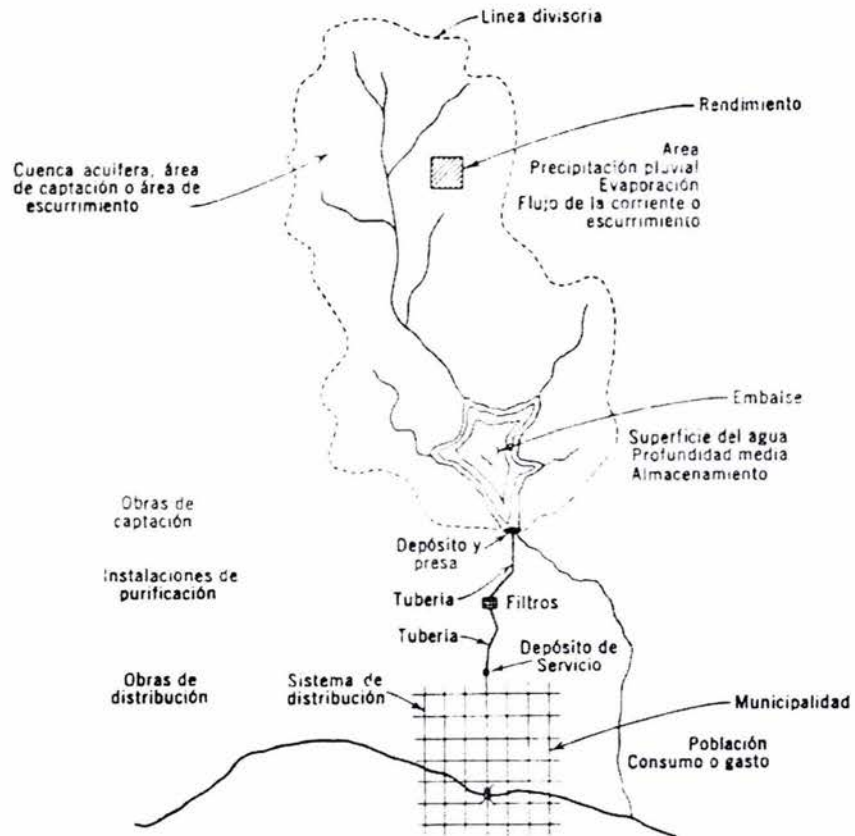


Fig 1.1 Aprovechamiento hidráulico

En este capítulo se hablará en forma general de los componentes del Sistema Cutzamala(SC), así como algunos datos acerca de cada uno de ellos. Al final se describen los fenómenos hidráulicos que se pueden presentar en la operación del SC.

1.1 SISTEMA CUTZAMALA (SC)

El sistema aprovecha los recursos hidráulicos de la cuenca alta del río Cutzamala, provenientes de las presas Tuxpan y El Bosque en Michoacán; Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo y Villa Victoria, en el Estado de México, que anteriormente formaban el sistema hidroeléctrico Miguel Alemán.

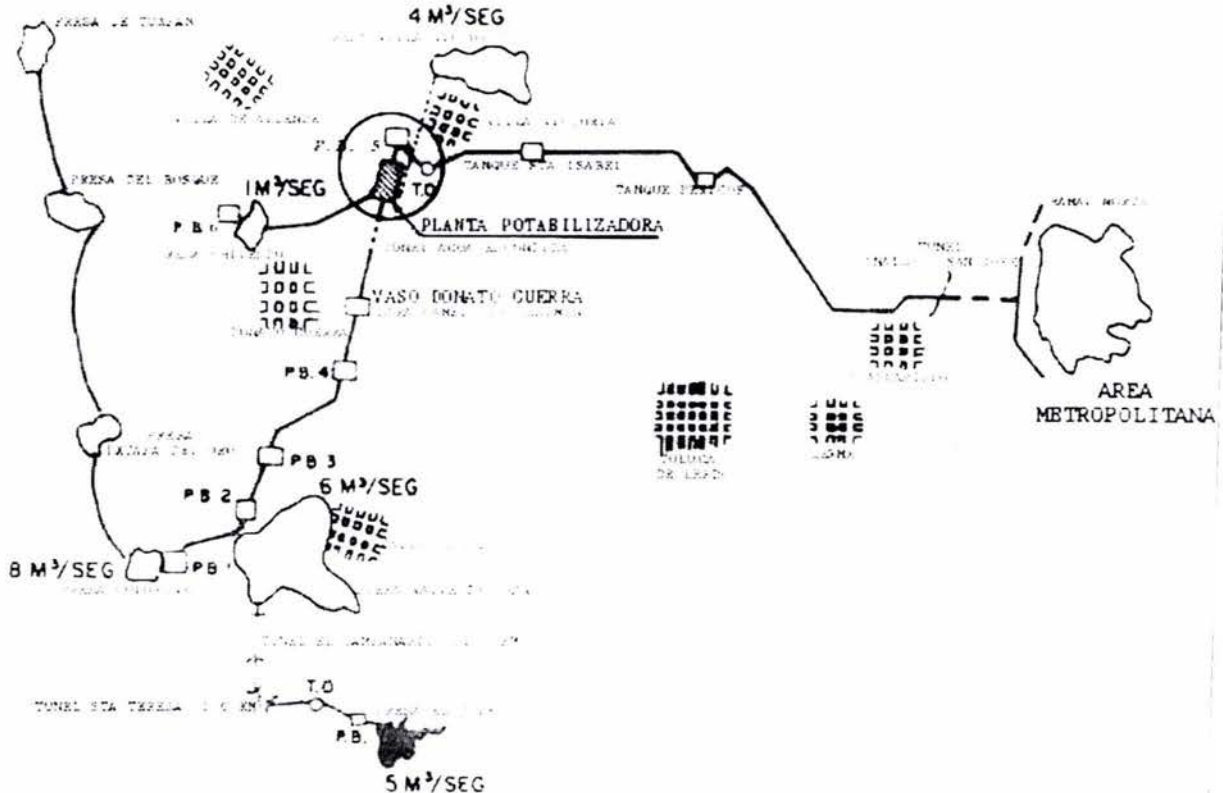


Fig 1.2 Sistema Cutzamala

Las anteriores son presas de almacenamiento y derivación, así también se cuenta con un vaso regulador y un acueducto de 127 km, que incluye 19 km de túneles y 7.5 km de canal; la construcción de un planta potabilizadora con capacidad de 24 m³/s; seis plantas de bombeo para vencer el desnivel, y 24 km de túneles dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México que corresponde a los ramales Norte y Sur de 12.5 y 11.5 km, respectivamente para la distribución del agua al EDOMEX y DF (Fig 1.2). En resumen en el SC el agua tiene que conducirse 127 km y vencer un desnivel de 1,200 metros para llegar a la ciudad.(Fig 1.3)

* Un breve detalle de los elementos, se encuentran en el Anexo A

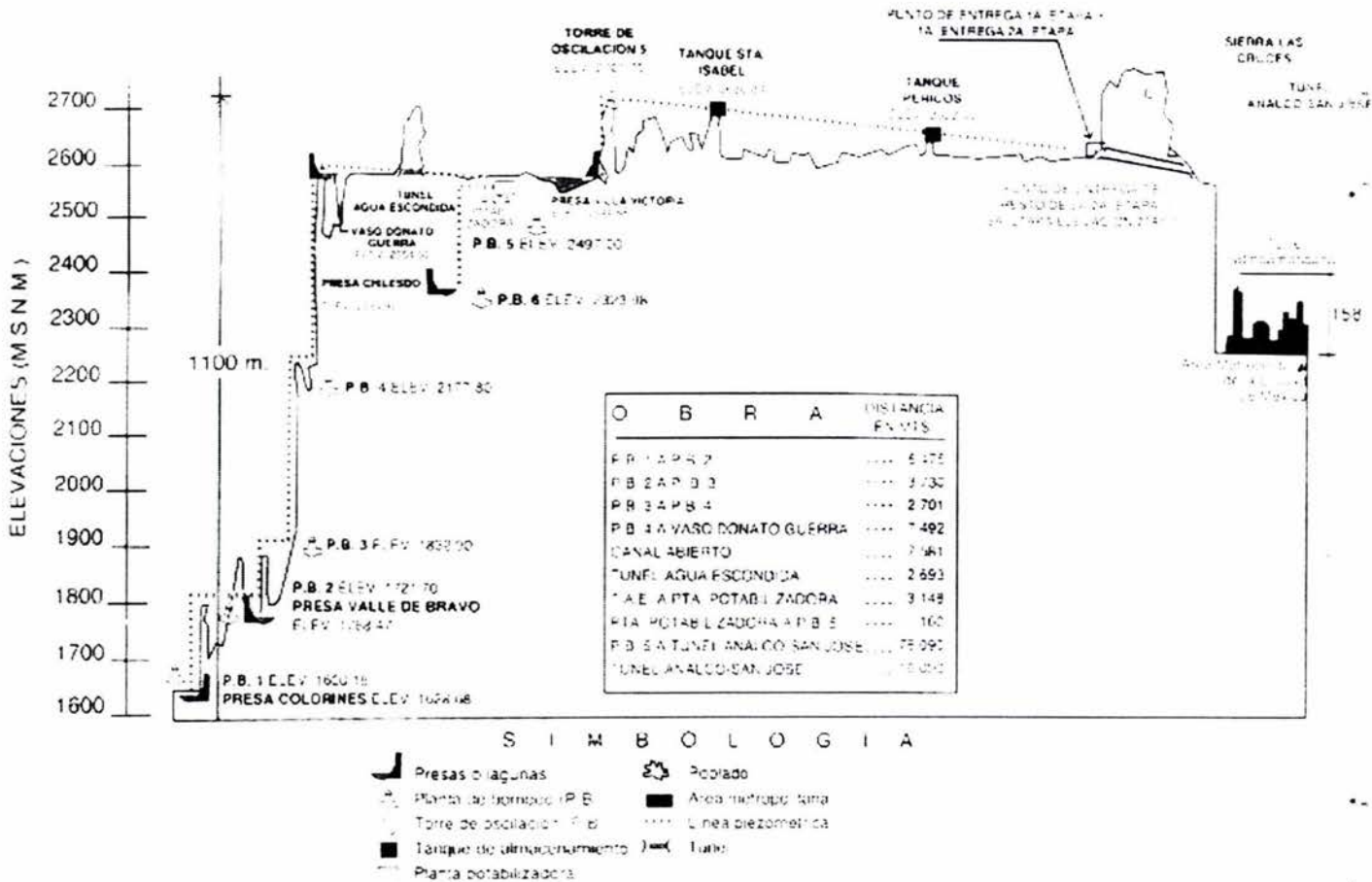


Fig. 1.3 Perfil del Sistema Cutzamala

1.1.1 PRESAS QUE INTEGRAN AL SC

Para construir una presa, es necesario contar con un área de captación o cuenca. Una vez seleccionado el sitio, lo que se hace es cambiar el régimen natural del escurrimiento por uno artificial, dependiendo de los fines a los que se destine.

Una presa es un conjunto de estructuras que se ubican sobre un río, de tal manera que permita el almacenamiento de agua para su aprovechamiento. Las funciones de una presa son: almacenar agua (presa de almacenamiento), levantar el nivel de la misma para su aprovechamiento (presa de derivación) o una combinación de ambas.

La operación de una presa, puede explicarse como sigue: la cantidad almacenada y la extracción de agua de una presa, están asociadas con periodos en el tiempo que tienen un ordenamiento natural, al mismo tiempo que se tiene un beneficio o un costo en cada periodo.

En el SC se tienen 7 presas que, todas en su conjunto forman esa gran obra de aprovechamiento hidráulico que abastece a la Cd de México y a su zona conurbada. (Tabla 1)

TABLA 1

PRESAS QUE INTEGRAN AL SISTEMA CUTZAMALA

CONCEPTO	VILLA VICTORIA	VALLE DE BRAVO	COLORINES	TUXPAN	EL BOSQUE	IXTAPAN DEL ORO	CHILESDO
Ubicación							
Municipio	Villa Victoria	Valle de Bravo	Valle de Bravo	Tuxpan	Zitacuaro	Ixtapan del Oro	Villa de Allende México
Estado	México	México	México	Michoacán	Michoacán	México	
Elev. Corona (m.s.n.m.)	2 562.04	1 788.11	1 630.31	1 764	1 745		2 359.20
Elev. Name (m.s.n.m.)	2 560.37	1 785.61	1 629.21	1 762	1 743	1 635.00	2 359.05
Capacidad útil (mill.m ³)	214.30	403.00	1.60	20	201	0.50	0.80
Año de terminación	1944	1944	1944	1957	1954	1954	1992

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA), SEMARNAP, 1997

Ciertos tramos del SC quedan enclavados en un terreno abrupto, lo que caracteriza que en él se encuentren elementos necesarios para la conducción, ya sea superficiales (canales) y subterráneas (a presión, tubería), que están en función de las condiciones de cada tramo del terreno.

Al utilizar la infraestructura de lo que era el Sistema Hidroeléctrico Miguel Alemán, se aprovechan 73.5 km de canales, túneles y sifones en la conducción de la presa Tuxpan a la presa Colorines, así como 13 km del canal Héctor Martínez de Meza, que conduce el agua de la presa Villa Victoria a la planta potabilizadora "Los Berros" (Tabla 2). De este punto se conduce hasta la planta de Bombeo #5, donde se eleva a través de un acueducto de tubería de concreto preesforzado de 2.50 m de diámetro en una longitud de 77 km, atravesando la Sierra de la Atarasquillo – Dos Ríos, ella también conduce las aguas del Sistema Alto Lerma, iniciándose en Dos Ríos la distribución del agua.

TABLA 2

LONGITUDES DE CONDUCCIÓN EN LAS ESTRUCTURAS PRINCIPALES

ORIGINAL SISTEMA HIDROELÉCTRICO MIGUEL ALEMAN		Longitud (m)
Obra de Toma de la Presa Tuxpan	a Presa el bosque	22 000.00
Obra de Toma de la Presa El Bosque	a Presa Ixtapan del Oro	39 500.00
Presas Ixtapan del Oro	a Presa Colorines	12 000.00
TOTAL		73 500.00
ADICIONAL SISTEMA CUTZAMALA		
Obra de Toma Presa Colorines	a Torre de Sumergencia 2	8 381.66
Planta de Bombeo 2	a Torre de Sumergencia 3	3 947.98
Planta de Bombeo 3	a Torre de Sumergencia 4	2 891.37
Planta de Bombeo 4	a Vaso Regulador "Donato Guerra"	5 775.00
Canal "Donato Guerra"		7 586.52
Túnel "Agua Escondida"		3 000.00
Portal de Salida Túnel "Agua Escondida"	a Planta Potabilizadora "Los Berros"	3 131.96
Planta Potabilizadora "Los Berros"	a Portal de entrada Túnel "Analco - San José"	76 095.00
Túnel Analco - San José		16 052.00
Obra de Toma de la Presa Chilesdo	a Conexión al Acueducto Principal del Sistema	12 031.52
Obra de Toma de la Presa Villa Victoria	a Planta Potabilizadora "Los Berros"	12 951.24
TOTAL		151 845.38

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA); SEMARNAP, 1997

1.2. PLANTA POTABILIZADORA "LOS BERROS" (PPB)

La PPB pertenece al Municipio de Villa de Allende, sobre el kilómetro 2 de la carretera Monumento-Valle de bravo, a una altura de 2505.00 m s n.m. aproximadamente.

El proyecto integral de esta planta contempla un tanque de recepción de aguas crudas, 6 canales Parshall, 6 módulos de potabilización, un tanque de recepción de aguas claras, un edificio de dosificación de sulfato de aluminio, una planta de cloración, un sistema de tratamiento de lodos y un laboratorio para análisis físico-químicos y bacteriológicos, logrando con este conjunto una capacidad para procesar hasta 24 m³/s.

El agua proveniente de la presa Villa Victoria llega a través del canal Martínez de Meza, pasa a una caja de control, por una caja de transición y llega al Tanque de Recepción de Aguas Crudas, donde convergen también las aguas producto de las Presas Valle de Bravo y Chilesdo. La estructura del tanque es de concreto, formado por dos cámaras, donde se mezclan las aguas crudas, homogeneizándose con ello su calidad (Fig 1.4)

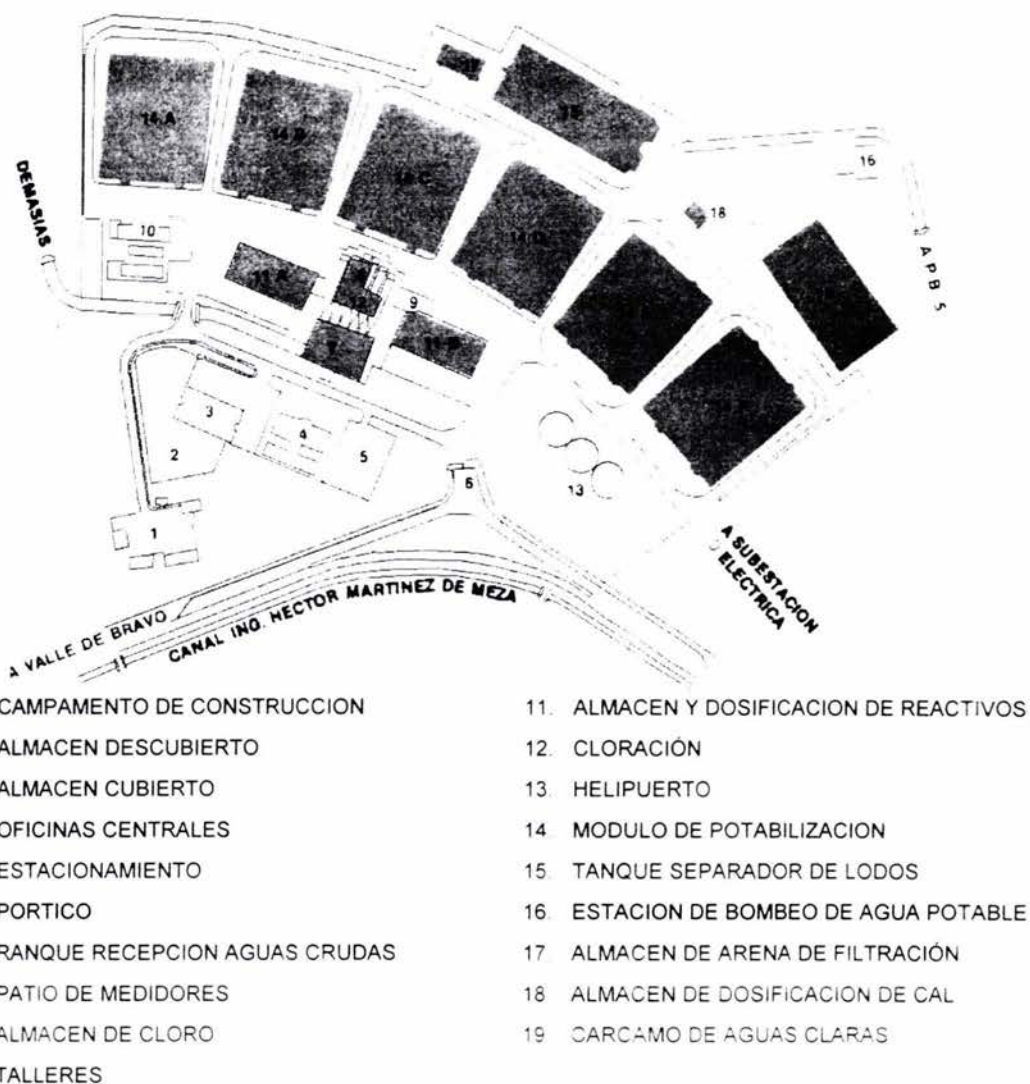


Fig 1.4 Planta Potabilizadora "Los Berros"

Las aguas crudas se conducen a través de los Canales Parshall, en donde se mide el caudal y se inicia el proceso de potabilización al adicionar sulfato de aluminio coagulante y cloro para controlar el desarrollo de algas en las siguientes etapas. El agua se conduce a través de tubería de 2.5 metros de diámetro hasta los 6 módulos de potabilización, cada uno con una capacidad de 4m³/s, lo que da un total de 24 m³/s para toda la planta.

Esta planta es suministrada de agua por los caudales receptados del túnel de Agua Escondida y de la presa de Villa Victoria. La entrada del agua se hace por medio de una tubería de concreto, la cual descarga en el tanque receptor de aguas crudas de la planta Potabilizadora.

Para su tratamiento, la planta potabilizadora se alimenta de la subestación eléctrica de la Planta de bombeo # 5 (PB 5); su sistema de distribución es subterráneo, de 13.8 Kv, con transformadores de 13.8 Kv –220/127 V, localizados en lugares estratégicos para alimentar los diversos puntos que requieren de energía eléctrica; la carga total de la planta potabilizadora es de 3 Mw.

1.3 PLANTAS DE BOMBEO

El sistema cuenta con 6 plantas de bombeo que alojan en su interior conjuntos motor-bomba, válvulas de mariposa en la succión, válvulas esféricas en la descarga, juntas de compensación, conexiones, piezas especiales, tableros de control, compensadores estáticos (en las plantas de bombeo # 3,4 y 5), grúas viajeras, subestaciones eléctricas en el exterior y múltiples de succión y descarga.

Las seis plantas en su conjunto están integradas por 35 bombas, teniendo 29 de ellas una capacidad unitaria de 4 m³/s y 6 de 1.7 m³/s (*Tabla 3*). Todas estas bombas son centrífugas horizontales de doble succión, de dos pasos en las plantas de bombeo 2 y 3 y de un paso en las plantas de bombeo 1,4,5 y 6, y están accionadas con motores eléctricos de inducción de 13.8 y 4.16 kv (*Fig 1.5*).

TABLA 3

CARACTERISTICAS DE LAS PLANTAS DE BOMBEO

PLANTA #	ELEV. EJE DE DESCARGA (m. s. n. m.)	GASTO POR BOMBA (m ³ /s)	NUM. DE BOMBAS	VELOCIDAD (r. p. m.)	GASTO POR PLANTA (m ³ /s)	CARGA (m)	POTENCIA UNITARIA		POTENCIA PLANTA	
							(KW)	(Hp)	(KW)	(Hp)
1	1 571.30	4.0	5	1220	20.0	157.30	7 960	10 670	39 800	53 350
2	1 723.00	4.0	6	1200	24.0	121.80	5 550	7 440	33 300	44 640
3	1 833.95	4.0	6	1200	24.0	349.30	16 500	22 118	99 000	132 708
4	2 177.75	4.0	6	1200	24.0	349.30	16 500	22 118	99 000	132 708
5	2 497.00	4.0	6	1200	24.0	174.20	7 960	10 670	47 760	64 020
5A	2 497.00	1.7	3	1800	5.1	174.20*	3 170	4 249	9 510	12 747
6	2 323.13	1.7	3	1800	5.1	275.00*	4 200	5 630	12 600	16 890
TOTAL			35			1 151.90			340 970	457 063

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA); SEMARNAP, 1997

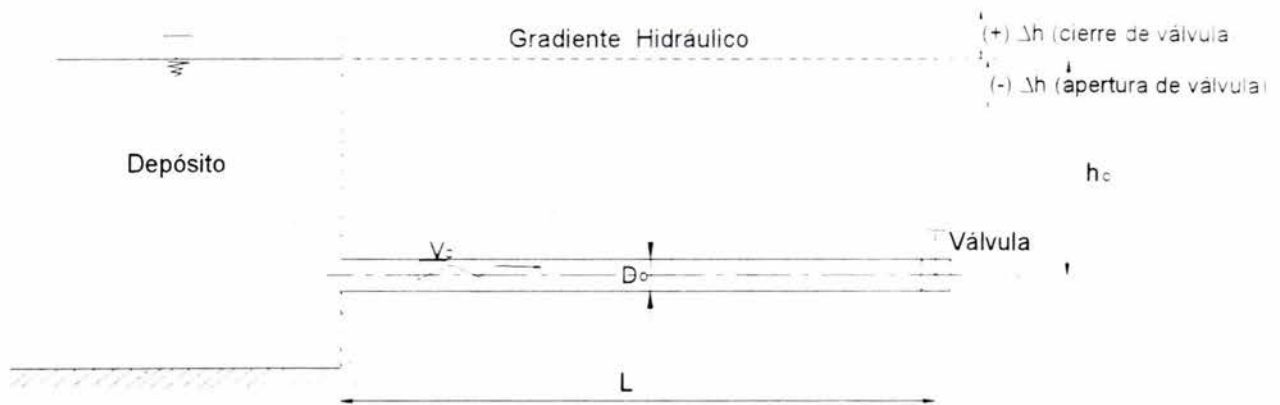
En cada un de las plantas de bombeo se construyo una subestación eléctrica reductora de 115 Kv a 13.8 Kv Tipo Intemperie, para obtener el voltaje de operación de los motores de las bombas; las subestaciones son básicamente con esquema de interruptor y medio.

Cada planta de bombeo cuenta con una torre de sumergencia y otra de oscilación, que son estructuras cilíndricas de concreto reforzado.

1.3.1. FENÓMENOS TRANSITORIOS QUE SE PRESENTAN EN LAS PLANTAS DE BOMBEO

En el diseño de grandes acueductos, como el del Sistema Cutzamala, es fundamental definir el tipo y las dimensiones de los elementos de protección del sistema ante la presencia de fenómenos transitorios y verificar su adecuado funcionamiento hidráulico bajo diversas condiciones de operación. A continuación se presenta un resumen de lo mencionado.

Un fenómeno transitorio se presenta en un acueducto cuando el funcionamiento normal en condiciones de equilibrio permanente sufre alguna perturbación.



Representación en condiciones iniciales en régimen permanente ($Q = cte \neq 0$)

$h_o \rightarrow$ Carga (m)

$V_o \rightarrow$ Velocidad del flujo (m/s)

$D_o \rightarrow$ Diámetro de la tubería (m)

Fig 1.6 Fenómeno Transitorio: Golpe de Ariete

Los transitorios que posiblemente se presentan en el Sistema Cutzamala se deben al cierre o apertura de válvulas, paros, arranques y fallas de los equipos de bombeo (Fig 1.6). Otras

menos frecuentes, pero que también son de importancia y que pueden presentarse son: ruptura de una tubería, variaciones súbitas en los niveles de descarga, succión en las plantas de bombeo o un mal funcionamiento en las válvulas de admisión y expulsión de aire.

Las condiciones transitorias que se pueden analizar y estudiar en cada una de las plantas de bombeo, son:

- ❖ Falla total de los equipos.
- ❖ Falla parcial de los equipos
- ❖ Desconexión (controlada) de las plantas de bombeo adyacentes a la que falló
- ❖ Arranque de todos los equipos

Lo más desfavorable que podría ocurrir en una de las plantas de bombeo sería que todos los equipos fallarían al mismo tiempo, situación que podría ocurrir por una suspensión en el suministro de energía eléctrica. A partir del instante de la falla, la columna de agua bombeada tiende a frenarse y a escurrir en sentido contrario: simultáneamente, la válvula esférica empieza a cerrarse mediante un mecanismo accionado por baterías de emergencia destinadas para estos casos.

El golpe de ariete se presenta debido a un cambio en la presión, por arriba o por debajo de la presión normal, ocasionado por la variación del gasto en un tubo (*Fig 1.7*). En el SC, una primera fase del golpe de ariete generada en la tubería de descarga cercana a las bombas conlleva a una disminución de presión que se propaga hasta la torre de oscilación: ahí, se refleja y provoca un regreso de la onda hacia las bombas, la que a su vez origina la fase inversa del fenómeno, o sea, el incremento de la presión. En consecuencia, el fenómeno de oscilación de masa se presentará aguas abajo de la torre de oscilación y hasta la torre de sumergencia de la siguientes planta de bombeo, provocando la variación de los niveles de ambas torres.

Cuando falla una sola parte de los equipos de una planta de bombeo, los efectos del golpe de ariete en el acueducto son menos severos que ante una falla total, aun cuando el comportamiento es semejante al que ocurre durante ésta. La ventaja que se tiene en este tipo de fenómeno es que el caudal impulsado por las bombas que permanecieron operando se regresará en la bomba que falló.

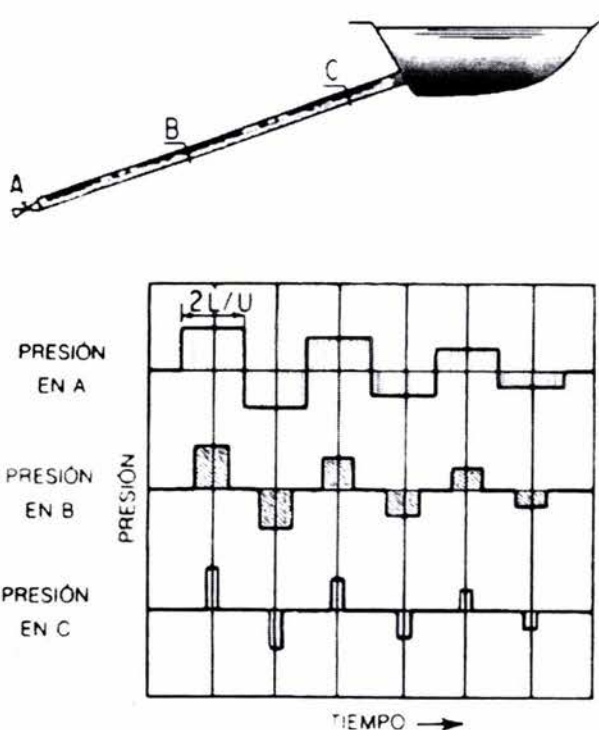


Fig 1.7 Representación. Variaciones producidas por el golpe de ariete a lo largo de una tubería

Las plantas de bombeo 2,3 y 4 del SC operan en cascada, así es que cuando una de ellas falla es necesario desconectar las otras dos. para evitar que se produzcan derrames en algunas de las torres. Las dimensiones de éstas se definieron suponiendo que, mediante un sistema de control automático, se ordenara la desconexión de las plantas 23 segundos después de que hubiera fallado alguna de ellas.

El arranque de todos los equipos de una planta de bombeo debe ser en consecuencia simultánea, con objeto de reducir al mínimo los efectos de los fenómenos transitorios tanto hidráulicos como eléctricos.

A continuación se describirán algunos conceptos básicos para explicar el fenómeno de golpe de ariete(en conductos a presión). *

- ⊛ *Transitorio hidráulico.* Es el fenómeno que se presenta cuando hay fluctuaciones en la presión causadas por algún cambio en las condiciones del flujo(cierra o apertura brusca de válvulas; en el caso del SC, paro de bombas)
- ⊛ *Celeridad(a):* Velocidad con que se propaga la onda de presión a lo largo de la tubería

- ⊗ *Periodo(T)*: Tiempo en segundos que tarda la onda de presión en ir de la válvula del vaso y reflejarse hasta llegar nuevamente a la válvula

$$T = \frac{2L}{a}$$

- ⊗ *Tiempo de maniobra(τ)*: Tiempo en segundos que dura un cierre o una apertura de la válvula(en caso de que por este motivo se presente el fenómeno transitorio). Cuando:

$\tau < T$ – Maniobra instantánea o brusca

$\tau > T$ – Maniobra lenta o gradual

- ⊗ *Línea de cargas piezométricas.(Fig. 1.8)*: Es la línea que une todos los puntos que marcan, en cada sección, la suma de las cargas debida a la posición z , en metros y la carga de la presión P_i/γ en metros de columna de agua, es decir:

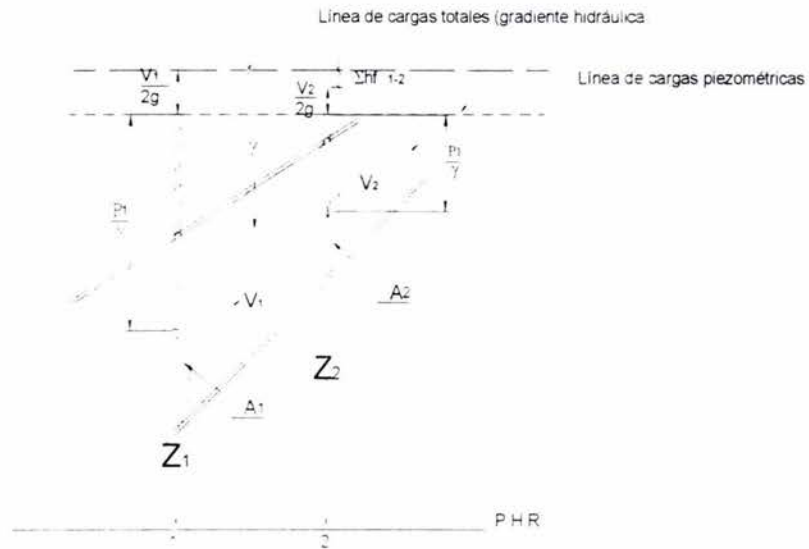


Figura 1.8 Representación de cargas

$$h = z_i + \frac{P_i}{\gamma}$$

donde

P presión, en N/m^2

γ peso específico, en kg/m^2s^2

cada vez que cambie el gasto, ya sea que aumente o disminuya(debido en parte por abrir o cerrar válvulas, o un paro intempestivo de las bombas), se producirá un cambio de presión lo

* Una descripción detallada de sus fases se ilustra en el **Anexo B**

que ocasionara que se presente el fenómeno del golpe de ariete, con la salvedad de que en tuberías de diámetro pequeño y con flujo a baja velocidad no habrá esfuerzos críticos.

Este fenómeno transitorio, solo se presenta en tuberías ya que en canales abiertos, la superficie del líquido está abierta a la atmósfera, por lo que, no hay presencia de dicho fenómeno. El flujo en un tubo es a superficie libre sí el tubo está parcialmente lleno.

1.3.2 Torres de oscilación y tanque de sumergencia

Para un acueducto, existen diversos elementos de protección para suavizar o atenuar los efectos de los transitorios antes descritos, entre ellos se pueden citar: torres de oscilación, tanques unidireccionales, cámaras de aire, válvulas de alivio y tuberías telescópicas.

La función de las torres de oscilación y/o de sumergencia es minimizar el fenómeno del golpe de ariete, que se produce tras el paro de los equipos de bombeo, provocando en las tuberías variaciones de la presión hidráulica, que de no ser controladas producirían rupturas o deformaciones en éstas.

Una torre de oscilación es una estructura abierta, que se conecta al acueducto mediante una tubería que no tiene control, es decir, el agua entra o sale libremente del tanque, el cual por lo general tiene una forma de torre: área transversal reducida y altura considerable en relación con ésta. (Fig. 1.9)

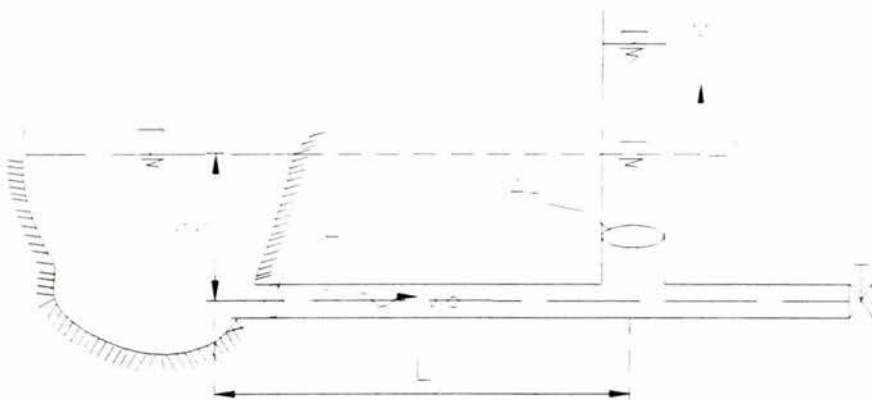


Fig. 1.9 Elementos de una Torre de Oscilación

Sí se desprecia la fricción, se puede demostrar que el nivel del agua en la torre en cualquier instante (t), esta dado por

$$x = M \text{sen}(\omega * t)$$

donde

$M \rightarrow$ amplitud máxima de oscilación (m)

$$M = \frac{Q}{A_T(\omega)}$$

$\omega \rightarrow$ frecuencia de la oscilación (rad/s) [número de oscilaciones máximas o mínimas registradas en un segundo]

$$\omega = \frac{g A}{L(A_T)}$$

$T \rightarrow$ periodo de la oscilación (s)

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Por lo general, estos tanques de oscilación son cilíndricos y de gran altura: dentro de ellos se producen oscilaciones en masa del agua por efecto de maniobras o paro total de los equipos de bombeo.

En el Sistema Cutzamala se localizó un trazo cuyo perfil fue adecuado para la ubicación de las torres; con ello se consiguió una solución económica que no requirió de dispositivos de funcionamiento mecánico para asegurar su operación correcta (Tabla 4). Sin embargo, la desventaja de las torres de oscilación es que al tener un volumen pequeño de almacenamiento en relación con el gasto manejado, en caso de una falla es necesario que exista una coordinación entre las plantas de bombeo para interrumpir de inmediato su funcionamiento y no producir derrames de las torres en la planta que haya fallado, ya que los gastos que se manejan ayuda a que su llenado se realice en cuestión de segundos.

TABLA 4

TORRES DE OSCILACION EN EL SC

CONCEPTO	PB #1	PB #2	PB #3	PB #4	PB #5	PB #6
Diámetro interior (m)	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	2.50
Espesor de pared (m)	2.25	1.60	1.20	1.20	1.50	
Altura total (m)	62.00	51.00	37.00	37.00	45.80	45.00
Elevación plantilla de la Torre (m.s.n.m)	1,740.00	1,855.00	2,200.00	2,528.00	2,665.00	2,524.00

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA); SEMARNAP, 1997

Las torres de sumergencia proporcionan la carga y la cantidad de agua que necesitan los equipos de bombeo para su arranque. Debe mantener la sumergencia de la tubería en la obra de toma, para evitar la entrada de aire en tuberías de presión

Un caso particular en todo el SC, es el que se encuentra en la planta de bombeo #5, ya que la función de la torre de sumergencia es proporcionada por el tanque de aguas claras de la planta potabilizadora "Los Berros", la cual recibe los caudales captados por el sistema y logra que el agua suministrada a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México sea de alta calidad (Tabla 5). Este elemento también tiene las siguientes funciones:

- a) Permitir que la velocidad del agua en la obra del sea constante
- b) En caso de mantenimiento y/o reparación en la casa de máquinas o un corte de energía no programado, desvía el flujo a través de una obra de excedencia que se encuentra circundante a dicho tanque, la cual debe contar con la capacidad para verter el gasto de entrada a través de unos canales de conducción.

TABLA 5

TORRES DE SUMERGENCIA

CONCEPTO	PB #1	PB #2	PB #3	PB #4	PB #5	PB #6
Diámetro interior (m)	10.00	10.00	10.00	10.00	TANQUE DE AGUAS CLARAS	6.00
Espesor de pared (m)	0.65	1.50	1.50	1.00		0.45
Altura total (m)	20.00	47.00	47.00	32.00		19.00
Elevación plantilla de la Torre (m.s.n.m)	1,620.24	1,751.00	1,862.00	2,206.00		2,349.00

Fuente: Comisión Nacional del Agua (CNA); SEMARNAP, 1997

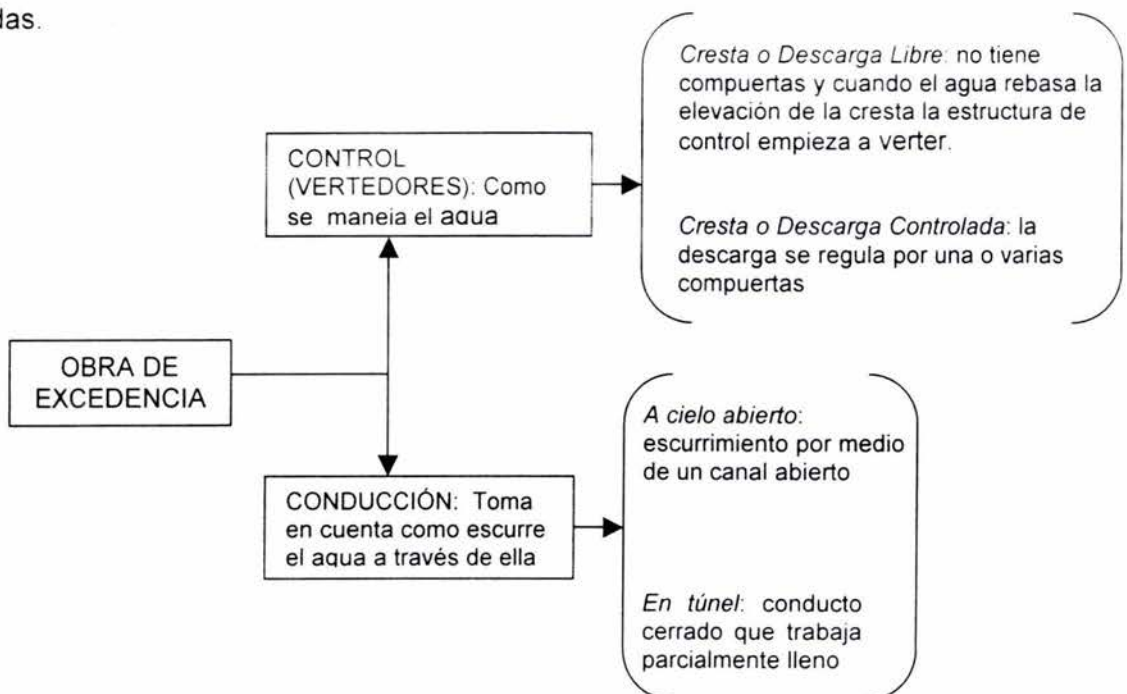
Al considerar la existencia de una variación estacional en la disponibilidad del recurso de agua, hizo posible dimensionar las obras del sistema, sus capacidades de bombeo y de conducción. Para ello fue necesario elaborar un modelo de simulación que considerará el óptimo aprovechamiento de la obra de excedencia en la Planta de Bombeo #5 (PB5) en Valle de Bravo, y a la vez dar flexibilidad a la operación combinada de la infraestructura del sistema.

1.4 OBRAS DE EXCEDENCIAS

La obra de excedencias es un conjunto de estructuras destinadas a desalojar el volumen de agua que no puede ser contenido en el vaso de almacenamiento, los cuales se consideran excedentes de la capacidad útil del vaso. Este tipo de obra constituye un elemento básico e importante en cualquier presa y puede estar alojada, por ejemplo, dentro de una cortina de concreto o bien estar localizada en cualquiera de las dos márgenes del un río y, en algunos casos, parte de ella utiliza una parte de la obra de desvío.

Cualquier excedente desalojado por la obra debe retornar a un río en forma tranquila y la descarga de agua debe estar localizada en un sitio seguro, en donde no se ponga en peligro elementos de la misma obra o a la población.

La capacidad de descarga de la obra de excedencia se obtiene al hacer el tránsito de avenidas.



Los tipos de obras de excedencias, varían según el uso, el tipo de perfil del cimacio* o de la geometría de la estructura de control (Fig 1.10). Una breve clasificación es la siguiente:

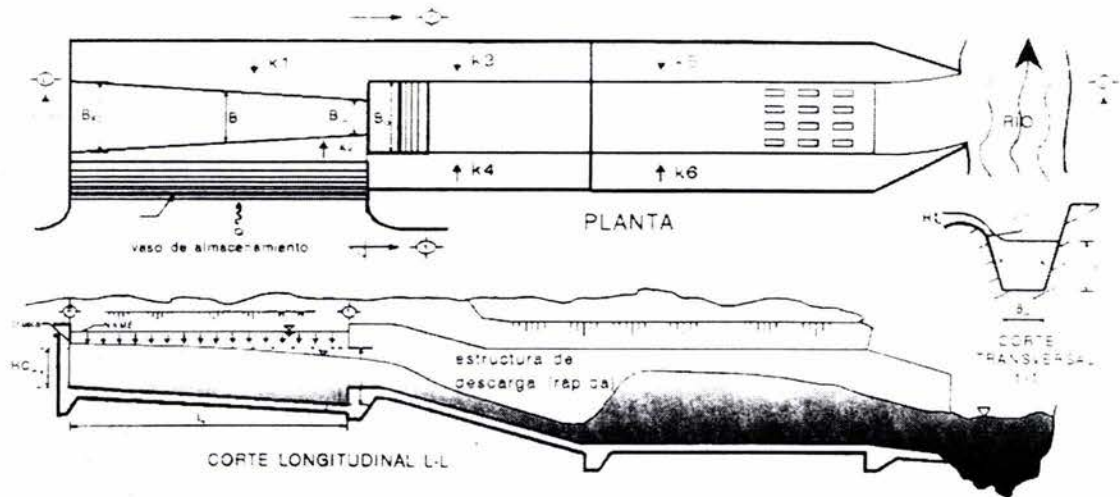


Fig 1.10 *Diseño de tipo de obra de excedencia con vertedor lateral que desaloja en un río*

* En el Anexo C se describen los tipos de vertedores que se utilizan en las obras de excedencias

*La Imaginación consuela al hombre de lo que no puede ser. El humor, de lo que es.
Winston Leonard Spencer Churchill*

Capítulo 2

UBICACIÓN DE LA PLANTA DE BOMBEO #5

La PB5 se localiza después de la Planta Potabilizadora; tiene una capacidad de 24 m³/s, pero en la realidad opera con un gasto hasta de 14m³/s, por razones de seguridad que más adelante se explicarán. Opera las 24 horas del día y bombea el caudal de agua potabilizada hacia la ciudad de México.

2.1 INFRAESTRUCTURA EXISTENTE Y DESCRIPCIÓN

Después de la PB4 se encuentra la Planta Potabilizadora a la cual llegan aguas provenientes de Villa Victoria y de la presa Chilesdo, que se envían mediante la PB6. Dicha planta opera durante las 24 horas del día, por lo que es necesario regularizar el caudal procedente de la PB4, que es bombeado sólo 20 horas, para lo que se utiliza el tanque Donato Guerra que envía el agua a la planta potabilizadora en un régimen uniforme de 24 horas. (Fig. 2.1)

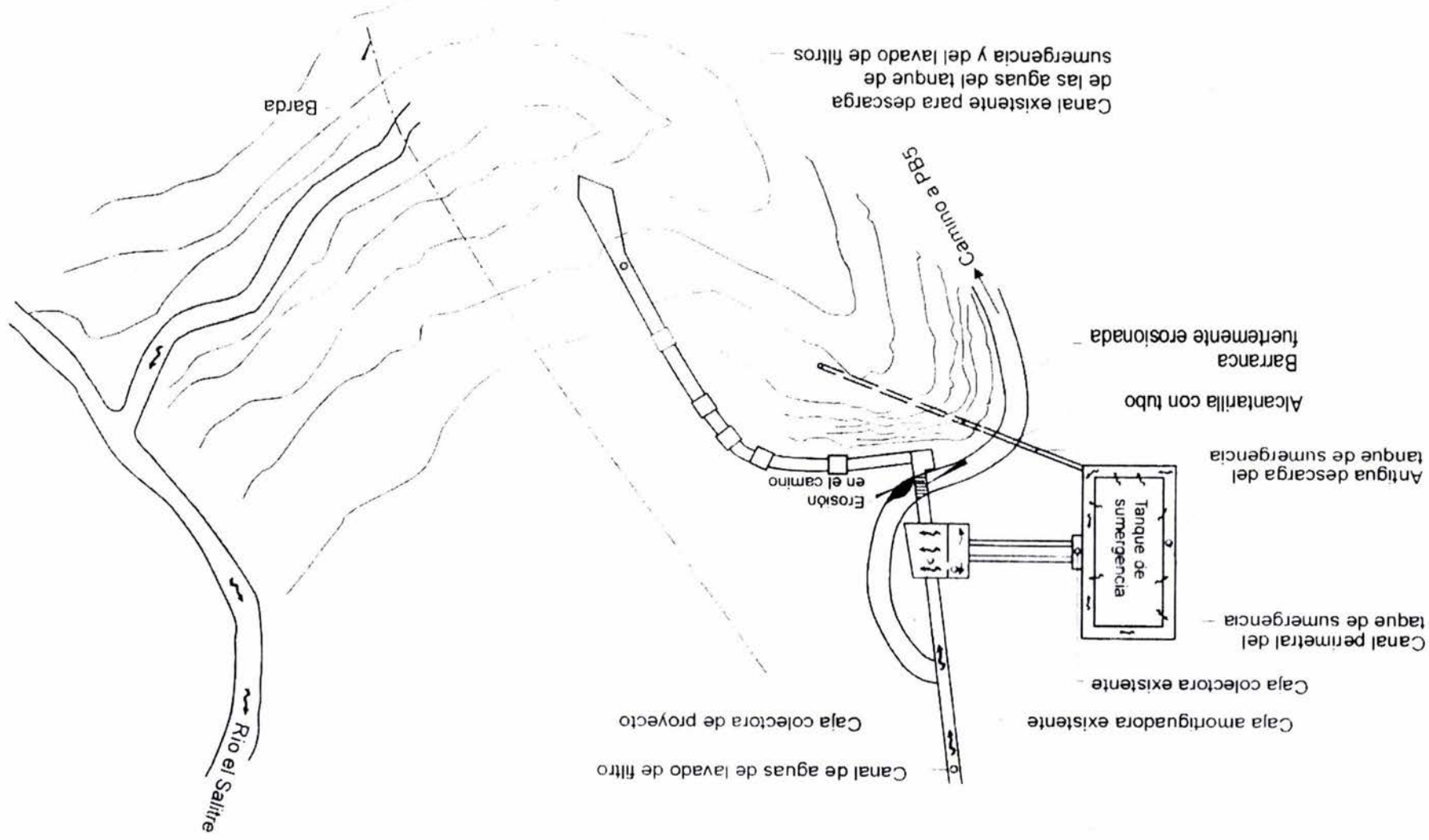


Figura 2.1 Vista General de las estructuras existentes

La estructura y la cimentación de la PB #5 es de concreto reforzado. cabe hacer mención que es la única planta en todo el sistema con dicho tipo de estructura. ya que las demás son de estructura metálica. con muros y techos prefabricados.

Para tener una mejor idea de los elementos que integran la PB #5. estos se considerarán a partir del tanque de aguas claras de la planta potabilizadora, que funciona como tanque de sumergencias a la planta, hasta la salida del tanque de oscilación de la PB #5. (Fig. 2.2)

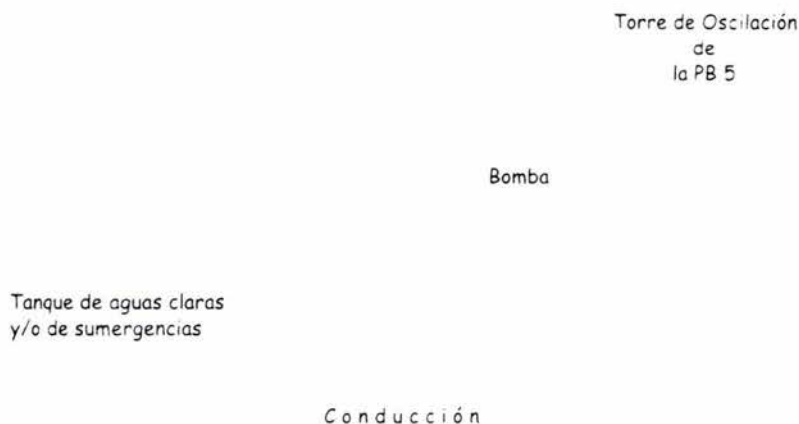


Fig. 2.2 Perfil de la PB #5

El tanque de aguas claras o tanque de sumergencias es una estructura de concreto reforzado y contiene en su interior un elemento disipador de energía, este tanque se subdivide en dos cámaras con capacidad de 48 000m³ cada una. (Fig. 2.3)

La PB #5 alberga 6 conjuntos motor-bomba-válvula esférica de 4 000 litros por segundo cada uno. También se cuenta con una PB #5A que contiene 3 equipos con capacidad unitaria de 1 700 litros por segundo, para vencer una carga de 174 m hasta la Torre de Oscilación #5, así como la subestación eléctrica que reduce la tensión de 115 000 volts a 13 800 volts, con la que funcionan los equipos mencionados.

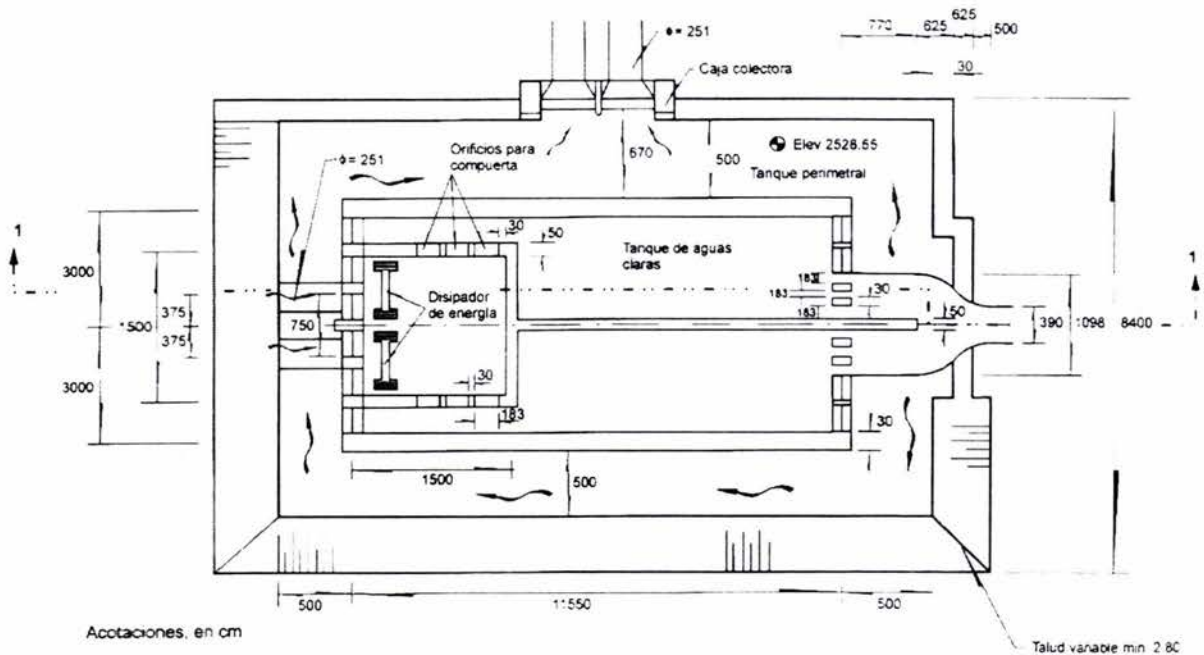


Fig 2.3 Vista del tanque de aguas claras de la PB5

La torre de oscilación es de 10 m de diámetro interior y 45 m de altura, y se encuentra ubicada en el punto más alto de la conducción, a 2 700 m s.n.m., a partir del cual el agua se conduce por gravedad hasta a través de dos tuberías de concreto preesforzado que terminan en el portal de entrada del túnel Analco-San José; el agua fluye por el túnel hasta la lumbrera No. 3. Aquí se inicia la distribución hacia el Área Metropolitana de la Ciudad de México.

2.1.1 Sistema de Seguridad: Obra de excedencias y elementos que la integran

La PB # 5 cuenta, con elementos de protección y una obra de excedencias para evitar en lo mínimo algún daño al sistema por la presencia de fenómenos transitorios que sean provocados por paros no programados del equipo de bombeo.

Así tenemos que el tanque de sumergencia cuenta con una obra de excedencias, que entra en funcionamiento cada vez que hay un corte de energía para la limpieza del tanque de aguas claras, por un paro no programado de bombas o cuando se presenta una situación de emergencia en la planta de bombeo y potabilización (cambios, reparación y mantenimiento).

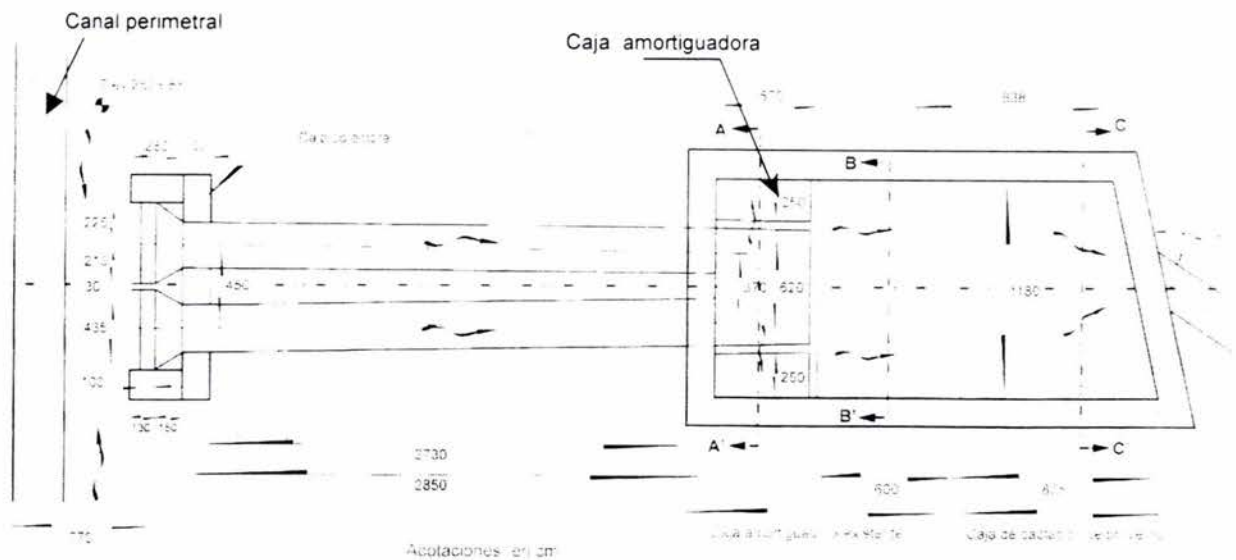


Fig 2.4 Detalle de la Obra de excedencia de la PB5

Antiguamente la conducción final de la obra de excedencias se descargaba en una barranca lo cual provocaba arrastre de material. Ya que su descarga se producía desde una parte muy alta: después de un tiempo, por las condiciones del terreno y la ubicación de la obra de excedencias; se ocasionó la destrucción de algunos gaviones lo cual originó una socavación en la parte baja. (Fig. 2.1)

Posteriormente se construyó una conducción que consiste en un canal de sección variable (actualmente dicho sistema está en funcionamiento) que se construyó reemplazando así, la descarga en la barranca. (Comparación entre Fig. 2.5 y 2.1)

A lo largo de este canal se construyeron 6 cajas disipadoras que permitían que el canal se ajustará a la topografía tan accidentada del terreno. Las descargas a este canal provienen, tanto de la obra de excedencias como del lavado de filtro, lo cual genera que la capacidad de dicha conducción sea limitada, se presenten derrames y gradualmente se vaya a presentar una socavación severa en la zona.

Dicho lo anterior, actualmente la obra de excedencias está formado por un canal perimetral al tanque de sumergencia, una caja colectora, dos tubos de conducción de 2.50 m de diámetro, una caja amortiguadora (Fig. 2.4) y un canal de sección variable con 6 cajas amortiguadoras.

2.2 PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN POR UN CORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PLANTA DE BOMBEO #5

En acueductos con una longitud 1 000 veces mayor que su diámetro y cuyo tanque de entrega se encuentra en una cota de elevación mayor al del tanque se toma o de succión (acueducto ascendente) es común que se presenten fenómenos transitorios provocados por el corte de bombeo. Así, todo sistema de gran magnitud, como lo es el Sistema Cutzamala, debe contar con elementos de seguridad. En este caso el sistema cuenta con obras de excedencias, y en el caso particular de la PB5, ésta funciona cada vez que hay un corte en el suministro de energía eléctrica y cuando se le da mantenimiento de limpieza al tanque de sumergencia.

El corte de energía, por cualquiera de sus circunstancias, provoca u origina fenómenos transitorios en el sistema, más la presentación de esta trabajo no esta encaminado a estudiarlos minuciosamente.

Los problemas que surgen en conducciones de agua a presión debido a los fenómenos transitorios, son de tres tipos: sobrepresión, depresión y sobrevelocidad en las maquinas.

A sobrepresión se le denomina a toda presión superior a la de trabajo en cualquier punto de una conducción a presión. La sobrepresión ocasiona incremento de tensiones en le material de la tubería lo cual produce deformaciones plásticas o rupturas en la instalación.

Se le considera depresión a toda presión absoluta menor que la atmosférica. Cuando se trata de fenómenos transitorios creados por el paro accidental de un planta de bombeo, los problemas de depresión son los más frecuentes.

La sobrevelocidad de las maquinas se refiere a cuando hay un corte de energía eléctrica, las bombas hidráulicas quedan condicionadas a la acción combinada del flujo y de la inercia de las masas de rotación. De esta acción se deriva un a inversión de la velocidad en la maquina, que comienza a girar al revés al cabo de pocos segundos. Si este fenómeno persiste mucho tiempo, las piezas sufrirán un mayor desgaste que el normal.

El fenómeno más frecuente es el conocido como golpe de ariete.

El propósito de los dispositivos de control es evitar el daño estructural que puede producir el golpe de ariete generado por el paro accidental(o también debido al mantenimiento de limpieza) de la planta de bombeo, sobre las tuberías o las máquinas, sobretodo cuando una bomba alimenta a una tubería larga.

La función de la torre de oscilación es la de atenuar dichos fenómenos y así evitar daños considerables en la estructura de los elementos que forman parte del Sistema. Sin embargo, el corte de energía eléctrica acarrea en sí un malestar para el funcionamiento de la obra de excedencia de la PB5, y este se origina desde que el agua se regresa a las cámaras con tal velocidad que se teme se llegue a fracturar el techo o losa de dicho tanque. Las cámaras se manejan de manera independiente, por lo cual se cierran las compuertas de cada una de ellas éstas se cierran por medio de unas compuertas, entonces las cámaras empiezan a verter el líquido hacia el cámara perimetral para que este lo desaloje a través de la cámara de captación y conducirla por medio de 2 tuberías hacia un tanque de amortiguamiento y de ahí a su descarga final.*

Al descargarse de las cámaras, el líquido produce remanso en algunos sitios del cana perimetral, con el peligro de que se presente un derrame sobre el muro del canal y causar daños mayores en los alrededores. Esta es la razón de por que se manejan actualmente 14 m³/s en la planta potabilizadora, ya que un incremento en caudal representaría una situación crítica al momento de que se origine un corte de energía.

2.2.1 Alternativas para la mejor eficiencia de la obra de excedencias

La Planta Potabilizadora esta diseñada para manejar un gasto de 24 m³/s, por lo que se considera poco económico e ineficiente su funcionamiento, el que trabajará solo con 14 m³/s. Razón por la cual la Comisión Nacional del Agua (CNA) busco y analizo nuevas alternativas para que, en particular la obra de excedencias de la PB #5 trabajará con eficiencia y a su máxima capacidad.

En un principio, CNA contrato a una empresa consultora para que revisará el funcionamiento del canal de descarga que trabaja actualmente(el que desemboca al río Salitre). Se concluyó

* Ver catalogo de fotos incluido en este trabajo

que el canal no era capaz de conducir más de 8 m³/s, por lo que su funcionamiento resultó ineficiente y poco viable ya que se produciría una grave socavación.

Propusieron entonces, la construcción anexa e incluida, de una caja de captación en la caja amortiguadora, un tubo de concreto de 2.50 m de diámetro y de 280 m de longitud que desalojara el agua del la caja de captación; otra caja amortiguadora y un canal de 12 m de ancho que desemboca al río el Salitre. La propuesta fue llevada al Consultivo Técnico(CT) de la CNA para su aprobación.

El Instituto de Ingeniería fue el encargado de construir dicho modelo a petición de la Subgerencia de Estudios y Proyectos de la Gerencia de Construcción, la cual forma parte de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México de la CNA. Además de analizar, estudiar y proponer soluciones para que la obra trabaje a su máxima capacidad y con eficiencia.

El Consultivo Técnico(CT) de la CNA recomendó la revisión del funcionamiento hidráulico de toda la conducción; desde el tanque de sumergencia hasta la descarga en el río Salitre. Por ese motivo se empezó con la construcción del modelo a escala de la obra de excedencia, para que en el se pudiera apreciar su funcionamiento, analizar el comportamiento del líquido, proponer soluciones prácticas y realizar los cambios que fueran necesarios para que la obra de trabajará a su máxima capacidad.

La construcción del modelo abarco, desde el tanque de sumergencia(o tanque de aguas claras) hasta el inicio de conducción de la parte que se encontraba en proyecto, es decir, la salida del tanque de amortiguamiento. Esto se hizo con la finalidad de darle una solución rápida a los posibles desbordamientos, ya mencionados, que podrían ocurrir en el canal perimetral.

La parte en proyecto, es decir, desde la conducción en la salida del tanque de amortiguamiento hasta la entrega en el Río Salitre, no será tema principal ni de estudio en este trabajo. Sin embargo se mencionara siempre y cuando sea necesario hacer una referencia de él.

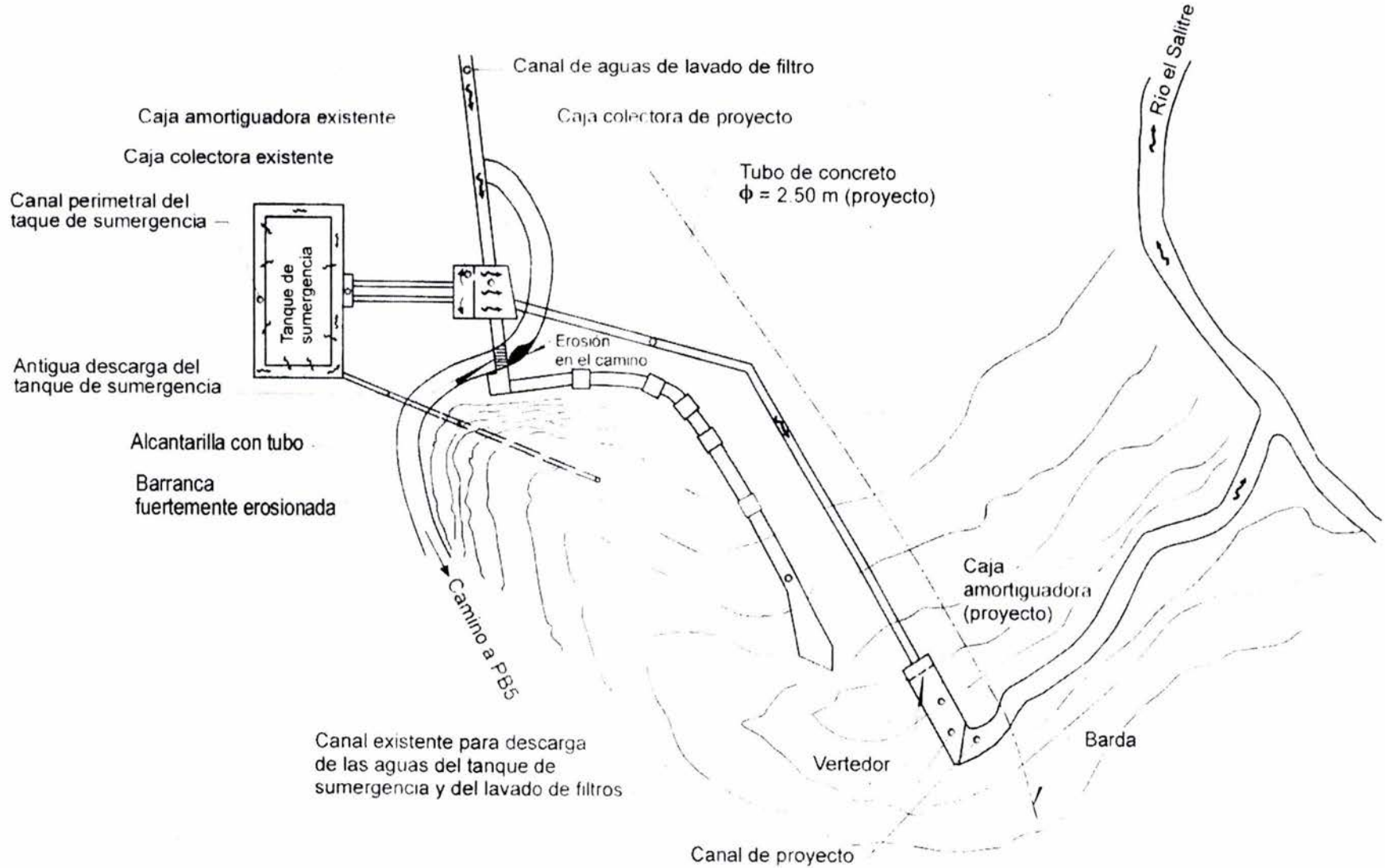


Fig 2.5 Vista General de las estructuras existentes y de proyecto

*Triste época la nuestra! Es más fácil
desintegrar un átomo que un prejuicio.
Albert Einstein*

Capítulo 3

DISEÑO, DESARROLLO Y CONSTRUCCION DEL MODELO EN EL INSTITUTO DE INGENIERÍA

En este capítulo se mencionará la forma en que se fueron dando las propuestas, la manera en que se desarrolló y construyó el modelo: así como los cambios basándose para ello en ecuaciones fundamentales de la Hidráulica, así como la mención de las herramientas, materiales y elementos constructivos.

Para que el patrocinador (CNA) tuviera una visión más amplia sobre el comportamiento y funcionamiento hidráulico de la obra de excedencias, se encomendó al Instituto de Ingeniería desarrollar un modelo que, cumpliera con las especificaciones y normatividad con que estaba construido el prototipo.

Es importante recordar que, para la presentación de éste trabajo solamente se analizó la revisión hidráulica de una parte de la conducción, la cual comprendió desde el perímetro o canal del tanque de aguas claras hasta el desalojo de las excedencias en la caja colectora en proyecto.

La segunda parte del modelo es la conducción desde la caja colectora hasta la desembocadura en el río Salitre, esta parte se encontraba en proyecto en el prototipo por lo que solo fue considerado como un mero simulador del comportamiento del agua pero no como algo determinante para la obra en prototipo, además de que la información y el diseño variaba constantemente

3.1 ELEMENTOS FUNDAMENTALES EN MODELOS

De manera general se pueden mencionar los componentes básicos en los cuales tiene que estar apoyado cualquier tipo de modelo hidráulico para su funcionamiento*:

- Cárcamo de bombeo
- Bombas
- Tanque de carga constante
- Canal de acceso
- Modelo
- Canal de retorno
- Estructura aforadora, la cual puede estar a la entrada o a la salida del modelo

El cárcamo de bombeo es un depósito subterráneo en donde las bombas realizan la función de succionar el agua, ya sea al tanque de carga constante o hasta la obra de acceso del modelo. El volumen que almacena, debe ser apropiado para que no se vacíe cuando entra en operación el modelo.

El tanque de carga constante es un tanque elevado opera en forma tal que, si existen grandes variaciones en el gasto que va de las bombas hacia él o a los modelos, la carga del flujo se mantiene constante.

* Ver catalogo de fotos incluido en este trabajo

En este caso, la obra de acceso para el modelo es por medio de tuberías; ella cumple con la función de tranquilizar el escurrimiento con el fin de proporcionar y asemejar las condiciones que se presentan en el prototipo. Como el tanque de excedencias cuenta con su propia caja de amortiguamiento, ya no fue necesario utilizar otros materiales para tranquilizar el agua y obtener un flujo similar al que se presenta en la entrada del prototipo.

Después de utilizada el agua que pasa por el modelo, es necesario regresar el agua al cárcamo de bombeo. Esta función la cumple perfectamente el canal de retorno, el cual debe cumplir con una pendiente y sección necesaria para que pueda descargar el gasto aun cuando el cárcamo esté en su nivel máximo. En el área que fue asignada para la construcción del modelo ya se contaba con esta estructura.

3.2 PLANTEAMIENTO Y PROCESO DE DESARROLLO DEL MODELO

Un modelo es una representación a escala del prototipo; por ello, como primer paso, fueron solicitados los planos de localización y dimensión del prototipo para poder ubicar, dentro de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica del Instituto, un lugar que permitiera representar con las escalas adecuadas la estructura del modelo y disponer de un abastecimiento adecuado del gasto de diseño para operar el modelo.

Por parte de CNA se solicitó la construcción de un modelo completo, es decir, representar y construir tanto la parte existente del prototipo, como lo que estaba en proyecto (descarga hacia el *Río Salitre*), sin embargo, para este trabajo solo se analizó la parte existente, sobretodo porque al patrocinador le interesaba resolver los problemas que se venían presentando en la obra de excedencia así como la de determinar cuantos tubos serían necesarios colocar a la salida de la caja de captación, ya que con este dato empezarían los estudios de diseño y construcción de la parte en proyecto, que finalizaba con la conducción del flujo a través de canales hasta desembocar en el *Río Salitre*.

El descargar el agua en el río ayudaría a la vez, a los campos de riego que se encuentran a su alrededor, ya que en épocas de estiaje el agua es poca, beneficiando, así también, a los

agricultores y pobladores que se encuentran cerca de la planta de tratamiento, ya que el caudal que fuera conducido por la obra de excedencia no sería desperdiciado.

Es necesario decir que ciertas partes del modelo no se reprodujeron tan fielmente como en el prototipo, esto debido a que eran detalles que requerían un poco más de tiempo y por la rapidez con la cual CNA deseaba conocer el modelo y su funcionamiento. Esto le fue dicho al personal técnico de la Subgerencia de CNA, el cual señaló que no había inconveniente alguno mientras se representarían lo mejor posible los comportamientos, fenómenos, fallas y deficiencias de la estructura; así como la propuesta de soluciones y los cambios necesarios para que el sistema trabaje de manera eficiente.

De aquí en adelante se nombrará Modelo a la primera etapa, en donde se encuentran las estructuras existentes y objetivo principal de éste trabajo.

3.2.a Visitas al lugar donde se encuentra la PB5

Se hicieron varias visitas de campo, con el fin de determinar y ver los detalles que no se consideraban en los planos, específicamente los que se referían al Tanque de Aguas Claras, ya que ellos contaban con pocas referencias. También se pudo apreciar el funcionamiento de las estructuras existentes, los posibles peligros que corrían los demás componentes de la planta y sistema debido al deficiente funcionamiento de la obra de excedencia.

Durante las visitas se plantearon preguntas a los encargados y patrocinadores del proyecto, éstas preguntas abarcaban desde el funcionamiento hidráulico hasta el diseño estructural de los elementos, lo cual ayudó a tener una visión más amplia y segura de lo que se representaría en el modelo, así como asimilar el funcionamiento de una manera más sencilla, sin tener que estar realizando visitas periódicas al el prototipo.

Uno de los problemas, que preocupaba al patrocinador, era el de abordar inmediatamente lo relacionado con el remanso que se producía en el canal perimetral y evitar un posible desbordamiento, así como también disminuir la severa socavación que se venía presentando por descarga del canal existente.

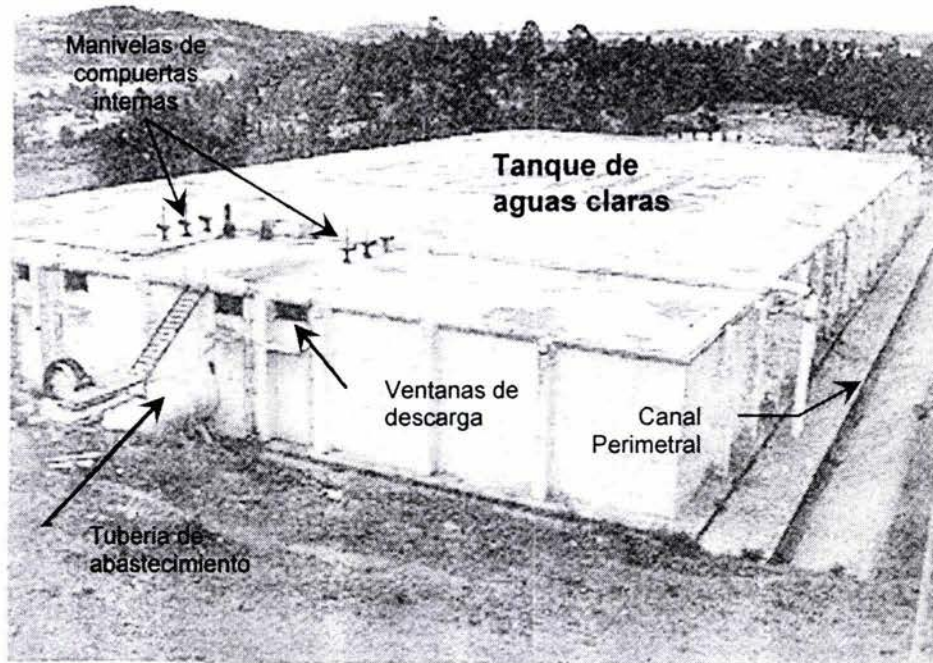


Fig 3.1 Vista del tanque de aguas claras y del canal perimetral

Estas visitas ayudaron para proponer los posibles cambios que se harían a la obra de excedencias para hacerla eficiente, que es lo que buscaba, estas modificaciones se representarían en los modelos que se construirían.

3.2.b Determinación del área de trabajo y pruebas

Como primer paso para la construcción del modelo, se hizo necesario conocer la extensión de superficie que sería ocupada por el modelo en su conjunto, usando como parámetro para seleccionar la escala el diámetro de la tubería utilizada en él. Por conveniencia, los dos modelos estarían juntos para ver con más detenimiento y facilidad los diferentes cambios y fenómenos que en éstos se fueran presentando, ya que los cambios que se le hicieran a uno(existente), influiría en el funcionamiento del otro.

Fue necesario hacer un levantamiento en la zona escogida, para establecer el área que ocuparían cada uno de los cuerpos de los modelos; así como delimitar y establecer las líneas de conducción de las tuberías que conduciría el agua hacia cada uno de ellos. En la parte de topografía fue importante utilizar tarrajas que reprodujeran en forma correcta la geometría del

prototipo; se utilizaron dos tipos de material para la elaboración de las tarrajas, de lámina y madera.

Por petición del patrocinador se realizó la construcción en modelo de la parte del prototipo que se encontraba en esos momentos en la etapa de proyecto, esto con la finalidad de observar su funcionamiento solamente.

Se buscó que el modelo estuviera cercanas o cárcamo de bombeo, bombas, tanque de carga constante y canal de retorno (este último sería utilizado como un elemento para aforar), y con ello solo era necesario construir el canal de acceso y el modelo.



Fig 3.2 *Area del laboratorio del Instituto de Ingeniería proporcionada para construir el modelo*

3.2.c Utilización del número de Froude para diseñar el modelo

Como el funcionamiento del prototipo es a superficie libre con paredes y fondo de concreto el modelo es de fondo fijo, por ello, el parámetro principal para su diseño fue con el número de Froude, que es el de uso más frecuente en el estudio de modelos hidráulicos.

En el diseño, construcción y operación de modelos se deben cumplir tres condiciones de semejanza, que son la *geométrica*, *cinemática* y *dinámica*. La primera implica que toda la relación geométrica entre prototipo y modelos deben tener el mismo valor, al cual se le llama escala; a la segunda se el considera a la velocidad y aceleración; la tercera sirve para tomar en cuenta a la fuerza; por ello en las dos últimas, existirán escalas de velocidad, aceleración y fuerza.

En ocasiones debido al tamaño del modelo, es necesario utilizar dos escalas de líneas, una horizontal y otra vertical y se tendría un modelo que se llamaría distorsionado, pero en el caso en estudio existe una sola escala de longitudes para poder analizar mejor el funcionamiento hidráulico de la estructura.

Si el modelo tiene una sola escala de longitudes que se designara como L_e , el número de Froude (F) se escribe como

$$F = \frac{V}{Yg}$$

donde

V es la velocidad del flujo, en m/s

g es la aceleración de la gravedad en m/s^2

Y el tirante hidráulico en m

Usando éste número, indica que se debe considerar que $F_p = F_m$, los subíndices p y m , indican modelo y prototipo, respectivamente.

$$\frac{V_m^2}{g_m Y_m} = \frac{V_p^2}{g_p Y_p}$$

Aceptando que la aceleración de la gravedad g , es la misma en modelo y prototipo, se tiene que

$$V_p^2 : V_m^2 = Y_p : Y_m$$

Como $Y_p : Y_m$ representan una relación entre longitudes, ello se escribe con la escala de líneas L_e , de acuerdo con esto se llega a

$$V_e = L_e$$

donde V_e es la escala de velocidades.

Recordando que $V = \text{distancia} / \text{tiempo}$; considerando que la distancia es una longitud, el tiempo se expresa como

$$t = \frac{L}{V}$$

Aplicando lo anterior a escala, se tiene

$$t_e = \frac{L_e}{V_e} = \frac{L_e}{L_e} = L_e$$

Usando la definición de gasto que es igual a volumen entre tiempo, lo cual se escribe como $Q = \text{volumen} / \text{tiempo}$, por tanto:

$$Q_e = \frac{\forall}{t}; \quad Q_e = \frac{\forall_e}{t_e} = \frac{L_e^3}{L_e} = L_e^{5/2}$$

O bien, por el principio de continuidad se establece que

$$Q = VA; \quad Q_e = V_e L_e^2; \quad Q_e = L_e L_e^2 = L_e^{5/2}$$

Un factor importante, que también debe tomarse en cuenta al momento de diseñar cualquier modelo hidráulico, es determinar si la rugosidad jugará un papel importante en el estudio del funcionamiento del modelo. Para modelarlo se utiliza la fórmula de *Manning*

$$V = \frac{1}{m} R_H^{2/3} S^{1/2}; \quad m = \frac{R_H^{2/3} S^{1/2}}{V}$$

Como la pendiente en prototipo y modelo son iguales, por tanto $S_e = 1$, tomando en cuenta esto último, se escribe que

$$m = \frac{L_e^{2/3}}{L_e^{1/2}} = L_e^{1/6}$$

En los modelos sin distorsión, las rugosidades se reducen proporcionalmente a la raíz sexta de la escala de líneas. Por lo anterior, en el modelo en estudio no se tomó en cuenta la rugosidad.

3.3 SELECCIÓN DE ESCALAS

El parámetro que se considero para seleccionar la escala de líneas fue el diámetro de las tuberías que se iba representar, esto se hizo con la finalidad de utilizar diámetros comerciales para facilitar la construcción del modelo. Tomando en cuenta lo anterior, se determinó que la escala de líneas del modelo (modelo de los elementos existentes) en prototipo es 10, como resultado de considerar los siguiente:

$$Le_1 = \frac{D_p}{D_m} = \frac{2.50m}{0.25m} = 10$$

donde

- Le_1 escala de líneas del modelo 1, adimensional
- D_p diámetro de la tubería en prototipo, en m
- D_m diámetro de la tubería en el modelo, en m

En este caso se encontró la medida de 10 plg para el diámetro de la tubería comercial de acrílico transparente, que equivale a 25 cm, el cual era adecuado para observar satisfactoriamente el funcionamiento de la tubería.

Con los datos obtenidos y utilizando la escala 1:10 se determino el espacio que sería ocupado por el modelo.

- ⇒ El Modelo abarcaría: el Tanque de sumergencia, el canal perimetral, la descarga del mismo por medio de tuberías de 2.5 m de diámetro siendo ésta de acrílico, lo cual facilitaría la visibilidad de los fenómenos hidráulicos y escurrimientos; la caja de captación y un tramo de 18 m de la tubería de conducción propuesta en el proyecto; que desembocaría en el canal de retorno para realizar mediciones al caudal.

3.4. DISEÑO DEL MODELO

Para el diseño del modelo se utilizaron las relaciones adimensionales que se obtienen al seleccionar el criterio que se utilizó para su análisis, en este caso por tratarse de un escurrimiento a superficie libre se empleó el número de *Froude*, que es el más conveniente, ya que las estructuras que conforman el modelo trabajan a superficie libre.

Tomando en cuenta las escalas de líneas determinadas anteriormente, se calculo el gasto que se requiere suministrar al modelo, con el fin de que trabaje en condiciones similares al del prototipo, así se tiene que tomando la escala de gasto y líneas:

Para el Modelo

$$L_e = 10 \qquad Q_e = L_e^{5/2} = (10)^{5/2} = 316.228$$

$$Q_m = \frac{Q_p}{Q_e} = \frac{24 \text{ m}^3 / \text{s}}{316.228} = 0.076 \text{ m}^3 / \text{s} = 76 \text{ l} / \text{s}$$

Para suministrar el gasto de 76 l/s en el modelo, se realizó y construyó un sistema de captación; utilizando un tanque de carga constante que formaba parte de un modelo antiguo y con el sistema de bombas con el que cuenta el Instituto de Ingeniería se enviaba al modelo el caudal necesario para visualizar su funcionamiento. La captación se hizo por una tubería de PVC de 25cm diámetro y 6m de longitud.

3.4.1 Aspectos generales en canales

El escurrimiento de un fluido en un canal se caracteriza por la exposición de la superficie libre del mismo a la presión atmosférica. Dicha estructura conduce al líquido por efecto de gravedad.

Tipos de canales y características:

- A) CANAL NATURAL: ♣ Sección transversal irregular
♣ Pendientes variables

♣ Arrastre y depósito de sólidos

B) CANAL ARTIFICIAL: ♣ Sección transversal con geometría definida

♣ Revestidos y no revestidos

Los elementos geométricos de la sección transversal de un canal son:

y Tirante. Distancia de la superficie libre del agua al punto más bajo de la sección (medida perpendicularmente al flujo) [L]

B Ancho de la superficie libre del agua. Ancho de la sección medido a la altura de la superficie libre del agua [L]

P Perímetro mojado, perímetro de la sección en contacto con el agua [L]

A Área hidráulica. Área de la sección ocupada por el agua [L²]

R_h Radio hidráulico (no tiene representación física). Relaciona el área hidráulica y el perímetro mojado

$$R_h = \frac{A}{P}$$

Y Tirante hidráulico o tirante medio, relaciona el área y el ancho.

$$Y = \frac{A}{B}$$

En el caso de este trabajo, solo se usaron dos tipos de secciones hidráulicas y sus respectivos elementos geométricos, los cuales se enuncian a continuación:

Sección Cuadrada (Fig. 3.3):

b Ancho de plantilla

$$B = b$$

$$A = By$$

$$P = b + 2y$$

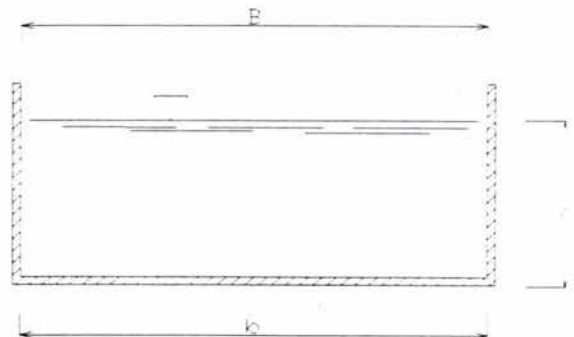


Fig 3.3 Canal de sección rectangular

Para obtener el tirante crítico se utiliza:

$$Rh = \frac{A}{P} = \frac{by}{b + 2y}$$

$$Y = \frac{A}{B} = \frac{by}{b} = y$$

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Sección circular:

Los elementos se obtienen utilizando la **Tabla 2.5 Elementos geométricos en canales de sección circular** del libro *Apuntes de Hidráulica II. Sotelo, G.* (Ref 1). Y, para obtener el tirante crítico se utiliza la **Figura 3. 10** del mismo libro.

Otro elemento importante y que se usa comúnmente en canales, es la pendiente de plantilla del canal, la cual se refiere a la inclinación de la plantilla del canal en la dirección del movimiento.

$$So = \frac{\Delta z}{L'} = \text{sen } \theta$$

donde, L' es la distancia medida sobre la plantilla.

Sin embargo, para ángulos pequeños ($\theta < 10^\circ$) se acepta que $L' = L$; de donde L es la distancia medida horizontalmente.

$$So = \frac{\Delta z}{L'} = \frac{\Delta z}{L}$$

$$So = \text{sen } \theta = \tan \theta$$

Si θ_1 :

$$\text{Cos } \theta_1 = \frac{y}{d}$$

$$y = d \text{ cos } \theta_1$$

si θ_1 es pequeño ($\theta < 10^\circ$) $\rightarrow \text{cos } \theta_1 = 1$

$$\therefore d = y$$

donde y es la profundidad vertical del agua.

El estado crítico o régimen crítico en la sección de un canal existe cuando el tirante y la velocidad adquieren los valores críticos. Si se desea que " y_c " se presente a lo largo de un canal prismático (geometría y pendiente constante) ello equivale a que dicho canal tenga flujo uniforme, es decir, se cumple que en este caso $y_n = y_c$ (tirante normal igual al tirante crítico)

La pendiente necesaria para que anterior ocurra recibe el nombre de pendiente crítica (S_c) y se calcula con la fórmula de *Manning*

$$S_c = \left(\frac{V_c \eta}{R_{hc}^{2/3}} \right)^2$$

Por otra parte la condición de estado crítico se obtiene con la ecuación siguiente, considerando que para y_c también se tiene energía mínima.

$$\frac{Q}{g} = \frac{A^3}{B} \quad ; \quad \frac{V^2}{2g} = \frac{y_c}{2} \quad ; \quad E_{\min} = \frac{2}{3} y_c$$

3.4.2 Selección del material de construcción del modelo

La construcción de los modelos hidráulicos suele ser de diferentes materiales, y estos se seleccionan dependiendo de cada estudio, el tiempo y de los resultados que uno espera, en cada caso. Así, por ejemplo, hay modelos contruidos de madera, metal y tabique, siendo estos último los más utilizados. por la gran facilidad para realizar cambios y transformaciones al modelo, sin llegar a dañar la estructura, hay que señalar que este material es el de menor costo, su manejo es completamente sencillo y su vida útil es más larga que el de los demás materiales.

Para la construcción del modelo se utilizó tabique, con acabados de cemento pulido y yeso. Como el fenómeno de arrastre de partículas en el modelo no se iba a estudiar, por esta razón los acabados se hicieron lisos, ya que el propósito principal era el proponer mejoras al sistema de seguridad u obra de excedencias del Tanque de Sumergencias de la PB5.

Con los planos proporcionados por los patrocinadores se inició la construcción del modelo; sin embargo, conforme se avanzaba a esta actividad algunos de los planos no coincidían totalmente con lo que en la realidad estaba construido, por ello fue necesario hacer las visitas al lugar donde se encontraba el prototipo. Y después de sostener pláticas tanto con el coordinador del proyecto, como los patrocinadores, se inició la construcción del modelo.

3.5 CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DEL MODELO

Al disponer de todo lo necesario para poder alimentar el modelo, así como con la estructura adecuada para que el agua utilizada encontrara su retorno al cárcamo de bombeo, solo era necesario instalar una obra de acceso y construir el modelo y luego plantear la manera de aforar el gasto que se le proporcionaría al mismo.

El modelo se diseño usando como referencia los accesorios existentes para aprovecharlos, y esto reditúo en un ahorro de material y tiempo.

Para cumplir con el objetivo de ver el comportamiento del agua y el óptimo funcionamiento del sistema de seguridad, se contó con los planos de las estructuras existentes, las propuestas y opiniones de los patrocinadores, así como de las observaciones que se hicieron al realizar visitas de campo.

3.5.1 Construcción del modelo

Una vez seleccionada la escala, se comenzó la construcción del modelo. Esta actividad se inició con el trabajo de topografía en el terreno asignado, para realizar levantamientos y así poder asignar el espacio necesario para el modelo, así también para el trazo de los planos, los cuales se realizaron con ayuda de Autocad 12.

Con las correcciones en los planos y los cadenamientos necesarios, se procedió a realizar mediciones con cinta y nivel, para excavar una cepa de 15 cm de profundidad y posteriormente colar una plantilla de concreto sobre la cual se construiría el modelo.

A continuación, se realizó un despalme de la zona, ya que fue necesario retirar vegetación que obstruía la construcción de los modelos, y para hacerlo se elaboraron varias alternativas con diversas áreas geométricas, para con ello escoger las que menos afectará a la vegetación propia del lugar.

Se comenzó con la caja disipadora, ya que esta se encuentra a nivel de plantilla. El desnivel existente entre el tanque de sumergencia y la caja disipadora es de 1.20 m de altura, lo que hizo necesario colar un a losa de concreto, que serviría de base del tanque. (Fig. 3.4)

Faltan páginas

N° 41-42

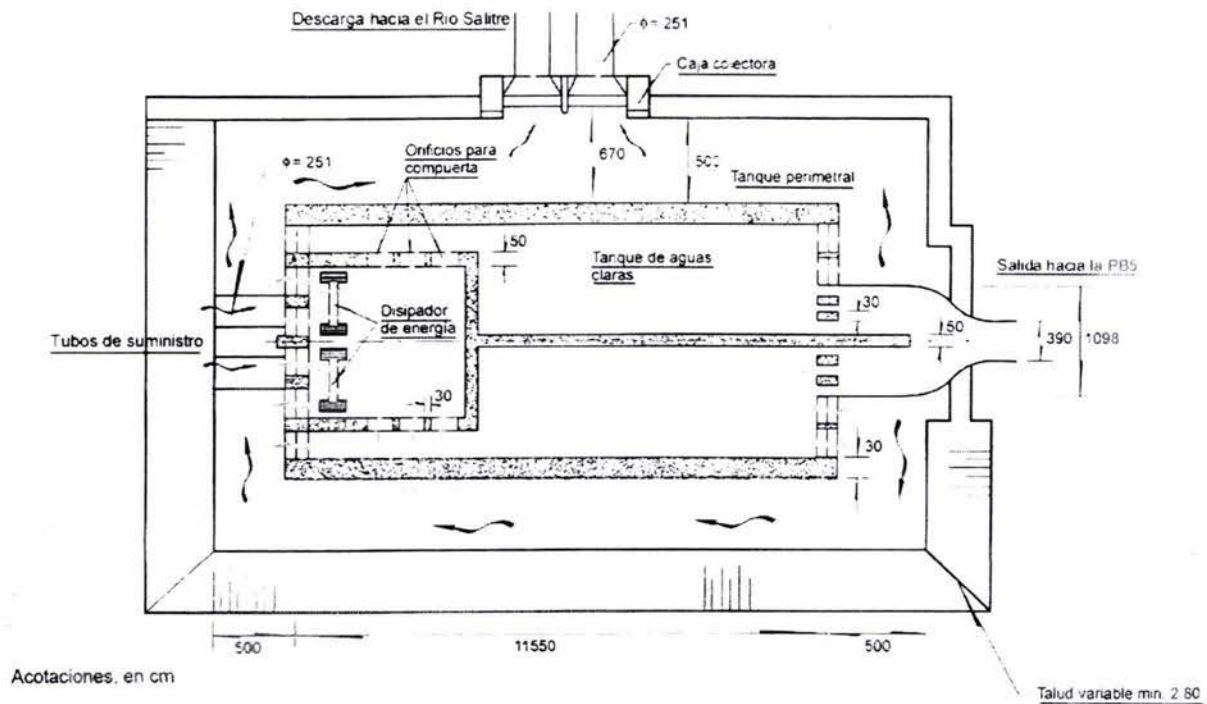


Imagen I

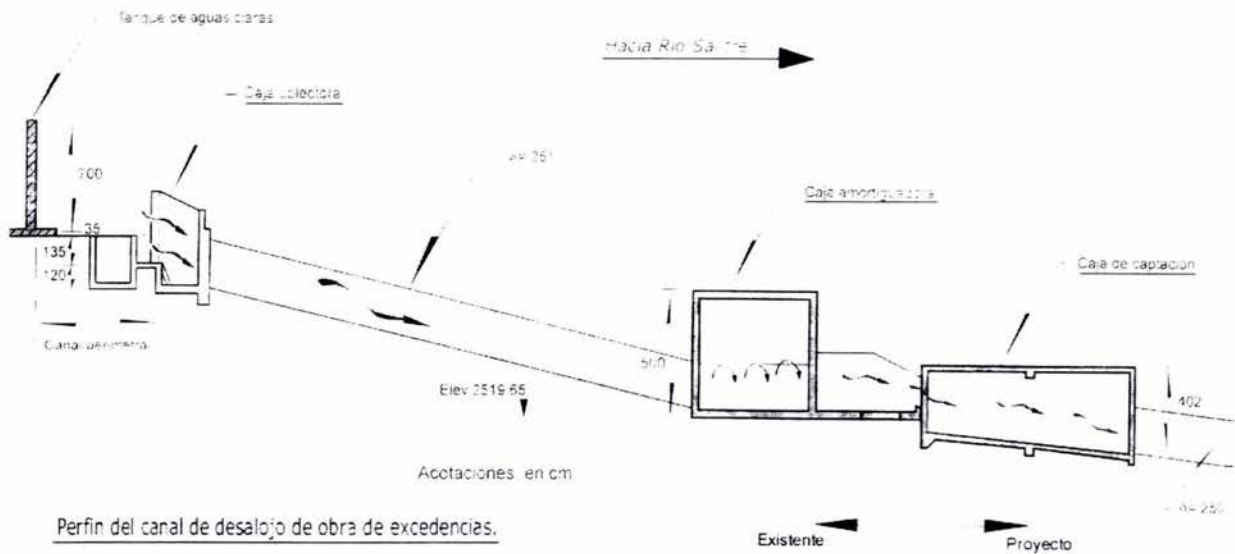


Imagen II

Fig 3.6 Cortes de las dos partes que conforman la obra de excedencias.

En la **Imagen I** se presenta una vista aérea del tanque de sumergencia, así como detalles de los elementos que lo componen.
 En la **Imagen II** se presenta el canal de desalojo(perfil), que forma parte de la obra de excedencias, así también se presenta la parte que se encuentra en proyecto y cual es la existente.

El funcionamiento del tanque se basó en la política operacional con la que entraba en operación el prototipo en caso de contingencia o limpieza de cualquiera de las cámaras. Por lo anterior se realizaron las observaciones bajo tres condiciones de funcionamiento: con las dos cámaras trabajando en forma simultánea y después, cada una de ellas en forma independiente. Para generar dicha situación, se utilizaron compuertas instaladas en la salida del tanque de amortiguador y que forman parte importante del conjunto.*

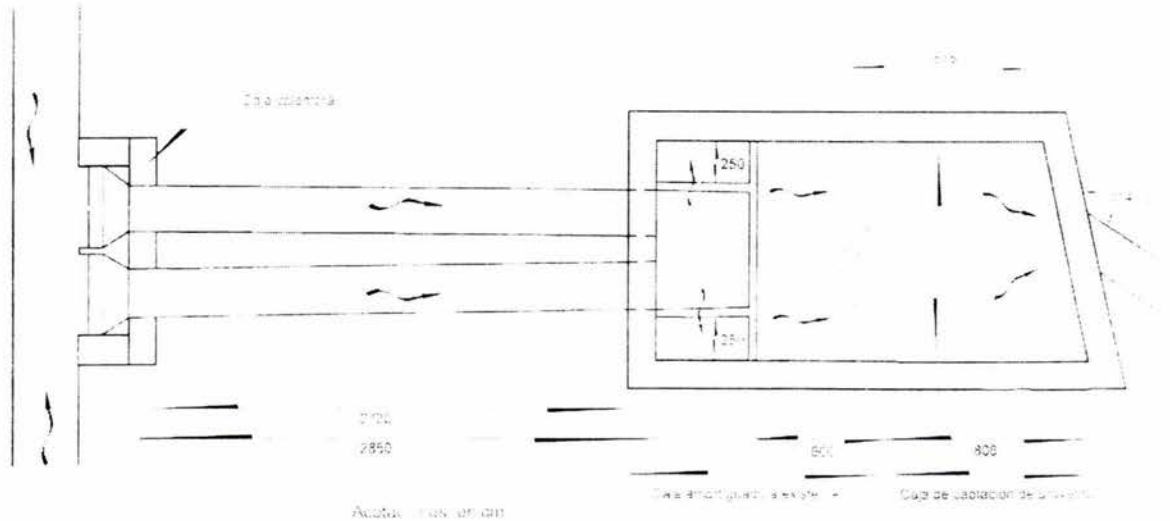


Fig. 3.7 Corte transversal y vista aérea del elemento que desaloja el agua del canal perimetral del tanque amortiguador.

Al estudiar el funcionamiento hidráulico del canal se encontró que la entrada del agua a los tubos en la caja colectora, era irregular y se presentaba un comportamiento turbulento y desigual en el vaciado de los tubos. Para dar solución se estuvo ensayando algunas alternativas y se encontró que la mejor solución consistía en prolongar el muro divisorio de la caja para lograr una mejor distribución del líquido dentro de los tubos. (Fig 3.7)

* Ver catálogo de fotos incluido en este trabajo

*El Hombre moderno, es el eslabón perdido
entre los monos y el ser humano
(Anónimo)*

Capitulo 4

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Uno de los cálculos realizados antes de construir el modelo, consistió en analizar y revisar el tramo comprendido entre, el *Tanque de emergencias y caja colectora* en proyecto, esto con la finalidad de determinar si era necesario colocar un o dos tubos para la condición de descarga de dicha caja. Para ello, se requirió de aplicar los conocimientos de la asignatura de Hidráulica Básica e Hidráulica de Canales, así como el uso de tablas y conceptos de algunos libros referente a la materia.

Una vez realizado este análisis y construido el modelo, se inicio la operación de éste. Como resultado se obtuvo un registro de los tirantes que se presentaban, así como el máximo gasto que podía soportar la estructura sin derramar el liquido por las márgenes del canal de excedencias. Es preciso aclarar el que análisis numérico que se desarrolla a continuación se hizo utilizando los datos del prototipo, esto con el fin de compararlos con los resultados obtenido en campo.

4.1 Solución del tramo, tubo de descarga – caja de captación

En esta parte del trabajo se presenta el análisis en el sistema de descarga de la caja de captación(en proyecto) del sistema de excedencias en la PB5, esto con el fin de determinar si se usan uno o dos tubos para dicha descarga. El estudio se realizó de aguas abajo hacia aguas arriba en todo el elemento del modelo.

El método de incrementos finitos, el cual tiene aplicaciones amplias, es el adecuado para el análisis de perfiles de flujo, tanto en canales prismáticos como no prismáticos. Se utiliza cuando en algún problema se amerita el conocimiento del tirante en secciones previamente especificados. A partir de una sección de control, se determinan sucesivamente los tirantes procediendo hacia aguas arriba de dicha sección en el caso de flujo subcrítico o aguas abajo en el caso del supercrítico. La primera parte se hizo utilizando este método, aplicado a la sección circular (*tubería de descarga, Fig. 4.1*).

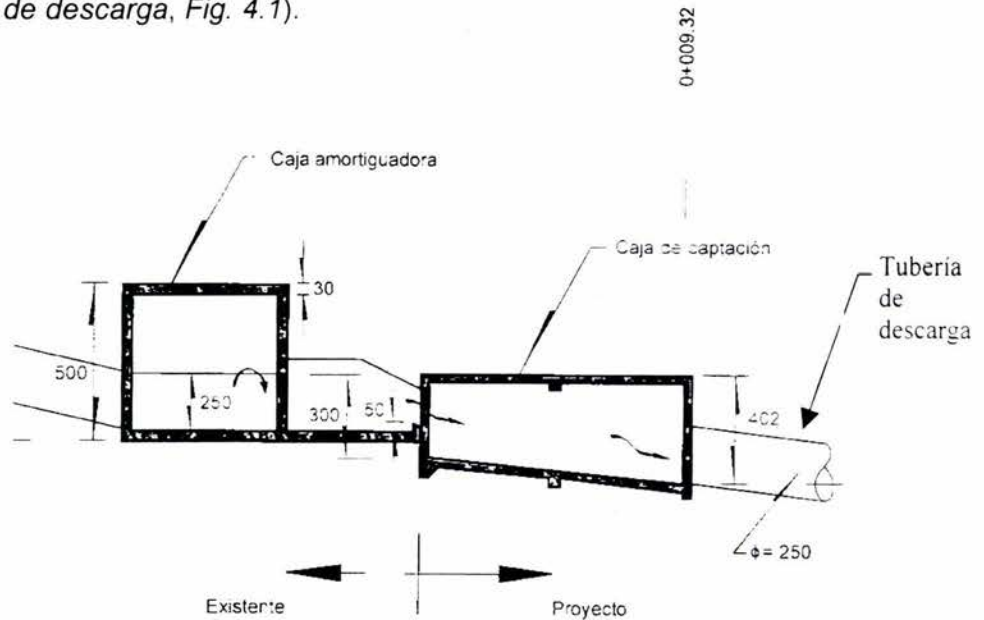


Fig. 4.1 Vista de perfil de la tubería de descarga del tanque colector

A continuación, se mencionan los datos disponibles para poder realizar la revisión de la tubería de descarga.

En el caso del valor de n , éste fue obtenido con respecto al material utilizado en la tubería del prototipo, que de acuerdo con la visita hechas al sitio es de concreto monolítico bien cimbrado sin pulir, para ésta condición el valor se obtiene de la *Tabla 2.4 Factor de fricción, n de Manning (Ref. 1c)*

En el caso de la pendiente, se obtuvo calculando el cociente entre el desnivel y el largo de la tubería.

Datos:

- $Q = 24 \text{ m}^3/\text{s}$
- $D = 2.5 \text{ m}$
- $n = 0.015$
- $S_0 = 0.11\%$
- $L = 17.64 \text{ m}$

Calculo del tirante crítico (y_c):

La condición general del estado crítico está dada por:

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{A^3}{B} \dots\dots\dots \text{Ecu. 4.a}$$

Utilizando las curvas de la *Fig. 3.10 Curvas para determinar el tirante crítico en sección circular (Ref. 1b)*

$$\frac{Q}{D^{2.5}} = \frac{24}{(2.5)^{2.5}} = 0.7$$

$$\frac{y_c}{D} = 0.87 \Rightarrow y_c = 0.87(2.5) = \underline{2.17}$$

Para esta relación, usando la *Tabla 2.5 Elementos geométricos en canales de sección circular (Ref. 1a)*, se obtiene los datos siguientes:

$$\frac{A}{D^2} = 0.7254 \Rightarrow A = 0.7254(2.5)^2 = 4.533 \text{ m}^2$$

$$\frac{R_h}{D} = 0.3017 \Rightarrow R_h = 0.3017(2.5) = 0.7542 \text{ m}$$

$$\frac{AR_h^{2/3}}{D^{8/3}} = 0.3261 \Rightarrow R_h^{2/3} = \frac{0.3261(2.5)^{8/3}}{(4.533)} = 0.8282 \text{ m}$$

$$\frac{Q}{g D^{5/2}} = 0.7528 \Rightarrow Q_c = 23.300 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{E_{min}}{D} = 1.4092 \Rightarrow E_{min} = 1.4092(2.5) = 3.523$$

$$V_c = Q/A = 5.244 \text{ m.s}$$

$$S_f = \left[\frac{V_c(n)}{R_h^{2/3}} \right]^2 \dots\dots\dots \text{Ecu. 4.b} \quad ; \quad \Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_0 - S_f} \dots\dots\dots \text{Ecu. 4.c}$$

Sustituyendo valores conocidos en la **Ecu. 4.b**, se obtiene:

$$n = 0.015 \qquad S_c = \left[\frac{5.244(0.015)}{0.8282} \right]^2 = 0.009046$$

$$S_0 = 0.117 \qquad \text{De donde}$$

$$V = 5.244 \text{ m.s}$$

$$R_h^{2/3} = 0.8282 \text{ m}$$

$$S_0 > S_c$$

∴ determina que existe una pendiente *supercrítica*, con perfil **S2**

Las tablas siguientes (**Tabla 4.1**) muestran el método de incrementos finitos en donde se presentan los tirantes obtenidos a partir de la sección de control. De manera semejante, también se realizó, un procedimiento semejante para calcular el tirante normal de la sección circular.

Para obtener y_n , se utiliza:

$$\frac{nQ}{D^{8/3} S_0} = \frac{ARh^{2/3}}{D^{8/3}} \dots\dots\dots \text{Ecu. 4.d}$$

$$\frac{0.015(24 \text{ m}^3 \text{ s})}{2.5 \text{ m}^{8/3} (0.117)} = \frac{ARh^{2/3}}{D^{8/3}}$$

$$0.0941 = \frac{ARh^{2/3}}{D^{8/3}}$$

Presentación de Resultados

Tabla 4.1

Presentación del método de Incrementos Finitos para obtener el perfil del flujo en estado supercrítico

y_c/D	A/D^2	Rh/D	$ARh^{2/3}/D^{8/3}$	E_{min}
0.88	0.7320	0.3908	0.3286	1.4432
0.86	0.7186	0.3026	0.3210	1.3777
0.83	0.6969	0.3011	0.3151	1.2938
0.80	0.6736	0.3012	0.3015	1.2210
0.76	0.6404	0.3025	0.2888	1.1349
0.72	0.6054	0.2984	0.2702	1.0571
0.67	0.5594	0.2917	0.2460	0.9674
0.63	0.5212	0.2839	0.2252	0.8999
0.60	0.4920	0.2776	0.2092	0.8511
0.55	0.4426	0.2640	0.1825	0.7724
0.50	0.3927	0.2500	0.1558	0.6964
0.46	0.3527	0.2366	0.1348	0.6369
0.40	0.2934	0.2142	0.1050	0.5497
0.37	0.2642	0.2020	0.0909	0.5068
0.35	0.2450	0.1935	0.0820	0.4784
0.32	0.2167	0.1801	0.0690	0.4361

$D = 2.5$

$Q = 24$

$S_o = 0.117$

$n = 0.015$

y	A	Rh_i	$Rh_i^{2/3}$	V_i	$V_i^2/2g$	E_i	Sf_i	Sf_i	Δx_i
2.200	4.5750	0.9770	0.8269	5.2459	1.4026	3.6080	9.056E-03		
2.150	4.4913	0.7565	0.8228	5.3437	1.4554	3.4443	9.490E-03	0.000433883	1.4048
2.075	4.3556	0.7528	0.8329	5.5101	1.5475	3.2345	9.848E-03		
2.000	4.2100	0.7530	0.8245	5.7007	1.6564	3.0525	1.076E-02	9.085E-04	2.9725
1.900	4.0025	0.7563	0.8307	5.9963	1.8326	2.8373	1.172E-02		
1.800	3.7838	0.7460	0.8221	6.3429	2.0506	2.6428	1.339E-02	1.670E-03	4.6590
1.675	3.4963	0.7293	0.8100	6.8645	2.4017	2.4185	1.616E-02		
1.575	3.2575	0.7098	0.7959	7.3676	2.7667	2.2498	1.928E-02	3.123E-03	6.140E
1.500	3.0750	0.6940	0.7832	7.8049	3.1048	2.1278	2.234E-02		
1.375	2.7663	0.6600	0.7595	8.6760	3.8365	1.9310	2.936E-02	7.016E-03	7.9297
1.250	2.4544	0.6250	0.7308	9.7785	4.8735	1.7410	4.028E-02		
1.150	2.2044	0.5915	0.7040	10.8874	6.0416	1.5923	5.381E-02	0.0135	9.3673
1.000	1.8338	0.5355	0.6592	13.0879	8.7306	1.3743	8.869E-02		
0.925	1.6513	0.5050	0.6338	14.5344	10.7671	1.2670	1.183E-01	0.0295	10.5957
0.875	1.5313	0.4838	0.6165	15.6735	12.5208	1.1960	1.454E-01		
0.800	1.3544	0.4503	0.5865	17.7204	16.0046	1.0903	2.054E-01	0.0600	12.4490

La Tabla 4.2 muestra las aproximaciones sucesivas para obtener el valor del tirante normal (y_n)

Para obtener el tirante normal de la sección circular, recurrimos a la ayuda de las tablas 2.5 de Hidráulica II (Sotelo, G) y de las cuales obtenemos los siguiente valores, en algunos casos se hicieron iteraciones con el fin de obtener valores más aproximados.

y/D	y	A/D^2	R_h/D	A	R_h	$AR_h^{2/3}$	$AR_h^{2/3}/D^{8/3}$
0.200	0.500	0.1180	0.1206	0.7375	0.3015	0.3316	0.0273
0.300	0.750	0.1982	0.1709	1.2388	0.4273	0.7027	0.0610
0.350	0.875	0.2450	0.1935	1.5313	0.4838	0.9436	0.0820
0.370	0.925	0.2642	0.2020	1.6513	0.5050	1.0471	0.0910
0.372	0.930	0.2656	0.2021	1.6600	0.5052	1.0530	0.0915
0.375	0.938	0.2675	0.2061	1.6719	0.5153	1.0745	0.0933

Tabla 4.2 Obtención del tirante normal de la sección circular

De la tabla se tiene que el tirante normal es $y_n = 0.93 \text{ m}$, y como el tirante crítico obtenido es de $y_c = 2.17 \text{ m}$, o sea

$$y_c > y_n$$

se dice que el flujo es *supercrítico* en la sección circular. (Fig. 4.2)

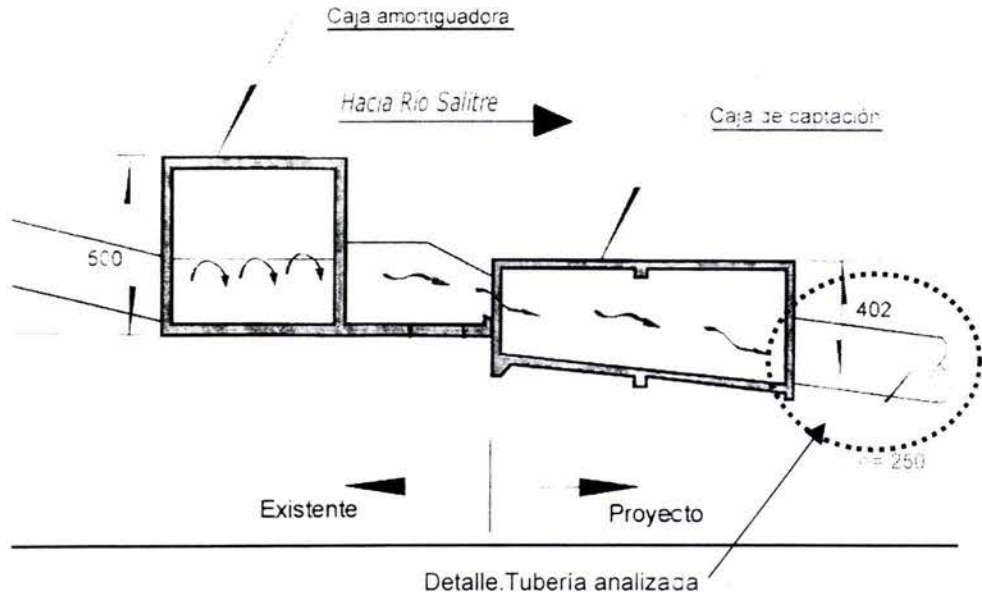


Fig. 4.2 Perfil de la sección circular (de descarga) analizada.

A continuación se presenta el análisis aguas arriba de la sección circular, anteriormente analizada.

4.2 Solución del tramo: caja de captación

Conocido el tirante crítico aguas abajo y tomando en cuenta a la particular geometría propuesta de la caja de captación, se procedió a utilizar la ecuación que se encuentra en el **Cap 15** "Resalto hidráulico y su uso como dissipador de energía: Vertedor de caída recta", del libro de **Ven Te Chow "Hidráulica de canales abiertos"**, (Ref.3a) en donde se expresa que "la geometría del flujo en vertedores de caída libre (Fig 4.1) pueden describirse mediante funciones del 'número de caída', la cual se define como":

$$D = \frac{q^2}{gw^3} \dots\dots\dots \text{Ecu.4.e}$$

en donde

q : caudal por unidad de ancho de la cresta

g : aceleración de la gravedad

w : altura de la caída

Se sabe que $Q = B \cdot q$ y despejando q se tiene $q = \frac{Q}{B}$: de donde:

Q : Gasto del caudal, $24 \text{ m}^3/\text{s}$

B : Ancho de canal, 11.8 m

$$q = \frac{24 \text{ m}^3/\text{s}}{11.8 \text{ m}} = 2.03 \text{ m}^2/\text{s}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 4.e, se obtiene:

$$D = \frac{(2.03 \text{ m}^2/\text{s})^2}{9.81 \text{ m}/\text{s}^2 (2.02 \text{ m})^3} = 0.51$$

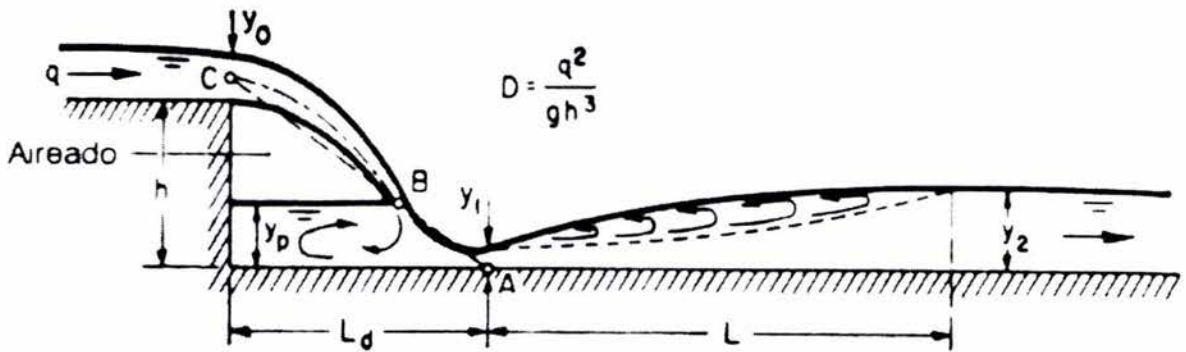


Fig. 4.3 Representación de caída libre (tomado del libro de Ven Te Chow)

Las funciones que proceden a la definición son las siguientes:

$$\frac{L_d}{w} = 4.30 D^{0.27} \quad \Rightarrow \quad L_d = 4.30 (0.051)^{0.27} (2.02) = 3.889$$

$$\frac{y_p}{w} = 1.00 D^{0.22} \quad \Rightarrow \quad y_p = 1.00 (0.051)^{0.22} (2.02) = 1.049$$

$$\frac{y_1}{w} = 0.54 D^{0.425} \quad \Rightarrow \quad y_1 = 0.54 (0.051)^{0.425} (2.02) = 0.3079$$

$$\frac{y_2}{w} = 1.66 D^{0.27} \quad \Rightarrow \quad y_2 = 1.66 (0.051)^{0.27} (2.02) = 1.5014$$

Donde:

Presentación de Resultados

L_d : longitud de caída (distancia desde el muro de caída hasta la posición de la profundidad y_1)

y_p : Nivel del canal bajo la napa

y_1 : Profundidad en el pie de ola napa o inicio del resalto hidráulico.

y_2 : es la profundidad seciente de salida correspondiente a y_1 .

Se procede ahora a obtener la carga sobre el vertedor, por lo que se utiliza las ecuaciones correspondientes a vertedores oblicuos (*Fig 7.22. en el libro de Hidráulica General de Sotelo*) (**Ref.3a**).

$$Q = K \frac{2}{3} 2y\mu b_o h^{3/2} \dots\dots\dots \text{Ecu. 4.f}$$

Según Aichel, el coeficiente K vale:

$$K = 1 - a \frac{h}{w} \dots\dots\dots \text{Ecu. 4.g}$$

donde a depende del angulo θ y de la relación b/w , con la condición de que $h/w \leq 0.62$

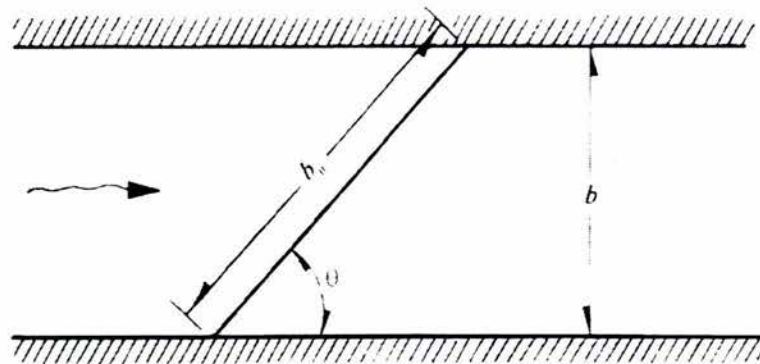


Fig. 4.4 Representación de vertedor oblicuo (tomado del libro Hidráulica General(ref. 3))

b : ancho del canal → 11.8 m

w : altura de caída → 2.02 m

$$\theta = 104^{\circ}28 \quad ; \quad \frac{b}{w} = \frac{11.8 \text{ m}}{2.02 \text{ m}} = 5.84$$

Entrando con estos datos a la **Tabla 7.8 (Ref. 2b)** se obtiene que: $a = 0$, entonces sustituyendo en la **Ecu. 4.g**

$$K = 1 - (0) \frac{h}{2.02} = 1$$

Para obtener μ se utilizó la ecuación de Rehbock (1929) indicada en la **Tabla 7.1 (Ref. 2c)**.

$$\mu = \left[0.6035 + 0.0813 \left(\frac{h + 0.0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2} \dots\dots\dots \text{Ecu. 4.h}$$

$$\mu = [0.60355 + 0.0402h] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2}$$

Sustituyendo en la **Ecu.4.f**

$$Q = (1) \frac{2}{3} 2(9.81) \left[0.60355 + 0.0402 h \left(1 + \frac{0.0011}{h} \right)^{3/2} \right] (12.10) h^{3/2}$$

$$\frac{2}{3} (4.429)(12.10) = (0.60355 + 0.0402h) \left(1 + \frac{0.0011}{h} \right)^{3/2} h^{3/2}$$

$$h = 1.026 \text{ m}$$

4.3 Solución del tramo: caja de amortiguamiento

Del **Capítulo 6** del libro de Hidráulica General (**Ref. 2.d**), en lo referente al subtema de Orificios de Grandes dimensiones o cargas pequeñas, se tiene la siguiente tabla:

RELACION			ORIFICIOS	
$\frac{a}{H}$	$\frac{o}{H}$	$\frac{D}{H}$	Rectangular	Circular
2			0.94	0.95
1			0.99	0.99
0.677			1	1

Tomada de la **Ref 2.a**

Presentación de Resultados

Para el análisis del modelo se consideran los orificios rectangulares, y como primer paso para determinar el tirante o carga en el orificio se obtiene el valor de C_d (coeficiente de gasto) de la tabla anterior, haciendo un promedio con 0.94 y 1.

$$C_d = 0.97$$

Se calcula la velocidad del agua que pasa por el orificio:

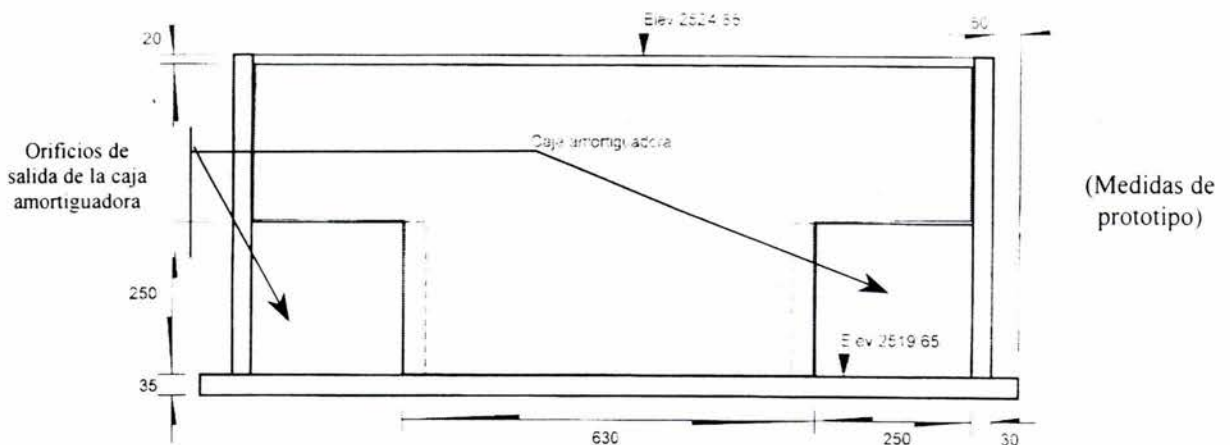


Fig. 4.5 Corte transversal de la caja colectora de descarga y salida de la caja amortiguadora. Vista aguas arriba del vertedor oblicuo y salida

Se procede a hacer lo correspondiente para obtener el área del orificio rectangular, dando como resultado $6.25m^2$, como se va a analizar un solo orificio se considera el gasto a la mitad, $12m^3/s$ y se tiene una velocidad de $1.92m/s$.

El C_d obtenido de las tablas se corrige, ya que se trata de un orificio de contracción incompleta, debido a que "una de las fronteras del recipiente coincide con la arista del orificio" (Ref. 2.e). En este caso, como se puede apreciar, tanto la base del orificio como una de sus arista forman parte del recipiente (Fig. 4.5).

La corrección de C_d se hace de forma gráfica, con ayuda de la Fig 6.4 (Ref. 2.e), de donde se tiene:

$$\mathfrak{R} = \frac{VD}{\nu} \dots \dots \dots Ecu. 4.i$$

donde ν es la viscosidad cinemática y se considera un valor constante de $0.0175 cm^2/s$, o lo que es igual $1.75 \times 10^{-4} m^2/s$. Como se trata de un orificio de forma cuadrada, el diámetro se considera como la medida de unos de los lados, ósea, $D = L = 2.5m$

Presentación de Resultados

Sustituyendo los valores conocidos en la ecuación 4.5, se obtiene un valor de *Reynolds* igual 2.7428. Con este dato obtenido se procede a obtener los datos de *Cd*, *Cc* y *Cv* de la gráfica 6.4 (Sotelo, HB)

$$Cd = 0.62$$

$$Cc = 0.64$$

$$Cv = 0.97$$

Con estos datos se procede a utilizar la ecuación de contracción parcialmente suprimida (Ref. 2.f)

$$Cd = Cd_o \left[1 + 0.641 \left(\frac{A_o}{A_T} \right)^2 \right] \dots\dots\dots Ecu. 4.j$$

En donde:

Ao – área de pared del recipiente

AT – área del orificio

Haciendo la sustitución de los datos se obtiene el valor de *Cd* = 0.645, y utilizando la ecuación general de los orificios:

$$Q = Cd.A \sqrt{2gH} \dots\dots\dots Ecu: 4.k$$

reduciendo para $V = Q/A$ y despejando *H*, que es la que se busca se obtiene la siguiente carga:

$$H = \frac{V^2}{2g Cd^2} = 0.451 m$$

La suma de la distancia al centroide del orificio más *H* da como resultado el tirante definitivo.

Es decir: 1.25 + 0.451 = 1.70 m

De lo cual se concluye que no trabaja como orificio, sino como canal rectangular

Otra manera de obtener la carga que se presenta en la salida del orificio es utilizando la ecuación de la energía.

$$Z_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + hp$$

Siendo de sección rectangular, se utiliza el área correspondiente a la sección.

Presentación de Resultados

En este caso se hace la unión de los orificios rectangulares, lo que da como resultado un solo rectángulo de $5 * 2.5$ m, esto se hace con el fin de simplificar y abarcar al mismo tiempo todo el gasto que desalojan en conjunto.

$$Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + k \left[\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right] \quad ; \quad V = \frac{Q}{A}$$

$$Y_1 + \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_1^2} \right) = Y_2 + \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_2^2} \right) + \frac{k \cdot Q^2}{2g} \left[\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right] \quad ; \quad A = bY$$

$$Y_1 + \frac{Q^2}{19.62} \left(\frac{1}{b_1^2 \cdot Y_1^2} \right) = Y_2 + \frac{Q^2}{19.62} \left(\frac{1}{b_2^2 \cdot Y_2^2} \right) + \frac{0.82 \cdot Q^2}{19.62} \left[\frac{1}{b_1^2 \cdot Y_1^2} - \frac{1}{b_2^2 \cdot Y_2^2} \right]$$

El coeficiente K se obtuvo de los valores promedio obtenidos por fórmula. Como se trata de una expansión, el valor que le corresponde es:

$$K = 0.82$$

Sustituyendo valores conocidos y resolviendo la ecuación, se obtiene un $Y_1 = \underline{1.687 \text{ m}}$

Para obtener la carga en el cimacio que se encuentra en el caja de amortiguamiento se procede a hacer lo siguiente:

$$Q = \frac{2}{3} 2\gamma \mu b_o h^{3/2}$$

$$Q = 2.952 \left[(0.6035 + 0.0325h) \left(1 + \frac{0.011}{h} \right)^{3/2} \right] (6.70) * (h^{3/2})$$

de donde resolviendo se tiene que $h = \underline{0.969}$. Por lo que la carga dentro de la caja de amortiguamiento es de **3.47m**.

Se obtiene después el perfil de la descarga, el cual se considera espacialmente variado y para lo cual se utilizó un programa desarrollado por el Ing. Fidel Sánchez (Ref. c) y del cual se obtuvieron los siguientes resultados.

TABLA 4.3. *Presentación de resultados de perfiles en flujo espacialmente variado al descargar de la caja de amortiguamiento*

Datos: $B = 2.5$ $S_0 = 0$ con Y_c (umbral) = 0 $Z_{ini} = 0$
 $D_E = 0$ $Y_{ini} = 1.7$ $Y = 2.376477$

X(c)	Z(c)	Yc(c)	v(c)	Y(c)	NA(c)	IA(c)
0.000	0	1.330	2.824	1.700	2.470	-0.032
0.335	0	1.285	2.498	1.826	2.595	0.098
0.670	0	1.240	2.256	1.915	2.685	0.191
1.005	0	1.192	2.053	1.987	2.757	0.265
1.340	0	1.146	1.876	2.047	2.816	0.326
1.675	0	1.097	1.716	2.098	2.867	0.379
2.010	0	1.049	1.569	2.141	2.911	0.424
2.345	0	0.998	1.432	2.179	2.949	0.463
2.680	0	0.945	1.302	2.213	2.982	0.498
3.015	0	0.893	1.178	2.242	3.011	0.528
3.350	0	0.838	1.059	2.267	3.037	0.554
3.685	0	0.780	0.943	2.290	3.059	0.577
4.020	0	0.721	0.832	2.309	3.078	0.597
4.355	0	0.661	0.723	2.325	3.095	0.614
4.690	0	0.595	0.615	2.340	3.110	0.629
5.025	0	0.527	0.510	2.352	3.121	0.641
5.360	0	0.456	0.407	2.361	3.131	0.651
5.695	0	0.375	0.304	2.369	3.138	0.659
6.030	0	0.287	0.202	2.374	3.143	0.664
6.365	0	0.180	0.101	2.376	3.146	0.666
6.700	0	0.000	0.000	2.377	3.146	0.667

En la **Tabla 4.3** se muestran los tramos de análisis (X_c), los tirantes críticos que se presentan en cada tramo (Y_c), así como los tirantes a lo largo del canal colector (Y). Se demuestra que la descarga no se ahoga y funciona perfectamente, así también el elemento que se considera como orificio no trabaja como tal, si no como un canal.

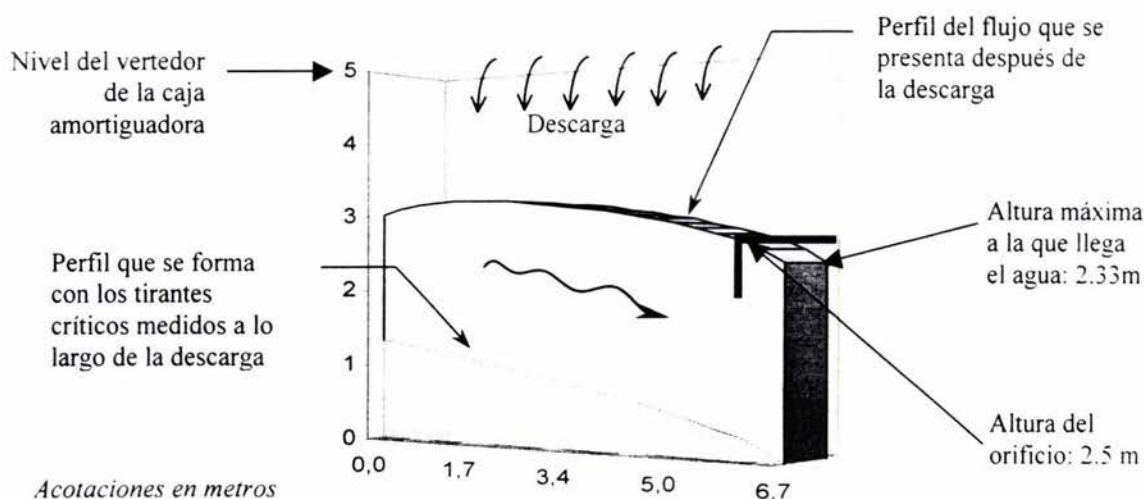


Fig. 4.6 *Perfil del flujo espacialmente variado que se presenta después de la descarga*

4.4 Solución del tramo: tuberías de descarga aguas arriba.

Teniendo la carga dentro de la caja amortiguadora, se calcular el perfil de la tubería de descarga que desaloja el agua del canal perimetral del tanque de sumergencia, y que forma parte de la obra de excedencia. Se sabe de antemano, por las pruebas realizadas, que se presenta un salto antes de la entrada al tanque de amortiguamiento y por medio de los cálculos se establecerán sus elementos.

Haciendo el estudio para un solo tubo de descarga:

$$\begin{array}{ll}
 Q = 12 \text{ m}^3/\text{s} & Q = 12 \\
 D = 2.5 \text{ m} & g = 9.81 \\
 n = 0.018 & D^{2.5} = (2.5)^{2.5} = 0.3877 \\
 S_o = 0.2263 & \\
 L = 28.50 \text{ m} &
 \end{array}$$

De las **Tablas 3.10** de la **Ref 1b** se tiene que:

$$\frac{y_c}{D} = 0.54 \quad \Rightarrow \quad y_c = 0.54 * (2.5)$$

$$y_c = \underline{1.35 \text{ m}}$$

Para esta relación, usando la **Tabla 2.5** de la **Ref. 1a** se obtiene los datos siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 A_c = 2.704 \text{ m}^2 & V_c = Q/A = \frac{12}{2.704} = 4.437 \text{ m/s} \\
 R_h = 0.655 \text{ m} & \\
 R_h^{2/3} = 0.754 \text{ m} & \\
 S_c = \left[\frac{V_o(n)}{R_h^{2/3}} \right]^2 &
 \end{array}$$

Sustituyendo valores conocidos, se obtiene:

$$\begin{array}{ll}
 n = 0.018 & \\
 S_o = 0.117 & S_c = \left[\frac{0.740(0.018)}{0.754} \right]^2 = 0.01120 \\
 V = 4.437 \text{ m/s} &
 \end{array}$$

De donde

$$S_o > S_c$$

$$R_h^{2/3} = 0.754 \text{ m}$$

Por lo que se tiene una pendiente supercritica

Para obtener y_n , se utiliza:

Para obtener y_n , se utiliza:

$$\frac{nQ}{D^{8/3} S_0} = \frac{ARh^{2/3}}{D^{8/3}}$$

$$\frac{0.018(12m^3/s)}{2.5m^{8/3}(0.0112)} = \frac{ARh^{2/3}}{D^{8/3}}$$

$$0.54 = \frac{ARh^{2/3}}{D^{8/3}}$$

Tabla 4.4 *Calculo de las curvas $(E + hf/2) - y$, $(E + hf/2) + y$, con un gasto de $12m^3/s$
y $\Delta x = 2.85m$ ($\Delta z = 0.6449$)*

y	A	Rh_i	$Rh_i^{2/3}$	V_i	$V_i^2/2g$	E_i	Sf_i	$h_f/2$	$E + h_f/2$	$E - h_f/2$
1.350	2.704	0.655	0.754	4.437	1.004	2.354	0.011	0.016	2.370	2.338
1.225	2.392	0.617	0.724	5.017	1.283	2.508	0.016	0.022	2.530	2.486
1.075	2.018	0.564	0.682	5.946	1.802	2.877	0.025	0.035	2.912	2.842
0.900	1.591	0.495	0.625	7.541	2.899	3.799	0.047	0.067	3.866	3.731
0.800	1.354	0.450	0.587	8.860	4.001	4.801	0.074	0.105	4.907	4.696
0.750	1.239	0.427	0.567	9.687	4.783	5.533	0.095	0.135	5.668	5.398
0.725	1.181	0.416	0.557	10.159	5.260	5.985	0.108	0.154	6.139	5.831
0.700	1.125	0.404	0.549	10.667	5.799	6.499	0.123	0.175	6.674	6.324
0.675	1.069	0.392	0.535	11.222	6.418	7.093	0.143	0.203	7.296	6.890
0.650	1.014	0.379	0.527	11.830	7.133	7.783	0.164	0.233	8.016	7.550
0.625	0.959	0.367	0.512	12.508	7.974	8.599	0.193	0.275	8.874	8.324
0.600	0.906	0.354	0.501	13.251	8.949	9.549	0.227	0.323	9.872	9.226
0.575	0.853	0.341	0.484	14.066	10.084	10.659	0.273	0.389	11.048	10.270

A continuación se presenta el perfil de la tubería utilizando el método gráfico propuesto por el Prof. Sánchez Bribiesca, con la finalidad de calcular la longitud de los tramos y los tirantes que se presentan en dichos tramos.

De la **Tabla 4.4** se desprende la siguiente gráfica

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

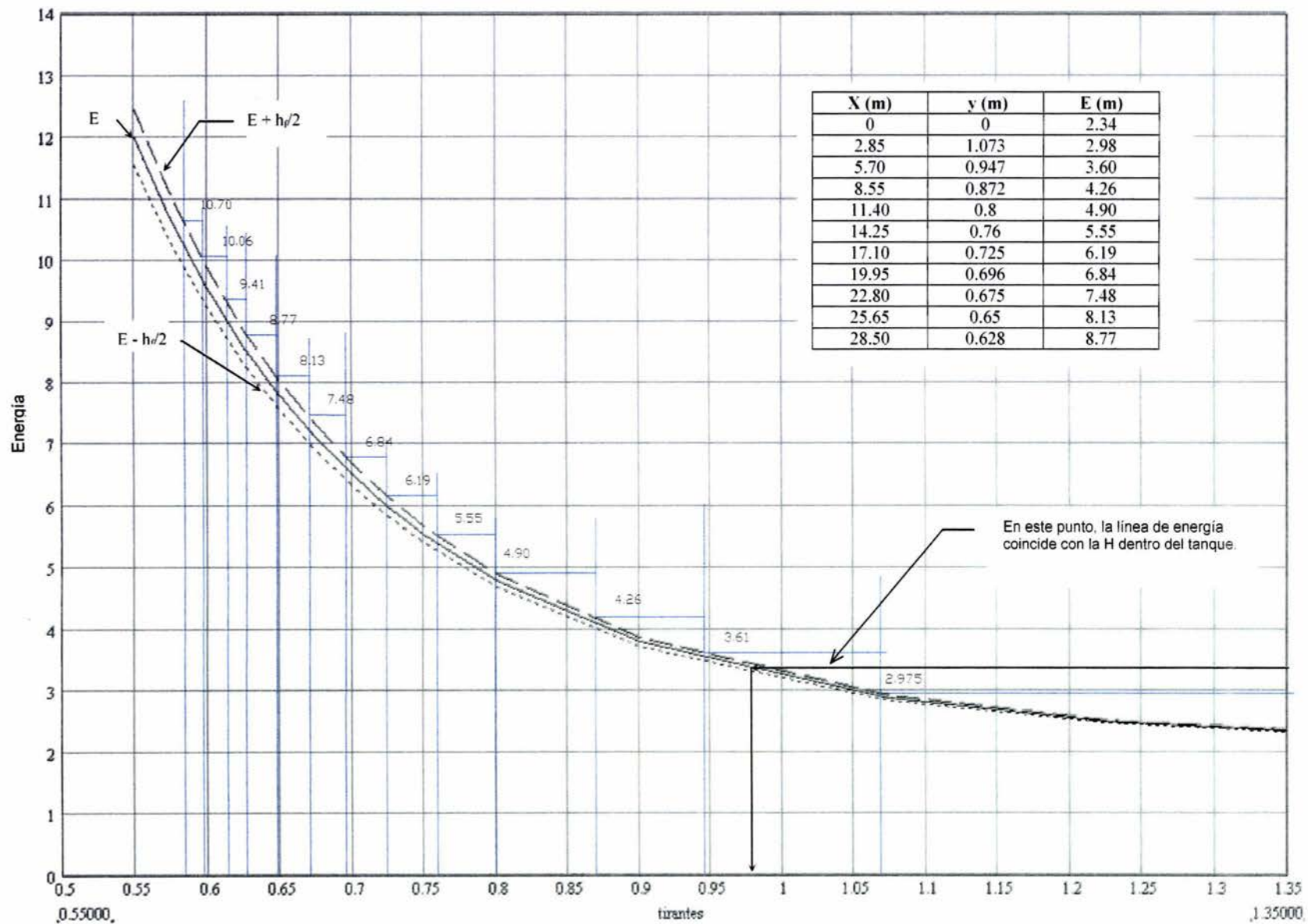


Fig 4.6 Curvas de energía específica – Tirante

Con ayuda de la gráfica anterior se deduce que: el salto hidráulico dentro de la tubería es barrido y se inicia 5m antes de descargar en la caja de amortiguamiento.

4.5 Propuesta de diseño de cimacio en la zona de llegada

Hasta aquí finaliza el estudio que se realizó a la obra de exedencias del modelo, con la finalidad de optimizar su operación de lo cual se concluye lo siguiente (de aguas abajo hacia aguas arriba):

- Es suficiente un solo tubo para descargar el agua en la caja de captación que conduce el flujo hacia el Río Salitre.
- Realizar una revisión periódica de las paredes de la caja amortiguadora, ya que la fuerza con la que llega el agua puede tender a lesionar la resistencia de las paredes frontales.
- Modificar el muro divisorio de la caja colectora (el canal perimetral), con el fin de estabilizar el comportamiento del agua al momento de descargarse por las tuberías

Ahora bien, también y con ayuda del modelo se pudo analizar el comportamiento del flujo dentro del canal perimetral y el tanque. Se realizaron observaciones bajo tres condiciones de funcionamiento: Con las dos cámaras del tanque trabajando en forma simultánea y para cada una de ellas en forma independiente (*ver Anexo Fotográfico*), esto se hizo manejando las compuertas instaladas en dicho tanque. Se obtuvo que la condición crítica se presentaba cuando se operaba la cámara más alejada a la caja colectora de las tuberías; en esta situación se creaba un remanso que llegaba a rebasar la altura de los muros.

Al observar el funcionamiento hidráulico del canal se encontró que la llegada del agua a los tubos en la caja colectora no trabajaban adecuadamente, ya que era irregular y ocasionaba un mal comportamiento en ellos, se ensayaron varias alternativas y se determinó que la mejor solución consistía en prolongar el muro divisorio de la caja para lograr una mejor distribución de la misma dentro de ellos. El canal perimetral es adecuado para manejar 24 m³/s, solo se recomendó revisar que la altura de los muros llegue a una elevación mínima de 2532 m.s.n.m., ya que de acuerdo a la visita realizada al sitio se vio que esta cota no es uniforme a lo largo del muro perimetral.

En ese mismo sentido, el patrocinador pidió algunas propuestas de alternativas para evitar que el flujo (en caso de algún paro de máquinas) llenara el tanque de aguas claras y se vertiera por las ventanas al canal perimetral. Se propuso probar con un agujero en la tubería de llegada y construir un cimacio que permitiera desalojar el agua excedente a través de él.

Para conocer y observar el comportamiento del agua en esta situación, se realizó un orificio en la tubería de llegada al cual se le adaptó una cubierta con la finalidad de amortiguar el chorro de salida del flujo (véase *anexo fotográfico a partir de la foto 13*), una vez que el agua ha alcanzado el nivel de 2,531.61 el agua se derrama y cae dentro del canal perimetral. Se determinó que la carga con la que debe funcionar el cimacio es de 0.32 m.

4.5.a Vertedor tipo cimacio

El vertedor tipo cimacio es utilizado para no producir una variación inestable. La forma de este tipo de vertedor ayuda a que el perfil del agua adopte una sola trayectoria para cualquier gasto. Se diseña un vertedor tipo cimacio para una sola carga total, llamada carga de diseño (H_d). Cuando un vertedor de tipo cimacio descarga a la carga de diseño, el flujo se desliza sobre la cresta sin ninguna interferencia de las superficies y alcanza una eficiencia casi máxima.

4.5.b Diseño del Cimacio

Con las siguientes ecuaciones, se obtiene el perfil de cimacio tipo WES con paramento aguas arriba vertical. (Ref 5) (Fig. 4.6)

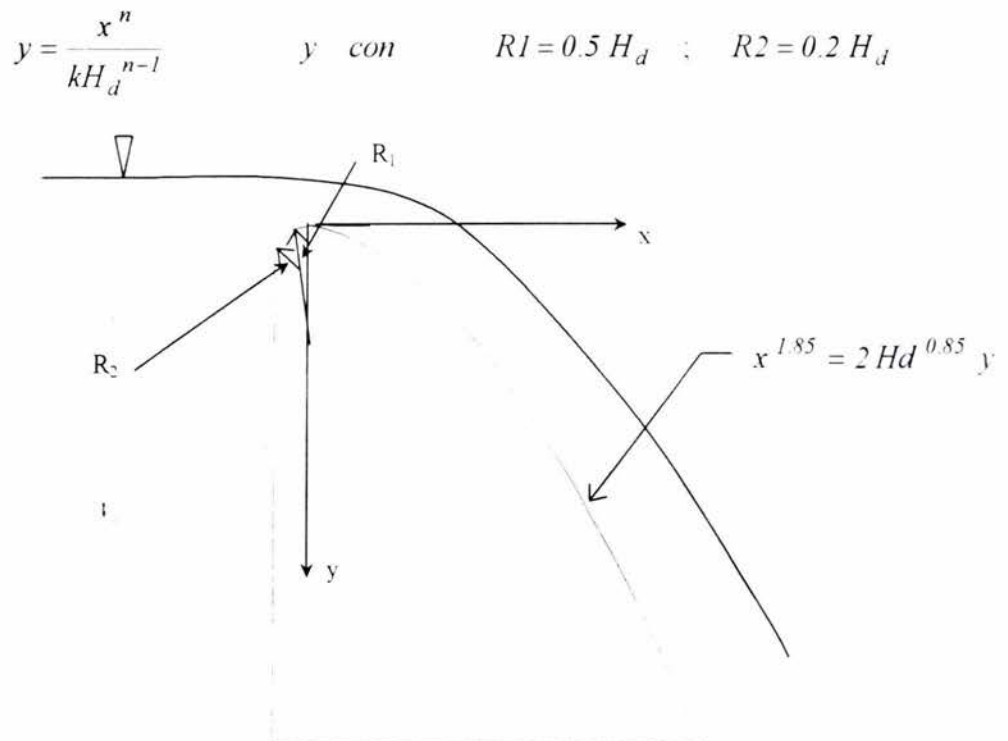
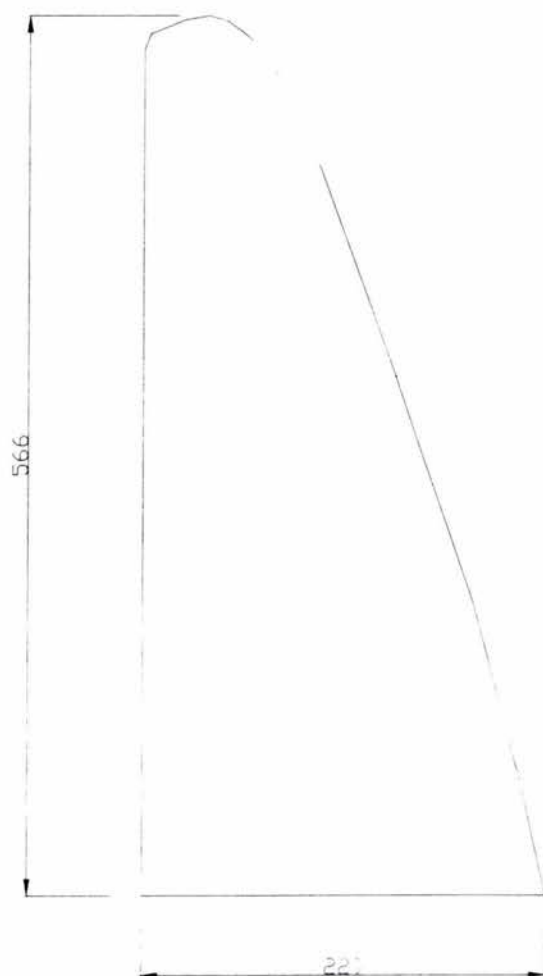


Fig 4.6 Perfil de un cimacio tipo WES con velocidad de llegada despreciable y paramento vertical hacia aguas arriba

Presentación de Resultados

R1 y R2 representan una manera aproximada de obtener el cuadrante aguas arriba de la caída sobre el cimacio. De lo anterior se tienen los siguientes resultados y el perfil del cimacio diseñado (ver Fig 4.7)

$$\text{Con } y = \frac{x^{1.85}}{0.7593} \quad \text{y } R_1 = 0.16, R_2 = .064$$



x	y
0.1	0.019
0.2	0.067
0.3	0.142
0.4	0.242
0.5	0.365
0.6	0.512
0.7	0.681
0.8	0.872
0.9	1.084
1.0	1.317
1.2	1.845
1.4	2.454
1.6	3.142
1.8	3.907
2.0	4.748
2.1	5.196
2.2	5.663

Fig 4.7 Perfil y medidas del cimacio tipo WES diseñado

El diseño de este cimacio fue una alternativa para poder desalojar el agua rápidamente el flujo que se presentaba al momento de presentarse un imprevisto paro de maquinas, sin embargo no ha sido considerado un elemento que se tenga que construir en el prototipo.

*La amistad perfecta es la de los buenos y
de aquellos que se asemejan por la virtud.
Ellos se desean mutuamente
el bien en el mismo sentido.
Aristóteles*

Capítulo 5

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

De lo observado en el funcionamiento del tanque de aguas claras de la PB5 del Sistema Cutzamala, con descarga de 8 ventanas, así como del canal perimetral, analizando las 3 condiciones pedidas por el patrocinador (CNA), se tiene lo siguiente:

- a) Se recomienda elevar los muros del canal perimetral (al menos a una elevación que equivalga a 2531.65 m.s.n.m.). Esto tiene la finalidad de evitar el derrame del agua fuera del canal perimetral, según lo observado en el modelo.
- b) Modificar el muro divisorio de la caja colectora para tener un mejor funcionamiento de las tuberías. De acuerdo con las pruebas realizadas en el modelo, se mejora el comportamiento del agua en la caja colectora, los tubos y la caja amortiguadora.

- c) Hacer modificación en la tubería de llegada y construir el cimacio. Se garantiza que no sea necesario llenar el tanque de aguas claras. Diseñar elemento disipador(tapa), ello ayudaría a garantizar el funcionamiento adecuado de la alternativa propuesta encontrada en el modelo.

En lo que respecta a la caja amortiguadora aguas abajo del tanque y de la caja colectora, se propone lo siguiente:

- d) Realizar una inspección estructural a la caja amortiguadora, ya que la fuerza con la llega el agua a ésta en bastante fuerte y pudieran surgir grietas o lesiones al elemento, que a la larga conllevarían a la destrucción parcial o total del elemento.
- e) Se concluye que no es necesario utilizar 2 tubos en la zona de descarga de la caja de captación, para conducir el agua hacia el Río Salitre.

ANEXOS

ANEXO A

Esquema General del Aprovechamiento Hidráulico

El sitio de obra de captación o "boquilla" queda determinado por el parteaguas de la cuenca, la cual representa una subcuenca dentro del curso del río o arroyo considerado. El agua de esa cuenca será captada ahí, por lo que se construye una presa o un vertedor libre de poca altura, acondicionando un canal superficial o túnel de conducción.

El trazo del canal se procura hacerlo siguiendo la línea topográfica que existe en la zona de la boquilla con rumbo aguas abajo sobre la ladera del río. Su diseño dependerá del criterio del ingeniero proyectista.

El sitio donde se ubica el tanque de carga y por ende, el canal o túnel de conducción será aquel que esté lo mas cerca posible a la ladera del río, sobre el trazo de la conducción, buscando el mayor desnivel posible entre este punto y la ribera del río.

El sitio donde es viable ubicar la casa de maquinas será aquel lo más cercano a la comunidad a donde se hará el abastecimiento del agua, contando para ello, con una planta de tratamiento, bombas o en su defecto, un sistema que trabaje por gravedad.

Obtención de las áreas de cuencas.

Las áreas de cuencas o de escurrimiento representan la potencialidad de la captación de agua hasta el sitio de la boquilla. Se comienza por trazar el "parteaguas" de la cuenca por aprovechar. Este parteaguas lo define la topografía circundante al sitio de la boquilla. El área interior del parteaguas define el área de la cuenca y se mide en kilómetros cuadrados.

Estaciones hidrométricas

Las estaciones hidrométricas son de gran utilidad ya que en ellas se registran periódicamente el gasto que llevan los principales ríos de cualquier región de la República Mexicana.

Esquema general de los sistemas de aprovechamiento.

En general, los proyectos hidráulicos se integran con los siguientes elementos:

- Obra de captación
- Canal y/o tunel de conducción
- Tanque de carga
- Tubería a presión
- Planta de tratamiento
- Sistema de distribución

Obra de captación: Para el diseño hidráulico de estas estructuras se basa en el criterio de que sean competentes para dejar pasar cuando menos la avenida de diseño.

Canal y/o tunel de conducción: Deben tener la capacidad de conducir el gasto medio anual. Los túneles permiten reducir la longitud de desarrollo de los canales de conducción.

Tanque de carga: El volumen de agua en el tanque de carga servirá para amortiguar las ondas de presión (golpe de ariete), causadas por el cierre brusco de válvulas, paro de bombas o por la falta de electricidad y así restablecer rápidamente la estabilidad.

Tubería a presión: Su función es conducir el agua desde el tanque de carga hasta el sistema de distribución, el cual esta compuesto por una casa maquinas o por sistemas de abastecimiento tipo gravedad.

ANEXO B

Breve Explicación Del Golpe De Ariete

El paro accidental de una planta de bombeo atraviesa por varias fases; en la primera (Fig.I.I), el acueducto presenta problemas de depresión: (a) antes del paro, (b) $8 \delta t$ (incremento de tiempo), después del paro, siendo $\delta t = T / 20$, donde $T = 2 l/a$ (donde l = longitud de tubería; a = celeridad), y (c) $10 \delta t$ después del paro, cuando la onda llega al tanque de descarga.

- 1) Paro accidental de una planta de bombeo
(desde $t > 2l/a$ a $t < 3l/a$)

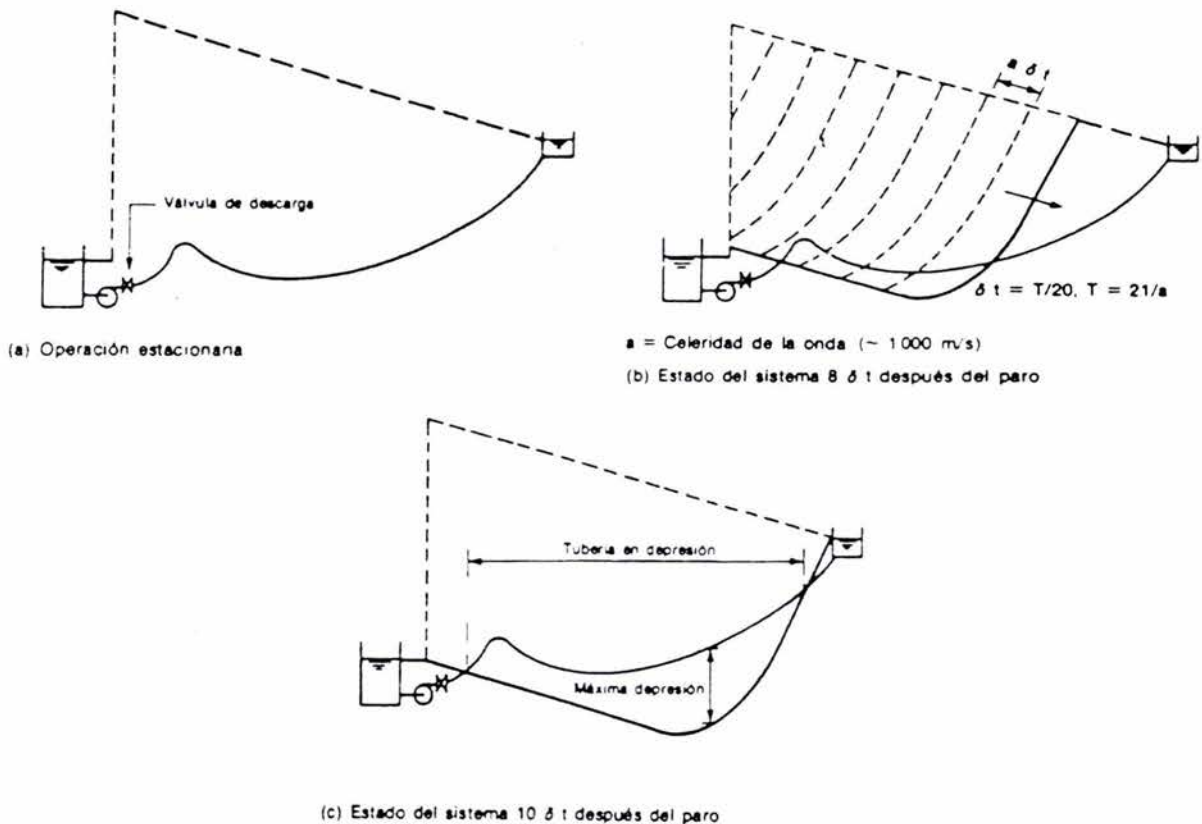


Fig I.I Primera fase del fenómeno de golpe de ariete

(Fuente: *Transitorios hidráulicos en conductos a presión*; Rafael Carmona P.; Ins. de Ing., UNAM)

La segunda fase del fenómeno se inicia con la reflexión de la onda opuesta en el tanque de descarga (Fig I.II.a). La onda de sobrepresión resultante produce en la instalación una situación muy similar a la de partida (Fig I.II.b), mientras que llega a la válvula de descarga; si ésta se encuentra abierta, el proceso de reflexión es complejo y puede afectar negativamente la sobrevelocidad inversa que se produce en la maquina si dicha válvula cierra con lentitud.

ANEXO B

2) Paro accidental de una planta de bombeo. Fase desde
 $t > 2l/a$ at $< 3l/a$

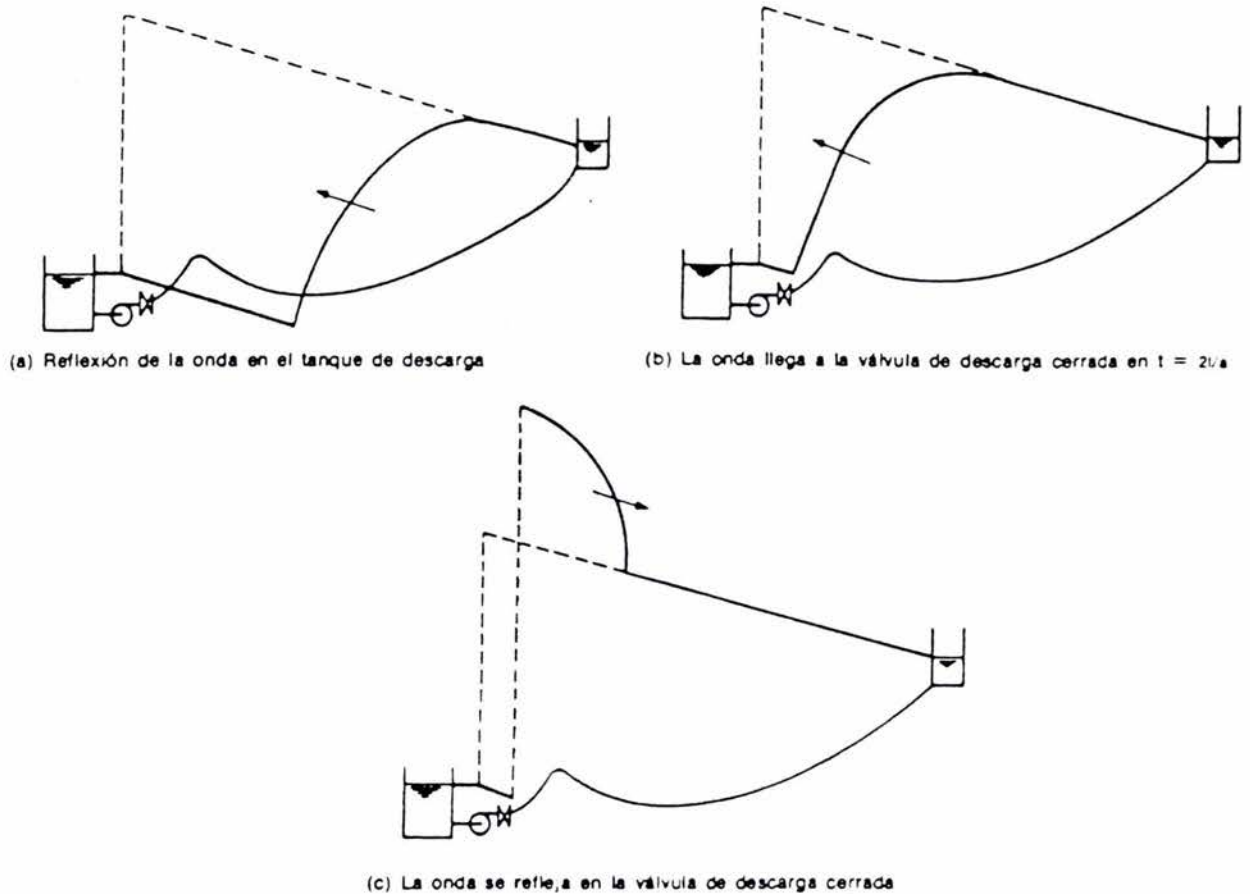


Fig I.II Segunda fase del fenómeno de golpe de ariete

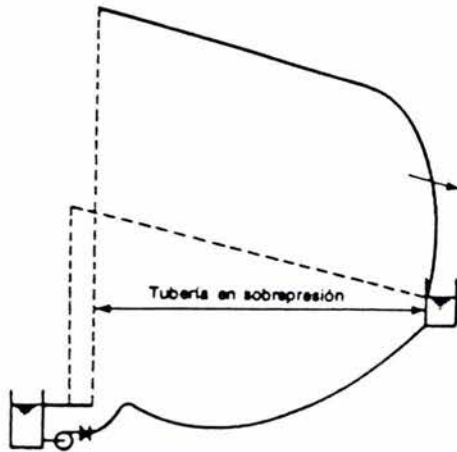
(Fuente: *Transitorios hidráulicos en conductos a presión*; Rafael Carmona P.; Ins. de Ing. UNAM)

Pero si por el contrario, la válvula está cerrada, se produce una reflexión de la misma onda y hay sobrepresión (Fig I.II.c), lo que ocasiona que en la fase siguiente se propague esta onda de sobrepresión a lo largo de la tubería (Fig I.III.a) y se refleje en el tanque de descarga como una onda de depresión de igual magnitud (Fig I.III.b). Cuando llega a la válvula de descarga cerrada se refleja como una onda de depresión y se reinicia el ciclo que comenzó con el paro de la bomba.

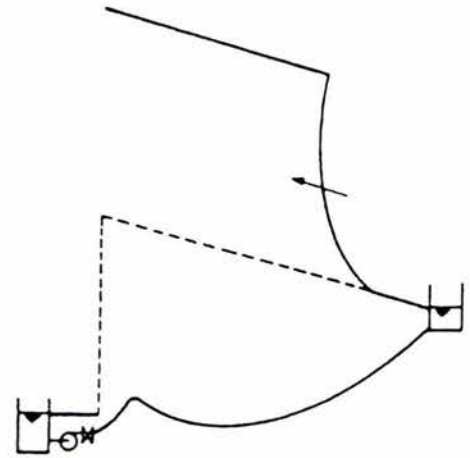
ANEXO B

Paro accidental de una planta de bombeo

3) (desde $t = 3l/a$ a $3l/a < t < 4l/a$)



(a) La onda de sobrepresión llega al tanque de descarga $t = 3l/a$



(b) La onda de depresión se refleja en el tanque de descarga

Fig 2.7 Tercera fase del fenómeno de golpe de ariete

(Fuente: *Transitorios hidráulicos en conductos a presión*; Rafael Carmona P.; Ins. de Ing., UNAM)

Por lo anterior, se determina que la tubería está sometida a las siguientes fases durante el ciclo de $4l/a$ de duración, siempre que la válvula de descarga cierre en un tiempo menor que $2l/a$:

Fase	Condición
Primera	Depresión
Segunda	Presión de trabajo
Tercera	Sobrepresión
Cuarta	Presión de trabajo

(Fuente: *Transitorios hidráulicos en conductos a presión*; Rafael Carmona P.; Ins. de Ing., UNAM)

ANEXO C

Vertedores de Excedencias

1. *Vertedores De Caída Libre.* Esta asociado a cortinas de acero, o de contrafuertes, donde el espesor de concreto y la geometría general no sean favorables para guiar la vena líquida desde la cresta hasta la parte inferior.
2. *Cortinas Vertedoras Con Caída Rápida:* Se localizan en una sección reducida de una cortina tipo gravedad, sobre la cual se permite el paso de flujo de agua.
3. *Vertedor Con Tiro Vertical:* Tienen una entrada en embudo que conecta a un túnel, en cuyo extremo pueda existir un deflector o una estructura disipadora de energía. Se adaptan a presas con vaso de almacenamiento encañonado, con gastos pequeños y en donde el agua fluya a través de ellos libre de objetos que puedan obstruirla.
4. *Vertedores Con Carga Directa A Canal:* Se localizan en laderas o en sitios apropiados, siempre sobre el terreno natural.
5. *Vertedor De Canal Lateral:* Tienen la particularidad de que el eje del canal de descarga es paralelo o casi paralelo al eje de la sección vertedora, la cual a su vez, es paralela o casi paralela al eje de la corriente. El análisis hidráulico se basa en la suposición de que toda la energía del agua que pasa por el vertedor se disipa en turbulencias, y la pendiente en el canal lateral o canal colector, debe ser suficiente para acelerar el agua en dirección del flujo en el canal de descarga.

ANEXO
FOTOGRAFICO

ANEXO FOTOGRAFICO

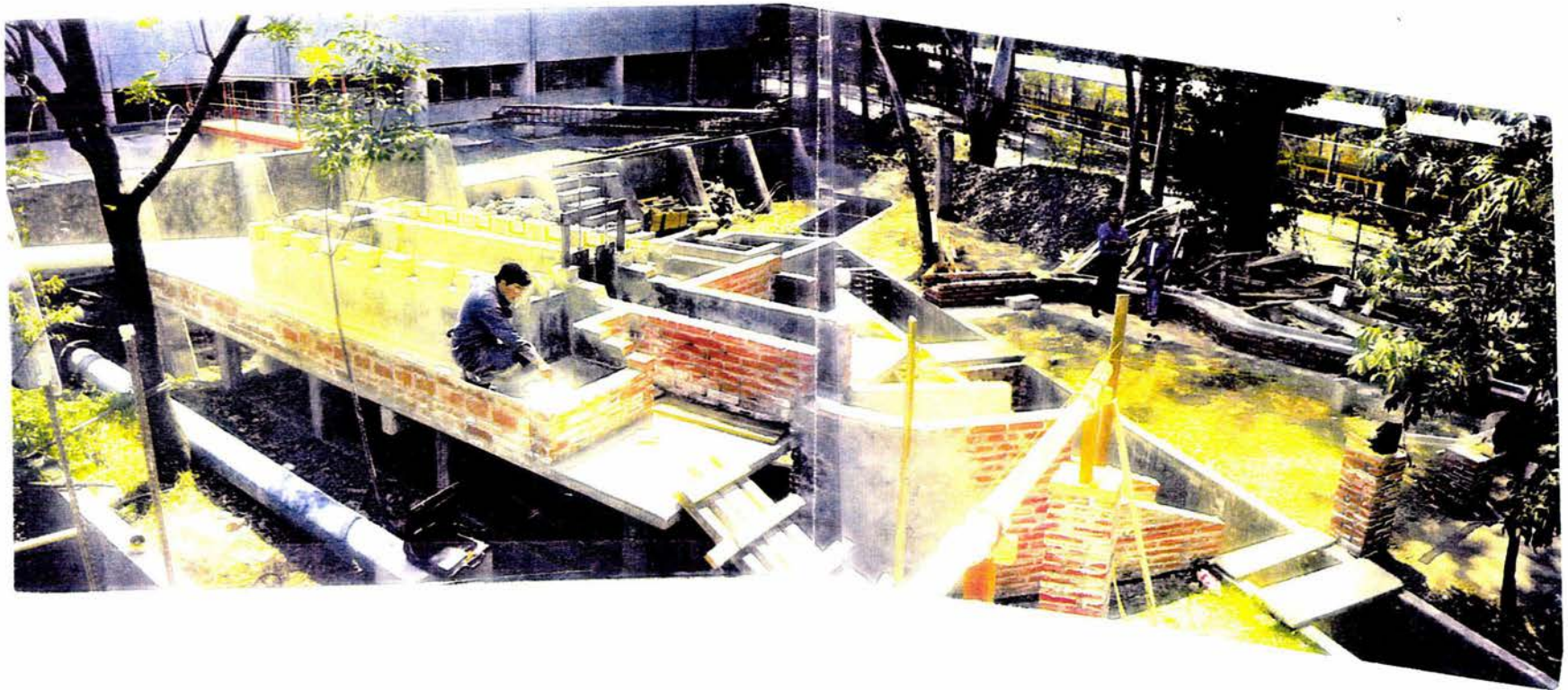


FOTO 1. Vista panorámica del modelo (en primer plano el tanque de aguas claras y el canal de excedencias) antes de su funcionamiento



FOTO 2. Vista del canal alimentador del modelo

ANEXO FOTOGRAFICO



FOTO 3. Puesta en funcionamiento del modelo, utilizando las 2 cámaras y con una descarga de $24 \text{ m}^3/\text{s}$ (17 l/s)

ANEXO FOTOGRAFICO



FOTO 4. Detalle de la tubería alimentadora del modelo



FOTO 5. Acercamiento de la caja de amortiguación a la entrada del tanque de aguas claras



FOTO 6. Vista panorámica del tanque y del funcionamiento de canal perimetral

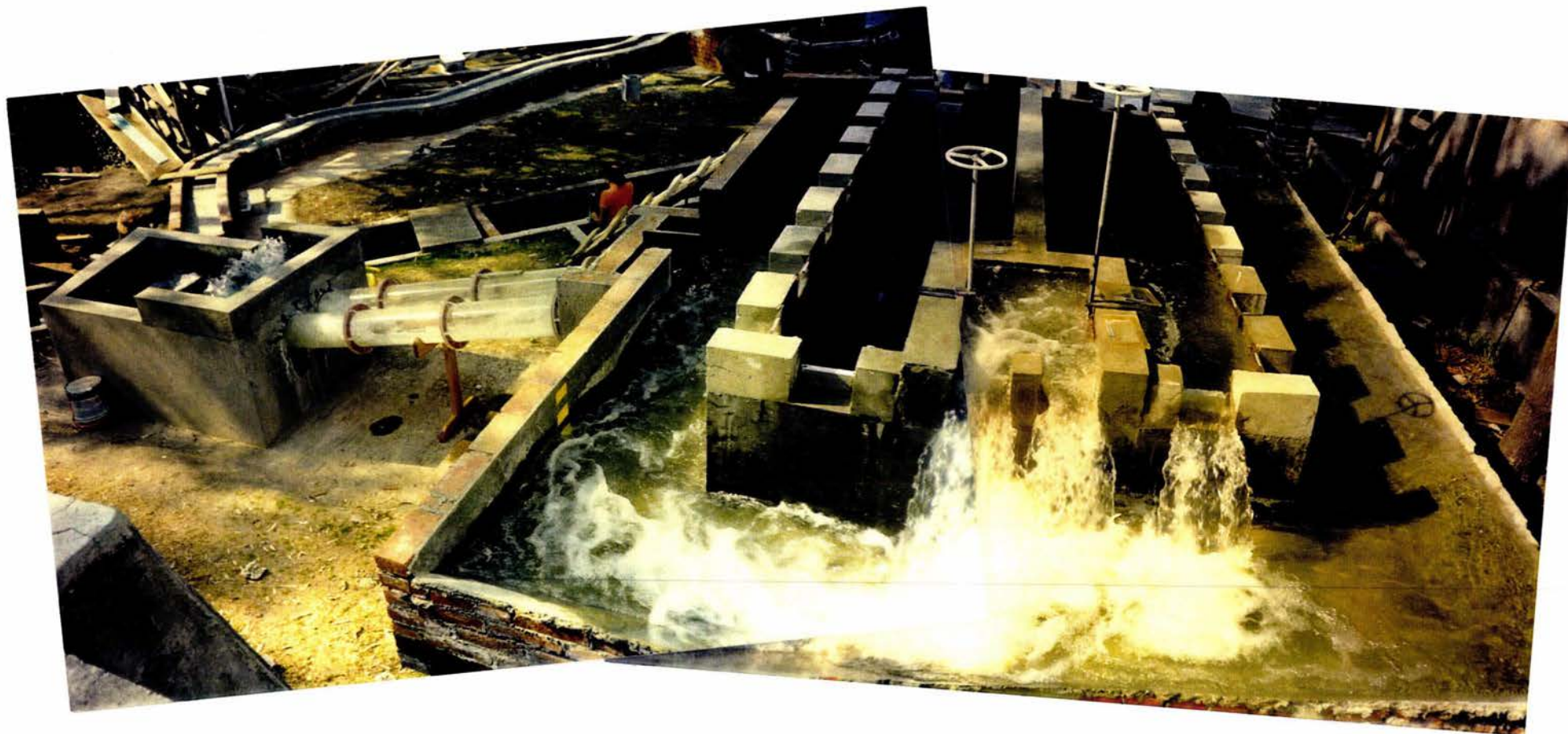


FOTO 7. Funcionamiento de una sola cámara, la cual se encuentra alejada a la caja de captación y tuberías de desalojo

ANEXO FOTOGRAFICO



FOTO 8. Funcionamiento de una sola cámara, la cual se encuentra cercana a la caja de captación y tuberías de desalojo



FOTO 9. Detalle de las compuertas que sirvieron para desalojar el agua almacenada en las cámaras.

ANEXO FOTOGRAFICO



FOTO 11. Detalle del funcionamiento de la caja de captación, que sirve para desalojar el agua del canal de excedencia



FOTO 12. Vista lateral del tanque de amortiguamiento, aguas abajo del tanque de aguas claras y que conduce el agua hacia el Río Salitre

ANEXO FOTOGRAFICO

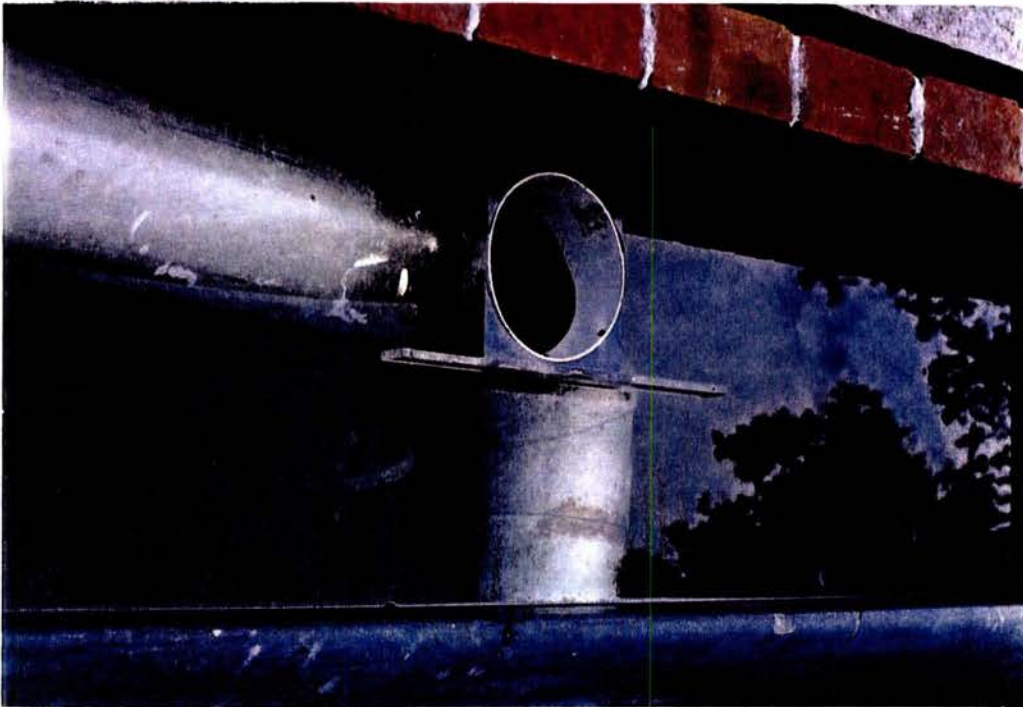


FOTO 13. Detalle de la propuesta de hacer una toma de aire a la tubería de llegada al tanque de aguas claras y contruir un cimacio para que el flujo se apaciguara



FOTO 14. Funcionamiento de la descarga propuesta junto con el cimacio (nótese que el tanque de aguas claras ya no se encuentra sometido a la presión de llegada del flujo)

ANEXO FOTOGRAFICO

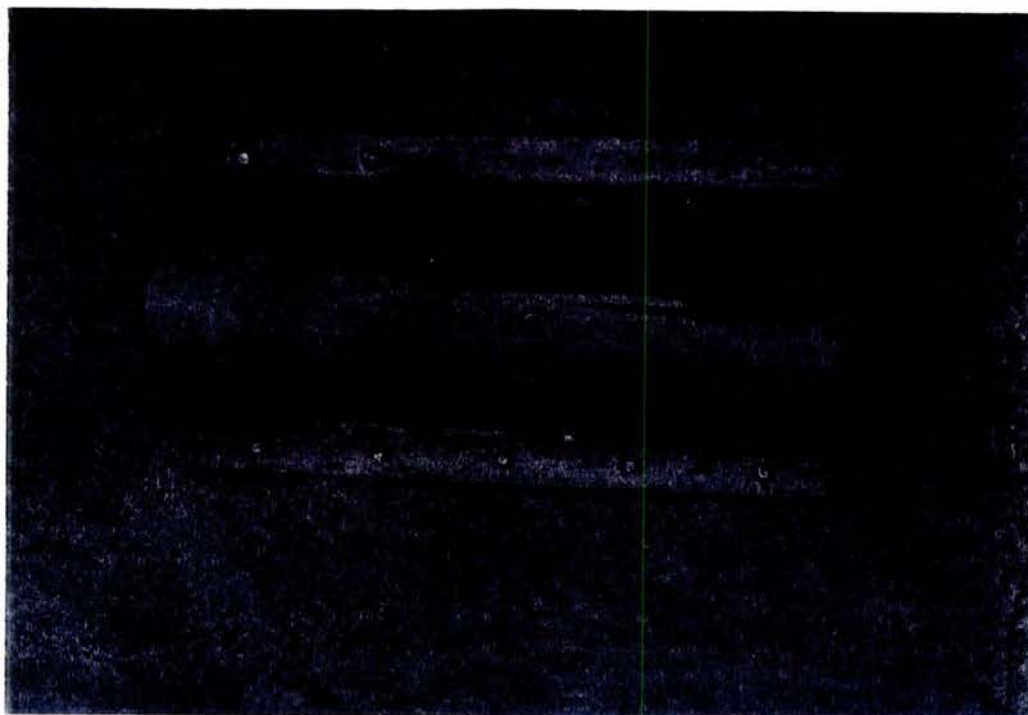


FOTO 15. Elemento que sirvió como amortiguador de flujo a la toma propuesta



FOTO 16. Funcionamiento de la propuesta con el elemento disipador propuesto

BIBLIOGRAFIA

1 Revista de ingeniería Hidráulica Mexicana

Voll II. ORTIZ Rendon Gustavo

1997

2 Revista SEMARNAP, CNA

Sistema Cutzamala

1997.

3 Hidráulica General

SOTELO, Prieto Gilberto

Edit. Limusa

1998

4 Modelos Hidráulicos

ECHAVEZ, Aldape Gabriel

Asociación Mexicana de Hidráulica

CONACYT

UNAM

1996

5 Obras Hidráulicas

TORRES, Herrera Francisco

Edit. Limusa

1987.

REFERENCIAS

1. Apuntes de Hidráulica II

Sotelo, Gilberto

Edit. Trillas

- a) *Tabla 2.5. Elementos Geométricos en canales de sección circular*
- b) *Fig. 3.10 Gráfica para obtener el tirante crítico*
- c) *Tabla 2.4 Fractor de fricción de Manning*

2. Apuntes de Hidráulica básica

Sotelo, Gilberto

Edit. Trillas.

- a) *Resalto hidráulico y su uso como disipador de energía. Vertedor de caída recta*

3. Hidráulica de Canales

Chow, Ven Te

Edit.

- a) *Fig 7.22. Ecuación de vertedores oblicuos*
- b) *Tabla 7.8. Valores del coeficiente a en la fórmula de Aichel para vertedores oblicuos*
- c) *Tabla 7.1. Formulas experimentales para determinar el coeficiente de gasto μ*
- d) *Capítulo 6*
- e) *Fig 6.4. Variación de los coeficientes de velocidad, contracción y gasto con el número de Reynolds en un orificio circular.*
- f) *Subcapítulo 6.5 Orificios con contracción incompleta*

4. TESIS: "Estudio experimental de un nuevo criterio para el diseño de vertedores de canal lateral"

Sanchez Cruz, Fidel

Instituto de Ingeniería

Facultad de Ingeniería

UNAM

2000

5. Apuntes de Hidráulica II

Cap 8. "Diseño hidráulico de estructuras"

Gilberto Soletlo Avila

Facultad de Ingeniería.