



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**”DISEÑO HIDRÁULICO DEL DESAGÜE DE FONDO
DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

MARCOS MARTÍNEZ CARMELO

**DIRECTOR: DR. HUMBERTO JUAN FRANCISCO
MARENGO MOGOLLÓN**



FES Aragón

MÉXICO, 2014



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.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres Eleuterio y Rosa, así como hermanos Josefina, María de los Ángeles, Francisco, Guadalupe, Juan Manuel y sobrinos Christian, Uriel, José de Jesús, Isabela, Brenda, Inna Amaia, Victoria y Gerardo; también a Juan, Patricia, Perla Roxana, Jorge y Lucero que forman parte de la familia. Sin su ayuda, entrega, apoyo y motivación, nunca hubiera terminado la carrera y la tesis.

Dedico este trabajo a mis amigos y colegas, que han ido formando parte de mi vida personal, formación académica hasta el término de la carrera. Con mucho cariño a todos.

AGRADECIMIENTO

Tantas personas contribuyeron de una u otra manera a crear y producir esta tesis, que sería un detalle, dar los nombres de todos. Sin embargo, en forma personal agradezco debidamente la ayuda de todos, aunque no se mencionen sus nombres explícitamente.

Principalmente agradezco a mi asesor, Dr. Humberto Juan Francisco Marengo Mogollón, su ayuda fue muy importante para la realización y término de este trabajo. Gracias Doctor por su noble esfuerzo, dedicación y compromiso.

Agradezco de manera especial al Mtro. Ignacio Romero Castro por la ayuda brindada en el apoyo de orientación, sugerencias y facilitar la información para el término de esta tesis.

También a la Comisión Federal de Electricidad (CFE), así como su personal por brindarme su apoyo: Ing. Julio César Remedo García, Ing. Elizabeth González S., Ing. Jesús Guzmán y a todos aquellos que de forma indirecta ayudaron.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por darme una oportunidad, así como la beca otorgada durante el tiempo de mi carrera y la realización de mi tesis.

Agradezco a todos los profesores que de otra manera contribuyeron a lo largo de mis estudios en mi formación personal y profesional. Gracias.

Agradezco al jurado por brindarme su apoyo para mejorar este proyecto mediante su conocimiento en la materia, integrado por el Dr. Humberto Juan Francisco Marengo Mogollón, Dr. Daniel Velázquez Vázquez, Ing. Maridel Zárate Morales, M. en I. Gerardo Toxky López y M. en C. Luis Pomposo Viguera Muñoz.

Agradezco de forma personal por la asesoría y apoyo a la Dra. en P. H. Karla Ericka Vera Sanjuan y Lic. Elizabeth Vera García.

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
JUSTIFICACIÓN	6
OBJETIVOS	7
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES	8
1.1 Propósito, origen y evolución de los desagües de fondo	9
1.2 Tipos de desagües	12
1.3 Descripción de las estructuras que integran el desagüe de fondo	14
1.4 Aspectos con y sin desagüe de fondo	15
CAPÍTULO II: ALTERNATIVAS Y ARREGLOS PROPUESTOS DEL DESAGÜE DE FONDO: PROYECTO HIDROELÉCTRICO “LA YESCA”	23
2.1 Descripción del P.H. “La Yesca”	24
2.2 Desagüe de fondo	25
2.3 Elementos que conforman el desagüe de fondo	28
2.4 Opciones estudiadas y solución	29
CAPÍTULO III: ASPECTOS DEL DISEÑO HIDRÁULICO	33
3.1 Generalidades	34
3.2 Capacidad de descarga	43
3.3 Análisis numérico	46
CAPÍTULO IV: MODELO FÍSICO	55
4.1 Conocimientos teóricos en modelos físicos	56
4.2 Modelo físico del desagüe de fondo del P.H. “La Yesca”	58
4.3 Análisis de resultados	64
CAPÍTULO V: MODELOS NUMÉRICOS	67
5.1 Generalidades teóricas de modelos numéricos	68
5.2 Solución con Flow-3D	70
5.3 Solución con ANSYS	77
5.4 Análisis de resultados	85
CONCLUSIONES	87
Conclusiones	88
BIBLIOGRAFÍA	91
Páginas y/o Documentos electrónicos	93
ANEXOS	96
Anexo No. 1 Glosario	97
Anexo No. 2 Abreviaturas	101
Anexo No. 3 Procedimiento constructivo del desagüe de fondo del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”	102

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura No. 1 Desagüe de fondo del P.H. Zimapán.....	12
Figura No. 2 Tipo y ubicación de los desagües.....	13
Figura No. 3 Partes que integran la obra de descarga.....	15
Figura No. 4 Desagüe de fondo con un dique de cola	18
Figura No. 5 Sin o anulado el desagües de fondo.....	18
Figura No. 6 Desagüe de fondo izquierda original y derecha renovado.....	20
Figura No. 7 Desagüe de fondo de la Presa Iznájar.....	21
Figura No. 8 Desagüe de fondo de la presa Jarosa	22
Figura No. 9 Perfil de los proyectos hidroenergéticos sobre el río Santiago	24
Figura No. 10 Ubicación del P.H. “La Yesca”	24
Figura No. 11 Perfil del desagüe de fondo del P.H. “La Yesca”	26
Figura No. 12 Elementos que integran al desagüe de fondo “La Yesca”	28
Figura No. 13 Alternativas uno y dos para el desagüe de fondo.....	30
Figura No. 14 Alternativa tres y cuatro para el desagüe de fondo.....	31
Figura No. 15 Alternativa quinto y sexto para el desagüe de fondo	31
Figura No. 16 Alternativa séptima y octava para el desagüe de fondo.....	32
Figura No. 17 Energía total a través de una sección de tubería.....	34
Figura No. 18 Ecuación de la energía en una tubería.....	36
Figura No. 19 Coeficiente de pérdida por entrada en diferentes geometrías	38
Figura No. 20 Coeficiente C_f y la relación de s/b para la fórmula de Kirschmer....	39
Figura No. 21 Coeficiente por cambio de dirección de Hoffman y Wasieliewski ...	40
Figura No. 22 Bifurcaciones simétricas	42
Figura No. 23 Conducto sencillo	44
Figura No. 24 Distribución del desagüe de fondo.....	48
Figura No. 25 Diagrama del desagüe de fondo.....	48
Figura No. 26 Modelo físico del desagüe de fondo “La Yesca”	59
Figura No. 27 Partes del modelo del desagüe de fondo	60
Figura No. 28 Equipo de medición y registro del modelo físico.....	61
Figura No. 29 Válvulas de chorro divergente de 30° izquierda y 45° derecha.....	61
Figura No. 30 Funcionamiento hidráulico de la alternativa seis	63

Figura No. 31 Modelo físico de la descarga terminal del desagüe	64
Figura No. 32 Desagüe de fondo del P.H. Dasu, Pakistán.....	65
Figura No. 33 Desagüe de fondo del P.H Kárahnjúkar, Islandia	66
Figura No. 34 Bifurcación del desagüe de fondo en AutoCAD.....	72
Figura No. 35 Cono obturador en AutoCAD	72
Figura No. 36 La alternativa uno en vista en planta, Flow-3D.....	75
Figura No. 37 Válvula de chorro y cámara disipadora de energía en ANSYS.....	79
Figura No. 38 Desagüe de fondo de la malla y frontera en ANSYS	79
Figura No. 39 El comportamiento del desagüe de fondo en ANSYS	80
Figura No. 40 Comportamiento de la válvula y cámara en ANSYS.....	80
Figura No. 41 Condiciones frontera en ANSYS.....	82
Figura No. 42 La deformación de la válvula de chorro en ANSYS	83
Figura No. 43 El esfuerzo de la válvula en ANSYS	83
Figura No. 44 El esfuerzo y deformación en el soporte del servomotor	83
Figura No. 45 Elementos y detalle de la válvula de mariposa.....	99
Figura No. 46 Elementos y detalle de la válvula de chorro hueco.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1 Coeficiente de pérdida para válvula de mariposa	41
Tabla No. 2 Coeficiente de pérdida para las bifurcaciones tipos 1 y 2	43
Tabla No. 3 Coeficiente de pérdida para las bifurcaciones tipos 3 y 4	43
Tabla No. 4 Resumen de diámetros, longitudes y coeficientes	47
Tabla No. 5 Resumen de velocidad y pérdida, sin válvula de chorro	50
Tabla No. 6 Pérdidas por accesorios	50
Tabla No. 7 Gastos por válvula, total y velocidad con válvula de chorro.....	52
Tabla No. 8 Pérdidas considerando las válvulas de chorro divergente	52
Tabla No. 9 Resultados del gasto de elevación 442.00 a 518.00 msnm.....	53
Tabla No. 10 Valores de escalas del modelo físico del desagüe de fondo	59
Tabla No. 11 Coeficientes para diferentes aperturas de las válvulas.....	62
Tabla No. 12 Datos de entrada para la simulación para Flow-3D	71
Tabla No. 13 Geometría de la cámara disipadora en AutoCAD	71
Tabla No. 14 La zona de bifurcación-válvula-cámara del desagüe	72
Tabla No. 15 La geometría de zona de transición en AutoCAD	73
Tabla No. 16 Vista perfil en Flow-3D	74
Tabla No. 17 Vista isométrica en Flow-3D	76
Tabla No. 18 Vista de detalles en Flow-3D	77
Tabla No. 19 Datos de entrada para la simulación en ANSYS.....	78
Tabla No. 20 Comparación de distribución de presiones en ANSYS	81

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica No. 1 Curva de gasto-descarga mediante las válvulas	53
Gráfica No. 2 Curva de llenado y vaciado del desagüe.....	54
Gráfica No. 3 Gráfica de Elevación-Descarga-%Apertura- μ	84

RESUMEN

Uno de los temas medulares que interesa al ingeniero civil es el estudio y comportamiento del agua en estructuras de lo cual se encarga la hidráulica como parte de la mecánica de fluidos; analizando las leyes que rigen el movimiento de los líquidos y las técnicas para el mejor aprovechamiento de las aguas; además con cálculo matemático y diseño de modelos usando la experimentación, permite determinar las mejores características geométricas definitivas que deben de tener las obras hidráulicas y relacionadas entre ellas.

Por esa razón, el presente trabajo de investigación se da a la tarea de describir las consideraciones generales, diseño hidráulico y la problemática de operación y mantenimiento del desagüe de fondo del Proyecto Hidroeléctrico (P.H.) "La Yesca", localizada sobre el río Santiago, entre los límites de los estados de Jalisco y Nayarit. Para ello se describe los aspectos que originaron su diseño, proyecto y construcción como una medida de seguridad de las estructuras de la presa ante una eventual emergencia de falla, o ante la necesidad de un vaciado controlado; para lo cual se realizó un análisis teórico-práctico del desagüe de fondo sobre el modelo físico y numérico haciendo una modelación virtual para conocer los principales aspectos a considerar en el diseño, construcción, operación y mantenimiento.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se basa en una obra de suma importancia para la seguridad del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”. Por su diseño, ubicación y función, se refiere al desagüe de fondo, que tiene como finalidad el vaciado del embalse en caso de emergencia durante el primer llenado y control de la salida del agua cuando este en operación. El diseño y construcción del desagüe se consideró por la magnitud de la presa (Comisión Internacional de Grandes Presas, ICOLD por las siglas en inglés), y la presencia de fallas geológicas en el sitio, que pudieran poner en riesgo la estabilidad de las laderas.

Por otro lado, podemos decir que “La Yesca” cuenta con estructuras seguras, construidas para un buen desempeño operativo, para reducir al máximo la probabilidad de falla. Sin embargo, pese a todas las precauciones estructurales adoptadas en las distintas fases de la vida de una presa, siempre existe un riesgo, por mínimo que sea, de falla o mal funcionamiento.

Por ello, esta investigación presenta resultados de diseño hidráulico mediante el análisis numérico, modelo físico y numérico de la obra, donde cada estudio se adecuó para observar el comportamiento del agua en la estructura, y ayudar a diseñar una estructura funcional durante la vida útil de la presa.

El objetivo general de esta tesis es describir y analizar el diseño hidráulico del desagüe de fondo del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca” mediante el estudio hidráulico, para después comparar los resultados que garanticen una operación eficiente y segura de la obra; utilizando modelos: físicos y simulaciones numéricas (Flow-3D y ANSYS).

Para lo cual se estructuró el desarrollo del trabajo en cinco capítulos:

En el primer capítulo se presenta una visión general de los desagües de fondo desde su propósito, origen, tipos y ventajas; la descripción de los elementos que lo componen; los problemas con y sin desagüe de fondo. En el segundo capítulo se describen las alternativas estudiadas para el desagüe de fondo; así como los elementos que lo integran y la alternativa definitiva adoptada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). El tercer capítulo, en su primer apartado trata de las generalidades de los conceptos básicos de la hidráulica. La segunda parte, se trata de la capacidad de carga, para lo cual se despliega y se explica en forma teórica como se consideró en el diseño del desagüe. Y el último apartado sobre análisis numérico está dedicado a la aplicación de los conceptos básicos en el análisis hidráulico del desagüe de fondo. En el cuarto capítulo, se tratan los aspectos generales de modelos hidráulicos; describiendo el modelo físico del desagüe de fondo del P.H. “La Yesca”; presentando algunos resultados; consideraciones para su diseño y construcción, modificaciones en los ensayos y en específico los de la alternativa seleccionada. El quinto capítulo, en términos generales se establece el uso de herramientas computacionales para la

simulación numérica del desagüe; presentándose el modelado mediante Flow-3D y ANSYS, donde se puede observar los datos en forma ilustrativa el funcionamiento de la descarga. Asimismo, se presenta un análisis cualitativo de los resultados de la resolución del proyecto de estudio.

Por último, se hacen unas consideraciones generales, recomendaciones personales y profesionales, a modo de conclusión todo ello con el objeto de identificar debilidades y corregirlas.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el transcurso de los últimos años, se ha buscado mejorar la seguridad de las presas, por algunas fallas que han ocurrido en ellas alrededor del mundo. Una de las soluciones que se han aplicado son los desagües de fondo que pueden integrarse en la estructura en caso de no contar con esta obra; para presas que cuentan con un solo desagüe de fondo se puede implementar otro indicado por la normatividad.

Entre las funciones del desagüe de fondo se encuentran: el lavado de sedimentos del embalse; prever la demanda de riego en los casos en que una Hidroeléctrica está fuera de servicio y control del embalse cuando está por debajo del nivel del vertedero; control del embalse por desbordamiento de la cortina durante las precipitaciones extremas; control durante el primer llenado del embalse; y aumento de la capacidad de los túneles de desvío durante la construcción de la presa (Malik y Munir, 2011).

Por ello, en este trabajo se describe la finalidad, ubicación, partes que lo integran, material que se utilizó (modelos y prototipo), alternativas y la propuesta elegida del desagüe de fondo del P.H. "La Yesca".

Al respecto el Proyecto Hidroeléctrico "La Yesca" se ubica en los estados de Jalisco y Nayarit; este proyecto presenta un problema de deslizamiento en la margen izquierda debido a la presencia de una falla geológica (un bloque inestable), lo que obligó a un giro de 14° de la cortina aguas abajo solo en ese sitio. Esa situación dio origen el diseño del desagüe de fondo con el propósito de controlar el vaciado del embalse y durante el primer llenado.

Sin embargo, la falla de una presa puede ser rápida o lenta, todo depende del tipo de material construido, asimismo se torna catastrófico en la parte de aguas abajo y las pérdidas por los beneficios que se tienen como la electricidad, riego, el turismo, etc.

Las causas probables de un mal funcionamiento de las estructuras es tener información incompleta o errónea durante los estudios previos y estos pasarlos por alto hasta la construcción. Hay registros de presas mexicanas que han sufrido fallas por causas de "desbordamiento, flujo de agua, deslizamientos, fugas en conductos enterrados, erosión de túneles y otras causas como licuación, desalineamiento del talud y grietas" (Marengo, 2002). También, deben cuidarse aspectos como la socavación de los túneles, desgaste de los equipos (abrasión por materiales) y deterioro en la zona de la descarga.

Ante los efectos de la falla de una presa se tiene como solución inmediata la disposición de un sistema de seguridad fundamental, entre los que se incluyen las descargas de fondo como elemento preciso por donde se puede vaciar con

un procedimiento controlado en casos de emergencia. También, se deben considerar los costos de mantenimiento y operación; no debe dejarse al abandono la obra una vez construida.

Cabe mencionar que de acuerdo al país en que se quiera instrumentar estas mejoras, se tendrán distintas instituciones involucradas y normas, propias para el desagüe de fondo. España por ejemplo tiene su propia normatividad, debido a la importancia de la obra. En México, la normatividad vigente de la Comisión Nacional del Agua (CNA) se da a través de manuales para capacitación en seguridad de presas y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene especificaciones referentes a los desagües de fondo.

En la actualidad, es necesario tener normas obligatorias y sancionadoras para las presas de gran magnitud, en la adaptación y rehabilitación, incluyendo las soluciones del desagüe de fondo. Para ello, al inicio del diseño de esta obra los estudios deben de analizarse con la ayuda de modelos físicos y numéricos, con el apoyo de los modelos, y también debe observarse el comportamiento del agua sobre la estructura de la descarga de fondo.

De lo anterior, surge la pregunta de investigación sobre el P.H. "La Yesca": ¿Es eficiente y seguro el desagüe de fondo con la alternativa y arreglo propuesto en regulación y prevención de una falla potencial? Para obtener la respuesta correcta se hace un análisis teórico y experimental tomando en cuenta el diseño hidráulico: modelo físico y numérico.

JUSTIFICACIÓN

La seguridad de las presas es de suma importancia, por ello requiere de un trabajo en conjunto entre los ingenieros y todo el personal de las diferentes áreas. Por esa razón, es necesario desarrollar, y actualizar continuamente normas y reglamentos; para asegurar la seguridad de todo el personal laboral, así como toda la estructura de la presa. Al no considerar la seguridad y pasar por alto la normatividad, las consecuencias de una falla o un incidente dentro de la presa, puede ser un acontecimiento que causaría daños irremediables.

Los desagües son obras auxiliares que forman parte de la seguridad de una presa, sus funciones son diversas, por ejemplo, el control o vaciado de la salida del agua almacenada en el embalse en caso de una fractura durante su construcción u operación; localizada a diferentes elevaciones. El desagüe de fondo es una abertura sobre la presa, se encuentra en los puntos más bajos cercas de la cimentación y su función es controlar las descargas.

En general el desagüe de fondo “La Yesca” es un conducto situado a un nivel bajo formado principalmente por una bocatoma y rejilla en la entrada, conducción y zona de control (con válvulas); túnel de descarga y estructura terminal (comprende de un canal a cielo abierto y deflectores en la salida con el propósito de disipar la energía en el contacto con la atmósfera).

Asimismo, es importante analizar desde el punto de vista hidráulico, estructural y electromecánico, todas las partes que la conforman a fin de garantizar su integridad estructural y su operatividad, ya que es frecuente, encontrarse con presas que después de unas décadas de vida han perdido los desagües de fondo, incluso algunas hasta las toma de agua. Debido a que su explotación, por el incremento de los costos o por la disminución de beneficios, no sea ya rentable (CNEGP, 1997).

Por esa razón, podemos asegurar que esta investigación puede ayudar al diseño y construcción de los desagües de fondo, y establecer la importancia que tiene el contar con normas y especificaciones para este tipo de obra; incluyendo el mantenimiento continuo. Para el buen funcionamiento de todas las estructuras; es decir, si la obra es monitoreada constantemente, se mantendrá en buenas condiciones y cumplirá sus objetivos.

OBJETIVOS

Objetivo general

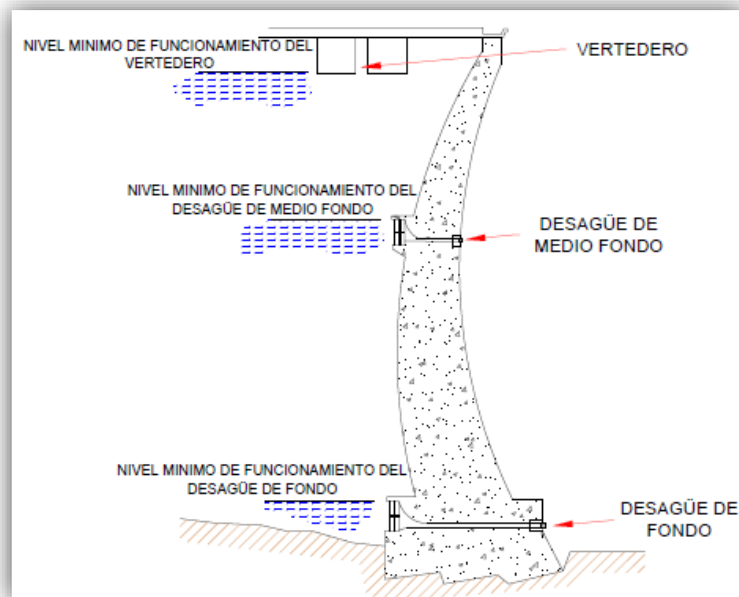
Describir y analizar el diseño hidráulico del desagüe de fondo del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca” mediante el estudio hidráulico, para después comparar los resultados que garanticen una operación eficiente y segura de la obra; utilizando modelos: físicos y simulaciones numéricos (Flow-3D y ANSYS).

Objetivos específicos

- ❖ Investigar la importancia y finalidad de los desagües de fondo.
- ❖ Describir la diferencia de los tipos de desagües.
- ❖ Describir las alternativas y arreglos del desagüe de fondo analizado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para el P.H. “La Yesca”.
- ❖ Analizar el diseño hidráulico, del arreglo definitivo.
- ❖ Comparar los resultados del arreglo final con los obtenidos en los modelos: Físico (Laboratorio de Hidráulica CFE, Cuernavaca Morelos) y Numérico (Flow-3d y ANSYS).

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES



CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

1.1 Propósito, origen y evolución de los desagües de fondo

Los desagües de fondo son obras auxiliares con propósito de funcionar como dispositivos de emergencia de las presas preparados en cualquier momento para desalojos controlados del agua embalsada en caso de producirse dificultades como “daños en el muro de presa ocasionados por movimientos sísmicos u otras causas, o en caso de previsión de avenidas, con embalses en sus niveles máximos y particularmente con presas de vertederos con descarga, estableciendo desembalses previamente programados, para dejar el suficiente hueco que permita laminar la avenida sin crear situaciones críticas aguas abajo cuando esta se produzca” (González, 2008).

El origen del desagüe de fondo fue para el control del nivel del embalse de la parte más baja, así como también evitar problemas de algún tipo de falla y dar mantenimiento a la presa. Las consecuencias de una falla son “daños físicos a la estructura de la cortina y a estructuras adicionales, tales como obra de excedencias, obra de tomas, etc.; también comprende pérdidas de vidas, de propiedades o daños y cambios adversos al medio ambiente” (Marengo, 1996). Esto trae consigo altos costos y daños irreparables, por ello fue necesario implementar el desagüe de fondo como parte de la seguridad de la presa.

La evolución de los desagües de fondo se ha visto transformada desde su origen hasta nuestra actualidad con respecto a su diseño y construcción, la calidad de material, a base de los descubrimientos de nuevos métodos y herramientas para su diseño; así como la iniciación de la normatividad. La mitad del siglo pasado lo habitual era disponer de un desagüe de fondo y muy rara vez otro intermedio, a parte las tomas de explotación; donde el desagüe de fondo cumplía con tres misiones: “vaciado y control del embalse, limpieza de los sedimentos y colaboración en el control del río” (Vallarino, 1998). Hoy en día, todavía se sigue haciendo, siempre y cuando cumpla con las condiciones de la descarga con respecto a la capacidad del embalse, equipos y materiales de alta calidad.

En cuanto a las instituciones encargadas de la seguridad en las presas podemos mencionar la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD por sus siglas en inglés), fundada en 1928 como una organización internacional no gubernamental, cuyo objetivo original “fue fomentar los avances en la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de grandes represas y sus obras civiles asociadas, mediante la recopilación y difusión de información relevante y mediante el estudio de las cuestiones técnicas relacionadas” (ICOLD, 2013). Desde sus inicios han publicado boletines, jornadas, guías técnicas, etcétera, que han servido de apoyo para que cada país establezca sus normas y especificaciones.

Actualmente ICOLD aborda otros temas como la seguridad de las presas, el monitoreo del desempeño, reanálisis de presas mayores y vertedores, los efectos del envejecimiento, el impacto ambiental, estudios de costos en las etapas de planificación y construcción.

En España, se edita la revista de Obras Públicas (Llamas, 1948), donde se publicó un artículo Sobre Desagües de Fondo en los Grandes Embalses, donde por vez primera se estipula en un escrito su construcción y justifica su fin. Dicho artículo comienza diciendo: "...los desagües de fondo se construyen con tres fines principales: primero, en los pantanos para riegos, con el fin de poder utilizar la total capacidad del vaso; segundo para la evacuación de fangos y depósitos de arrastre manteniendo la capacidad del embalse; tercero para poder dejar terreno en seco con el fin de realizar obras, reconocimientos, impermeabilizaciones y, en caso de guerra u otros hechos extraordinarios realizar un vaciado completo"; desde entonces se ha identificado el papel y la importancia de este tipo de desagües.

Para 1967, igualmente en España establece la Instrucción para Proyectos, Construcción y Explotación de Grandes Presas (IPCEGP), donde el capítulo II está enfocada a las Normas para el proyecto de presas, y en el artículo 20 que se establecen las condiciones de los "Desagües profundos":

Artículo 20.1. Se denominan -desagües profundos- aquellos cuyo dintel de toma está a cota inferior a la del umbral más bajo de los desagües de superficie.

Artículo 20.2. La capacidad de los desagües profundos, con el nivel del embalse a la mitad de la altura de la presa.

Artículo 20.3. Todos los desagües profundos se proyectarán para poder funcionar correctamente, con la carga total del embalse, tanto en su apertura como en su cierre.

Artículo 20.4. En cada presa se proyectarán como mínimo dos desagües de fondo.

Artículo 20.5. Todos los desagües profundos estarán provistos de doble cierre y deberán poderse accionar a mano y mecánicamente, con energía procedente de dos fuentes distintas.

En 1996, en el país ibérico se aprueba el Reglamento Técnico sobre Seguridad de Presas y Embalses, donde el capítulo III habla de los Criterios básicos de seguridad, y en el artículo XIV se trata la Capacidad de los órganos de desagüe, refiriéndose a todas las medidas que deben considerar y tomar en cuenta en caso de incumplimiento del reglamento, lo que provocaría inseguridad.

En 1997, se conforma las Guías Técnicas de Seguridad de Presas 5, con respecto Aliviaderos y desagües, por el Comité Nacional Español de Grandes

Presas (CNEGP), en donde se establece la función del desagüe de fondo como el control del nivel del embalse, limpieza de sedimentos, la evacuación de avenidas y la colaboración en el cierre del desvío del río y primeros llenados del embalse.

Por su parte, en nuestro país, México, referente a la estructura de control de los desagües se tiene la especificación con título Válvulas de Seccionamiento Tipo Mariposa y Mecanismo de Operación para Centrales Hidroeléctricas por la CFE, creado en 1999 y reformado en 2010. Esta especificación tiene como objetivo: "...las características técnicas de diseño, operación y control de calidad que deben cumplir las válvulas de seccionamiento y su equipo de operación que adquiere la CFE." Con respecto a su campo de aplicación indica que "...en el procedimiento de adquisición de las válvulas de seccionamiento tipo mariposa y de sus mecanismos de operación para centrales hidroeléctricas" (pág. 1).

En 2011, se crea la especificación con título Desagüe de Fondo con Válvulas para Centrales Hidroeléctricas por la CFE. Teniendo como objetivo: "...las características técnicas de diseño de operación y de control de calidad que debe cumplir el equipo para el desagüe de fondo constituido por una válvula disipadora de energía tipo chorro hueco, una válvula de seccionamiento tipos mariposa y sus respectivos mecanismos de operación, que adquiere la CFE" (pág. 1). En su apartado cuatro de características y condiciones generales, en equipos y servicios requeridos, inicia "...cuando se instala válvulas de chorro hueco (válvulas de chorro divergente o válvula de cono fijo) para el desagüe de fondo de embalses se requiere, aguas arriba, de la instalación de válvulas tipo mariposa de seccionamiento para las actividades de mantenimiento y como respaldo de cierre..." (pág. 2).

Por otro lado, con la ayuda de los avances de la tecnología se han mejorado equipos y materiales con nuevas teorías y modelos, facilitando el diseño de los desagües de fondo. Por ejemplo, el Proyecto Hidroeléctrico "Ing. Fernando Hiriart Balderrama" (Zimapán), localizada sobre el río Moctezuma a 400 m, aguas abajo de la confluencia de los ríos Tula y San Juan, en el cañón conocido El Infiernillo, entre los límites de los Estados de Hidalgo y Querétaro, México; es una presa de estructura de concreto tipo arco-bóveda, con una altura de 203 m, longitud de coronación 122 m, tiene un vertedero de dos túneles de 576 m y 533 m, con compuertas radiales, cuenta con dos unidades de 146 MW de potencia por cada una, y una capacidad de almacenamiento de 1 426 millones de m³ (Rev. de Obras Públicas, 1997).

La finalidad del desagüe es ante una avenida extraordinaria que pueda causar daño a la cortina y la realización del proyecto completo; así como el desazolvé o limpieza de los depósitos sólidos, se realiza por erosión y arrastre mediante toda su capacidad del desagüe de fondo.

El desagüe de fondo se localiza en la cortina a una elevación de 1 433 msnm a una altura de 71 m a partir del desplante. El eje de descarga está a 14.18° abierto respecto al eje de la cortina, con dirección a la ladera derecha aguas abajo de la cortina. Se diseñó para una caída neta H de 132 m, con un gasto máximo Q de 326 m³/s, velocidad máxima V del agua 47 m/s (CFE, 2010). Sus elementos que lo integran son: una tubería, compuertas, partes fijas y accesorios, servomotores hidráulicos, esclusa de escoria, grúa puente de 25 toneladas, sistemas de engrase, central hidráulica y tablero eléctrico.

La tubería constituye de una tubería abducción de 3.78 m de diámetro en forma abocinada que se reduce a una sección circular de 2.30 m de diámetro, teniendo una longitud de 9.70 m; de la misma tubería continua una zona de transición gradual que cambia la geometría de circular a rectangular (2.3 m a 2.3 x 3.0 m) con una longitud de 8.10 m, construida de placas de acero y su exterior con anillos de refuerzo.

Cuenta con tres compuertas: de operación cuya función como dice su nombre de operación tanto apertura como cierre, colocada en forma vertical deslizante, tipo vagón de 2.85 x 3.30 m y 0.65 m de espesor; de servicio destinada a sustituir a la de operación cuando este en mantenimiento, es vertical deslizante, tipo vagón de 2.51 x 3.30 m y 0.65 m de espesor; y por último compuerta de horizontal de mantenimiento su función es bloquear el paso del agua al interior de la cámara de la compuerta de servicio, de sección rectangular de 2.65 x 1.28 m y 0.82 m de espesor; las compuertas construidas de acero, tal como se puede observar en la figura No. 1.

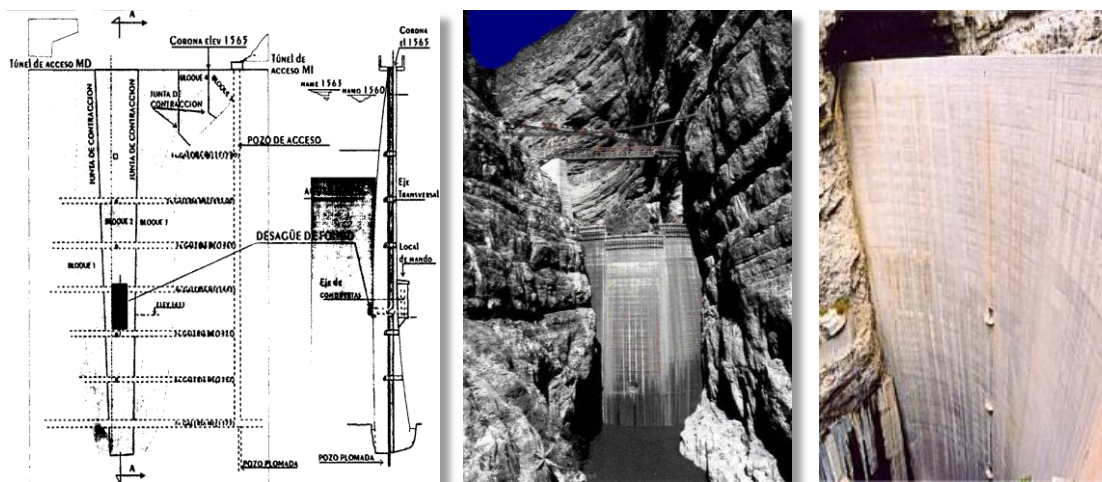


Figura No. 1 Desagüe de fondo del P.H. Zimapán (Rev. Obras Públicas, 1997; Internet navegador Google/imagen, 2013).

1.2 Tipos de desagües

El embalse, es el lugar donde se almacena el agua, y consta de la presa y desagües. Entiendo el término presa como una barrera interpuesta en el cauce

de un río para retener y almacenar agua, elevando el nivel considerablemente y regulando el caudal de salida. Mientras que los desagües son aperturas montadas en la pared principal de la presa a través de las cuales se controla la salida del agua (Monroy, 2006).

Para ello, existen tres tipos de desagües: superficie, medio fondo y fondo.

1. Desagües de superficie o vertederos se encuentran en la parte superior de la presa y tienen la función de regular el nivel del agua para evitar el desbordamiento.
2. Desagües de medio fondo son desagües que se alimentan a media altura de la presa. Sirven para asistir a los vertederos de superficie y para controlar el nivel del embalse. Están situados a media altura de la presa o en los laterales.
3. Desagües de fondo son desagües situados en la parte más baja de la presa. Se ubica preferentemente en la parte de medio de la presa o en los laterales, en las cercanías de la cimentación y sirven como medios de seguridad para el vaciado del embalse (Ídem).

Cabe mencionar que una presa puede haber varios desagües a distintas alturas, ya sean los tres juntos o una combinación entre ellos, éstos no suele faltar en ninguna presa, salvo muy escasas excepciones, porque su fin es insustituible, donde puede variar en su diseño y construcción. Al considerar otro desagüe, su finalidad es controlar hasta el nivel mínimo de funcionamiento, y así operar con menor presión.

Esquemáticamente podemos ver el tipo y posición de los diferentes desagües en la figura No. 2.

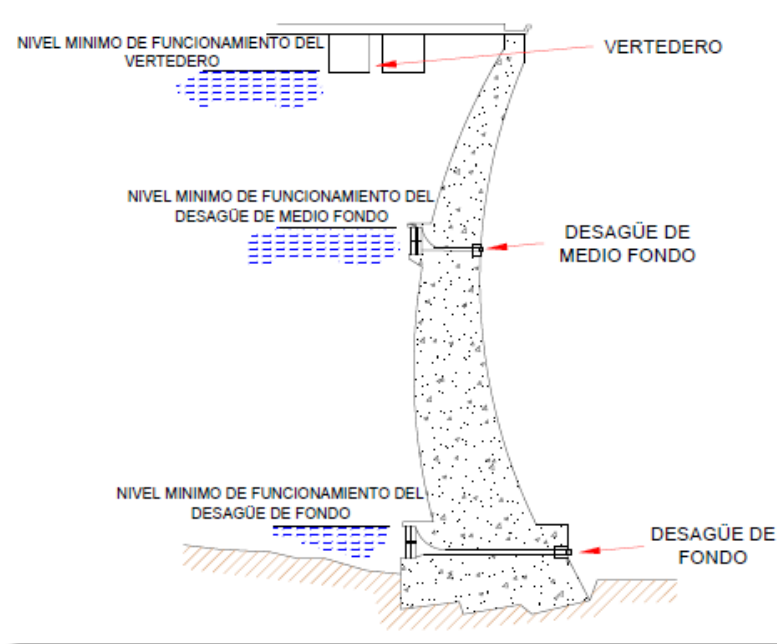


Figura No. 2 Tipo y ubicación de los desagües (CNEGP, 1997).

La ubicación de los desagües puede estar en la propia presa y en una ladera o una combinación de ambos. Estas obras desaguan de distintas maneras: en una conducción a presión, cauce, descargan a un canal o túnel, dependiendo el requerimiento como es el abastecimiento de agua potable, centrales eléctricas, riego y la evacuación al cauce.

El objeto de tener diferentes tipos de desagües, es para fraccionar la carga de funcionamiento de los elementos de cierre y para el abastecimiento de agua potable es disponer de dos o más tomas a distintos niveles para captar el agua en el nivel adecuado con las condiciones requeridas de calidad, temperatura, etc. (CNEGP, 1997), y para lo cual se necesita ciertas estructuras para que funcione correctamente.

1.3 Descripción de las estructuras que integran el desagüe de fondo

El arreglo y los elementos de la descarga dependen de su ubicación, ya que la descarga puede ser al exterior o en un túnel como el caso de “La Yesca”, donde fue necesario diseñar cámaras disipadoras de energía a fin de evitar daños en la estructura aguas abajo.

Las partes que integran el desagüe de fondo son:

1. Obra de toma o bocatoma, conocido también como embocadura, cuya función sirve como entrada a las obras de desfogue. Constituido en ocasiones por una rejilla que sirve para proteger las válvulas y compuertas a causa de objetos sólidos, fabricadas por barrotes metálicos de sección rectangular.
2. Estructura de control, cumple con la función de regular las descargas mediante compuertas o válvulas como dispositivos de control de la obra de desfogue.
3. Conducto, su función es conducir el agua a través de las presa; en forma típica, algunos conductos pueden ubicarse aguas arriba de las compuertas o válvulas, y se tiene asimismo otro conducto aguas abajo del dispositivo de control.
4. Sección de disipación de energía, su función reduce la energía y velocidad del agua en movimiento; es decir, sirven para amortiguar el flujo en aguas abajo.
5. Canal de retorno, conduce las descargas hacia el cauce natural del río aguas abajo de la presa (CNA, 1998).

Por otro lado, debemos tomar en cuenta que la posición de desagüe de fondo tiene dos límites, de acuerdo a lo estipulado por el Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP, 1997). El primero es el límite superior por debajo de la toma más profunda, para permitir el vaciado por debajo de ella y el segundo

el inferior por encima del nivel que pueda alcanzar los sedimentos en un margen temporal (a 5 o 10 años, donde se pueda observar, el depósito sea lento y facilite el control).

A su vez, se debe considerar 3 aspectos para la posición de los desagües profundos, primeramente la altura de la presa; después los caudales del río y por último la conveniencia de que los desagües profundos colaboren en la evacuación o control de avenidas (Vallarino, 1998).

Entonces, las partes que forman el desagüe de fondo al unificarse cumplen previendo fallas en un corto, mediano o largo plazo. Sin embargo, no debemos olvidar que las partes que integran el desagüe de fondo van a variar dependiendo de su ubicación, del diseño y de su finalidad; así como la dirección que va tomar para su descarga; puesto que las zonas de control pueden variar de válvulas o compuertas (interno de la presa o externo) y, en tener un dissipador de energía dependiendo el grado de turbulencia del flujo, tal como se observa en la figura No. 3, donde se distingue las partes del desagüe de fondo.

La distribución del desagüe, en aguas arriba se tiene en primera instancia la bocatoma para dar origen la conducción, después se localiza la zona de control (galería o caseta) constituida por válvulas o compuertas, después se une con el conducto de aguas abajo para terminar con la estructura terminal (canal a cielo abierto o con un dissipador de energía para evitar la erosión de la ladera), a todo lo anterior depende del diseño.

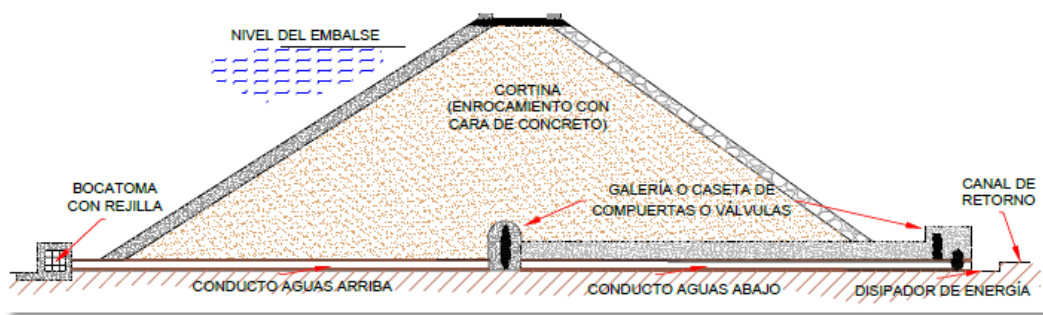


Figura No. 3 Partes que integran la obra de descarga (CNA, 1998).

1.4 Aspectos con y sin desagüe de fondo

Resulta evidente la necesidad de la seguridad de las presas, para ello, se han abierto un gran número de foros y congresos; además se ha escrito en libros, revistas y artículos en línea donde se analiza el tema en cuestión y donde se dan a conocer soluciones que se han aplicado. Al respecto, es una preocupación de los técnicos e instituciones que se relacionan con el tema la seguridad de las presas. Por ello, el desagüe de fondo tiene como finalidades el control del nivel del embalse, limpieza de sedimentos, la evacuación de avenidas, colaboración en el cierre del desvío del río y el primero llenado del embalse.

De acuerdo a Vallarino (1998) y CNEGP (1997) las funciones del desagüe profundo son:

- a) *Control de nivel y vaciado*, consiste en disminuir el empuje hidrostático, reducir filtraciones y crear un vacío de volumen preventivo para almacenar crecidas previsibles. El control es durante el primer llenado del embalse, por ser la primera prueba de la presa y, debe realizarse paulatinamente para observar y con la disponibilidad de acción inmediata a la menor señal de anomalía; como es el vaciado en el caso de sequía extrema, ya que si el nivel llega a su mínimo de explotación es conveniente vaciar el embalse, o bien, en ocasiones es necesario suministrar al río con fines higiénicos o ecológicos; ello es en cualquier caso de emergencia que pueda tener la presa.
- b) *Limpiadora del desagüe de fondo*, cuya función es el desazolvé o limpieza de los depósitos sólidos, se realiza por erosión y arrastre, por lo que precisa una velocidad mínima, según las dimensiones de los granos, su cohesión y grado de consolidación. El comportamiento de los sedimentos es un proceso continuo, por lo que irá adquiriendo sucesivos niveles, siempre limitado por el talud natural del material, donde estos taludes pueden ir creciendo pero con los deslizamientos se reajustaría el talud de equilibrio (ver figura No. 4); con el propósito de evitar la consolidación del sedimento porque éste aumenta la resistencia a la erosión y, el talud natural provoca la inactividad del desagüe cubriendo y anulándolo.
- c) *Colaboración en el cierre del desvío del río*, su función por un período breve y pasajero al final de la construcción, puede ser fundamental para la anulación del desvío del río y poder pasar a la fase de llenado del embalse.
- d) *Control y evacuación de avenidas*, se refiere a la evacuación de grandes caudales y las exigencias de las obras en los grandes ríos, porque con fuertes caudales el desagüe en profundidad permite reducir las dimensiones al alcanzar altas velocidades desde el origen del conducto, por estar éste en carga, evitando el desbordamiento en la cortina.

En ese tenor, podemos decir que existen problemas que pueden presentarse durante la operación del desagüe de fondo, tales como: la cavitación, erosión por abrasión, golpe de ariete y vibraciones.

La cavitación es consecuencia de una combinación crítica de velocidad de flujo, presión del flujo y presión de vapor de agua; el material que se afecta más rápidamente en este proceso es el concreto, a comparación de los metales. La erosión por abrasión se debe al movimiento de materiales abrasivos (granulares y más grandes) en el agua en circulación; como la arena, el limo y otras partículas de sedimentos, que se encuentran suspendidas en las descargas de alta velocidad, se presenta más abrasión en las fronteras del flujo.

El golpe de ariete es un aumento (aceleración) o disminución (desaceleración) de presión que se presenta dentro de un ducto cerrado; en conductos de presión, la consecuencia de tener alta presión es reventar un tubo o la caída de presión que colapsa la tubería. Por su parte, las vibraciones son las fuerzas dinámicas generadas en el agua en movimiento, las cuales se sincronizan armónicamente con la frecuencia natural de vibración de un miembro estructural; las estructuras metálicas son vulnerables a daños por vibraciones, aunque también estructuras de concreto tienen afectaciones, aunque menores.

Otras dificultades son la erosión presentadas en la entrada de la bocatoma como en la salida de la estructura terminal del desagüe de fondo, causando daños en los taludes, los materiales de protección y los disipadores de energía como estructuras asociadas; el vaciado completo de un embalse constituye afectaciones ambientales significativas sobre los sistemas acuáticos, pero a su vez, puede representar un peligro mediante la introducción de agua a presión en el núcleo de una presa, o al momento de proporcionar una trayectoria de fuga a lo largo del exterior de la tubería del desagüe.

Con respecto al proceso de mantenimiento, y/o las partes que conforman la estructura, equipos e instalaciones complementarios del desagüe de fondo, utilizadas en el monitoreo (inspección visual periódica) desde la etapa de construcción, después en el llenado del embalse y operación (pruebas); en el proceso se revisa el comportamiento, con la ayuda de equipos electrónicos, y personal especializado (en ocasiones también están a cargo del mantenimiento); si, surge un problema de la estructura del desagüe se da mantenimiento (limpieza, engrase, pintura, pequeñas reparaciones eventuales), para que este siempre en condiciones de operación.

Para ello, la CNA cuenta con algunos manuales de módulo: identificación visual de deficiencias en las seguridad de presas; inspección y pruebas de compuertas, válvulas y otros sistemas; importancia de la seguridad de presas y evacuación de la suficiencia hidráulica. Todos y cada uno con temas ligados de supervisión en estructura y equipo del desagüe u otro objeto que obstruya la trayectoria del flujo, así como las partes metálicas con sus problemas de corrosión, cavitación y erosión, no olvidando las filtraciones, o mantenimiento de las válvulas y compuertas; y los sistemas auxiliares (electricidad); es decir, se breve en una inspección visual periódica de su estado, operaciones de mantenimiento y pruebas de funcionamiento del desagüe.

Por último, tener un buen diseño y construcción sobre los desagües de fondo evita diversas dificultades, para tener un embalse de su capacidad calculada. Asimismo, cabe plantearse la posibilidad de construir un dique de cola como medida para controlar la dispersión de sedimentos en el vaso de embalse y

facilitar su extracción; como se muestra en la figura No. 4, a fin de alargar su capacidad y vida útil.

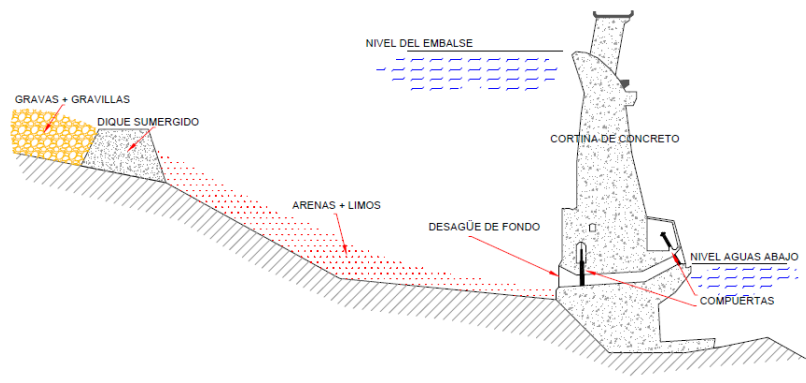


Figura No. 4 Desagüe de fondo con un dique de cola.

Al no considerar el desagüe de fondo y pasar por alto toda la normatividad, se reconoce que existen fallas causadas por diferentes factores: hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos, sísmicos, estructurales y de construcción, operacionales y otros como son guerras, sabotaje e impactos accidentales en estructuras (Marengo, 1996), o sin tomar en cuenta su dimensión. Lo que representa una grave irresponsabilidad del ingeniero proyectista, como los de quienes lo autorizan; ya que, la ruptura de una gran presa es un acontecimiento que causaría daños irremediables.

Aunado a ello, podemos aseverar que la presa presenta otros problemas como no tener control del vaciado del embalse, acumulación de sedimentos; además en el primer llenado, si surge un inconveniente no se tiene el elemento para el vaciado total, y lo más grave reduce la vida útil de toda la estructura; y no se valora el costo y finalidad de la presa, por esa razón los daños producidos aguas abajo por falla pueden ser extremos o catastróficos como consecuencia de una eventual ruptura total o parcial de la presa a causa de la gran cantidad de agua que contiene el embalse. En la figura No. 5 se observa la presa sin desagüe de fondo, y la acumulación de sedimentos reduce la capacidad del embalse.

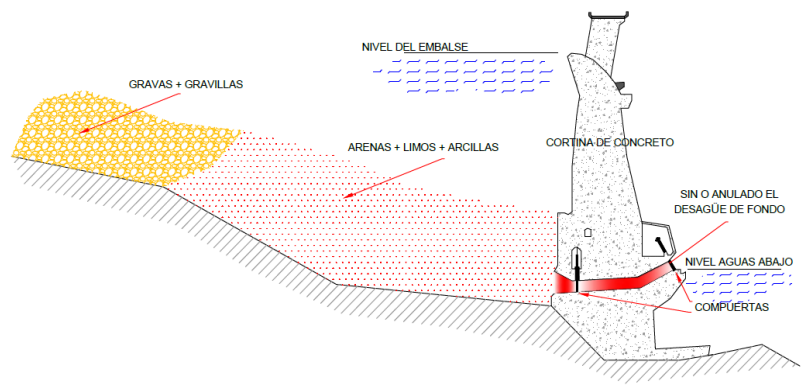


Figura No. 5 Sin o anulado el desagüe de fondo.

El siguiente ejemplo es la rehabilitación del desagüe de fondo de la presa española Iznájar. Para ayudarnos a entender la problemática tomamos como referencia a la presa Iznájar construida entre 1962 y 1968, año en que comenzó la operación; esta es una presa de gravedad con un vertedero curvado, con una altura desde los cimientos de 121.6 m, y su finalidad es regular el flujo del río Genil (5 000 km² de cuenca), el principal afluente del Guadalquivir, España. El embalse tiene una capacidad de 980 Hm³ y una fuente de promedio de 495 Hm³, de acuerdo a la regulación de la cuenca administrada por la Autoridad de Aguas del Guadalquivir para el riego y el abastecimiento de agua potable, así como la producción hidroeléctrica y protección contra las inundaciones (Riera, 2009).

En cuanto a sus estructuras de descarga, se identifica un vertedero de ocho envergaduras equipado con compuertas Taintor, capaz de evacuar un caudal máximo de 6 500 m³/s del Nivel de Agua Máximo, y siete grandes desagües de fondo idénticos (inicialmente con una capacidad de caudal máximo de 150 m³/s cada uno). En cuanto al diseño original, cada desagüe estaba equipado con compuerta de paramento del tipo oruga aguas arriba de 2 x 3.5 m, seguido por un tramo de transición a la sección transversal circular con diámetro de 2.38 m, la longitud de la tubería de cruzar la presa de 70 m, terminado en una válvula de regulación tipo Howell Burger del mismo diámetro, con un cono de 60°. Estas válvulas están alojadas en cajones de concreto que actúan como deflectores de bloque de tobogán para mejorar la estabilidad del salto hidráulico en la cuenca de la disipación de energía en el pie de la presa.

Sin embargo, los daños de los desagües de fondo, se presentan debido al tiempo que ha pasado desde la construcción de la presa, en conjunción con los problemas de conservación causados por las aguas ricas en azufre evacuados del sistema de drenaje de la cimentación y el gran tamaño de las válvulas de regulación, donde la parte trasera de las juntas de estanqueidad y los mecanismos de operaciones, ha tenido problemas de ajuste, ocasionando que los siete desagües de fondo se deteriorarán considerablemente, por lo que prácticamente estaban inutilizables.

En términos generales, los desagües de tubería carecían de acceso para la inspección, estaban en buen estado; los problemas residían en las válvulas tipo Howell Burger (desajustes con la válvula, sistema de mecanismo viejo; y corrosión por el azufre en las válvulas y sistema de accionamiento) y, por distintas razones, de las compuertas de paramento aguas arriba (su estado de conservación era aceptable, pero debido a falta de peso y exceso de fricción, no pudieron cerrar la salida bajo la condición del flujo de agua; es decir, cuando la válvula de salida estaba abierta, los mecanismos de operación eran también obsoletos). Esta situación llevó a una revisión total del sistema, con el objetivo de planificar su renovación completa, teniendo en cuenta la posibilidad de reducir

la capacidad de flujo, mediante el análisis de los datos hidrológicos en los últimos cuarenta años.

En base a lo anterior, se presentan los trabajos realizados para renovar completamente los siete desagües de fondo de la presa de Iznájar. Además del acondicionamiento y modernización de compuertas, con sus correspondientes válvulas, se muestra en la fig. No. 6. Los trabajos de renovación consistieron en:

Reducción del diámetro de los conductos de 2.38 m a 1.6 m, en su tramo final para permitir la incorporación de compuertas Bureau aguas arriba de las válvulas de regulación; la sustitución de todas las antiguas válvulas Howell Bunger, por válvulas del mismo tipo en acero inoxidable (\varnothing de 2.38 a 1.6 m); incorporación de compuertas Bureau circulares de asiento plano, con sus correspondientes válvulas ventosas de aducción de aire, como seguridad de cierre de los conductos; construcción de todas las partes en contacto con el agua en acero inoxidable; incorporación de sistemas hidráulicos para cada una de las válvulas y compuertas; incorporación de cuadros de mando, control y teletransmisión, circuitos electrónicos y cableado por el ambiente sulfuroso existente de forma continua en la presa; prolongación de los dientes de lanzamiento del vertedero con la correspondiente modificación de la curvatura de los mismos; y entre otras agregaciones (González, 2008).

Cabe mencionar, que el ajuste geométrico de las nuevas obras ha sido muy complejo por los condicionantes técnicos y el espacio limitado disponible; los nuevos desagües de fondo han estado operando satisfactoriamente desde finales de 2004.

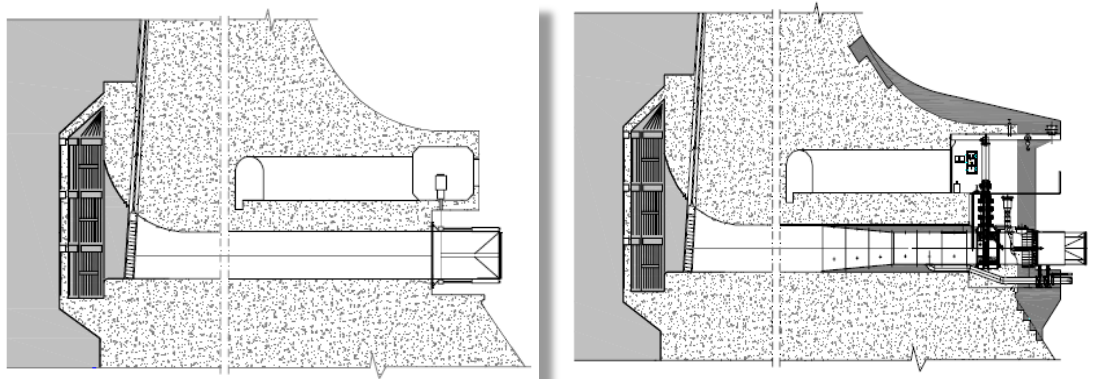


Figura No. 6 Desagüe de fondo izquierda original y derecha renovado (González, 2008).



Figura No. 7 Desagüe de fondo de la Presa Iznájar (Internet navegador Google/imagen, 2012).

Otro ejemplo por rehabilitación del desagüe de fondo es la presa Jarosa, España. Con capacidad del embalse de 7.15 Hm^3 , la cortina de concreto de gravedad, con una altura de 57 m, longitud de la cresta 213 m, y la capacidad de descarga $1 \times 15.85 \text{ m}^3/\text{s}$ (De Francisco; Perez, 2009).

Por otro lado, el Departamento de Presas Isabel II, se ha dado a la tarea del mantenimiento y la seguridad de 16 grandes presas, cuya principal función es la de abastecer de agua a la mayoría de los municipios en el oeste de la comunidad de Madrid; incluso en el actual Reglamento Técnico en España IPCEGP (1967), y se denota la importancia de los desagües de fondo del artículo 20.4, establece que cada presa se proyectará por lo menos con dos desagües de fondo. La presa Jarosa sólo tenía un desagüe de fondo. Con el fin de mejorar la seguridad de funcionamiento de la presa y para cumplir con la legislación existente se proyecta desde el Departamento de Presas una aplicación de un nuevo desagüe de fondo para permitir la regulación apropiada de agua y vaciar el embalse en caso de fallo en la actual descarga existente.

Los puntos principales que influyeron en la elección del proceso de construcción son: mantener el abastecimiento a los municipios, no se permitió el vaciado del embalse, para lo cual fue forzoso emplear un método para asegurar un frente seco de la perforación, mientras que el diámetro es demasiado pequeño, lo que dificultó la excavación manual. El proceso de construcción elegido consistió en una perforación con tuneladora y tubos de concreto con placa de revestimiento. El diámetro interior es de 800 mm. El proceso elegido es delicado y requiere de un máximo cuidado.

Por ello, la operación tuvo éxito según el programa realizado antes de inicio. Con la experiencia de los trabajos ya ejecutados se dan algunos aspectos importantes en programar tareas en detalle antes de comenzar el trabajo y estudiando cada paso varias veces. En el proceso constructivo se tuvo cuidado con la colocación de la juntas de cada tramo de conducto, porque es la pieza que asegura que el agua no se escape cuando la tuneladora llegó al embalse, véase en la fig. No. 8.

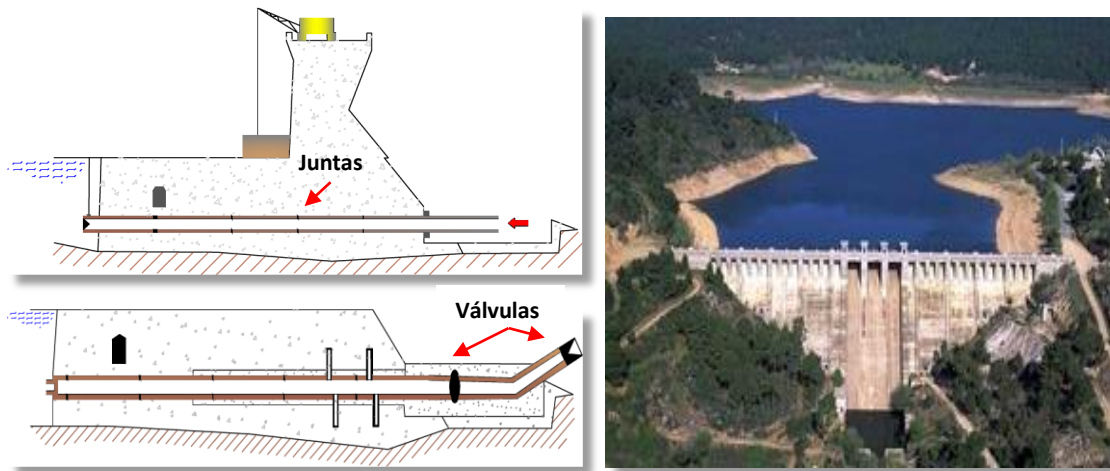
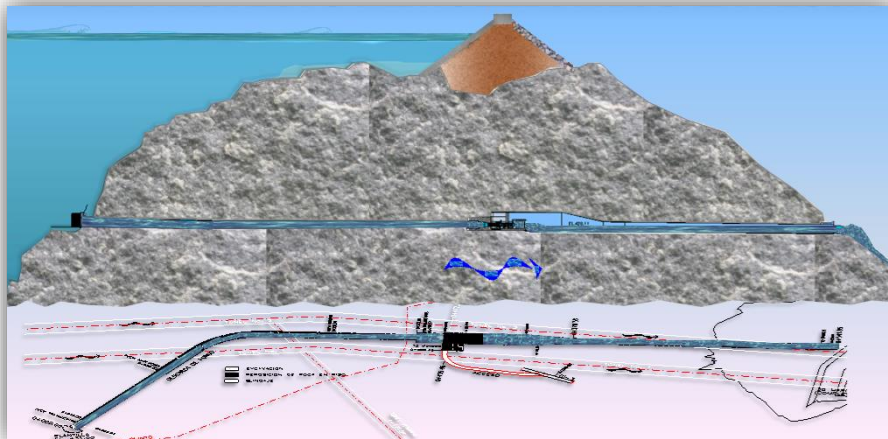


Figura No. 8 Desagüe de fondo de la presa Jarosa (De Francisco, 2009; Internet buscador Google/imagen, 2012).

En conclusión con este capítulo, se cumple con el objetivo de conocer la importancia, finalidad, tipos, partes que lo integran, problemas de mantenimiento y operación, ventajas y desventajas al tener este tipo de estructura; así como ejemplos aplicados a la realidad para ilustrar más el desagüe de fondo. Por otra parte, no olvidarnos de la normatividad que existen en México, y observamos como otros países ya tienen lineamientos más específico para este tipo de obra. Así que, es un gran paso conocer el proyecto del desagüe de fondo “La Yesca”.

CAPÍTULO II

ALTERNATIVAS Y ARREGLOS PROPUESTOS DEL DESAGÜE DE FONDO: PROYECTO HIDROELÉCTRICO “LA YESCA”



CAPÍTULO II: ALTERNATIVAS Y ARREGLOS PROPUESTOS DEL DESAGÜE DE FONDO: PROYECTO HIDROELECTRICO “LA YESCA”

2.1 Descripción del P.H. “LA YESCA”

El Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”, forma parte del Sistema Hidrológico del río Santiago, que comprende a 27 proyectos con un potencial hidroenergético de 4 300 MW, del cual sólo se ha desarrollado el 32% mediante la construcción de seis centrales. El P.H. “La Yesca” tiene el potencial para alcanzar el segundo lugar en potencia y el tercer lugar en generación dentro del sistema, después de la Central de Aguamilpa-Solidaridad y de El Cajón (CFE, 2012), tal como se observa en la figura No. 9.

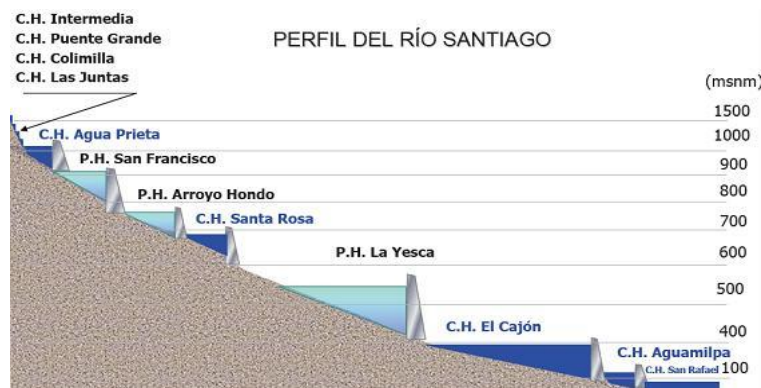


Figura No. 9 Perfil de los proyectos hidroenergético sobre el río Santiago (CFE, 2012).

En la fig. No. 10 se muestra la ubicación de la “La Yesca”. Localizada sobre el río Santiago, en el entorno de la sierra madre occidental a 105 kilómetros al noroeste de Guadalajara y a 23 kilómetros al noroeste de Hostotipaquillo, Jalisco, entre los límites de los estados de Jalisco y Nayarit, cuyas coordenadas geográficas son: 21° 11' 49" Norte y 104° 06' 21" Oeste.

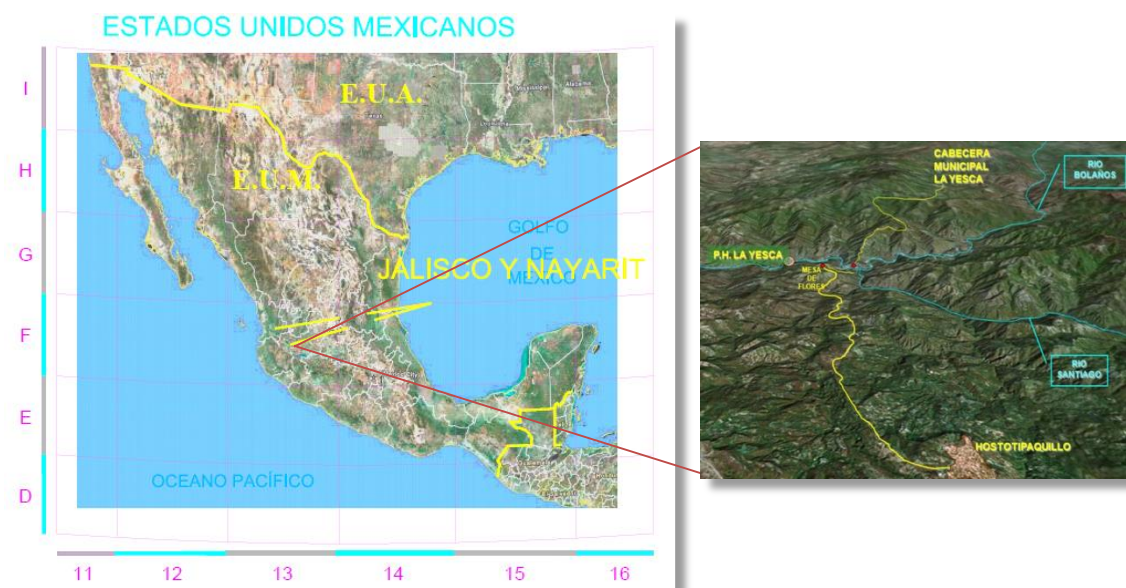


Figura No. 10 Ubicación del P.H. “La Yesca”.

Algunas de sus características generales que cuenta “La Yesca” son:

- Tiene una capacidad de generación de 750 MW, y representando una inversión de más de mil millones de dólares. Con capacidad de almacenamiento de su vaso es de 2 392 millones de metros cúbicos.
- La casa de máquinas se ubica en una caverna excavada en roca de 22 m de ancho, por 50 m de altura y 103.5 m de longitud; su estructura es de losas, muros, y bóveda con acabado de concreto reforzado, donde se instalarán dos unidades turbogeneradoras (turbinas de tipo Francis) un total de 750 MW.
- La cortina de la presa es de tipo enrocamiento con cara de concreto ECC y tendrá una altura de 205.5 m y será la segunda más alta de su tipo a nivel mundial. La longitud de la corona de 628.78 m. Ancho de la corona 11 m. Talud aguas arriba y aguas abajo 1.4:1.
- La obra de excedencias o vertedor está compuesta por 6 compuertas radiales de 12 m de ancho por 22 m de altura, con capacidad de desalojo de un gasto máximo de diseño 15 915 m³/s y con un gasto unitario máximo de descarga 209.86 m³/s.
- La obra de desvío consiste en 2 túneles de sección portal de 14 m x 14 m, la longitud del túnel 1 y 2 de 693.35 m y 750.57 m. El gasto máximo de la avenida 7 578 m³/s y diseño de 5 730.60 m³/s. La velocidad máxima de descarga 16.65 m/s (Ídem).
- “La Yesca” comprende la realización de las obras civiles, electromecánicas y asociadas, ingeniería, fabricación, transporte, montaje y pruebas. Durante el momento de su construcción, corresponde al periodo 2006 a 2012, el P.H. “La Yesca” generó alrededor de 5 300 empleos directos y 5 000 indirectos que beneficiaron principalmente a los pobladores de la región y todo el país.
- Por último, la CFE está llevando a cabo un programa de generación de energías renovables (solar, eólica, hidráulica y térmica) y “La Yesca” es uno de ellos al ser parte del programa en energía hidráulica.

2.2 Desagüe de fondo

La seguridad de las presas es de suma importancia, por ello requiere de un trabajo en conjunto entre el ingeniero y equipo de trabajo, ya que, lo primero es la seguridad y después el gasto económico. Debido a lo anterior durante el diseño y construcción, es imprescindible dar mantenimiento y conservación a la obra, puesto que la falla de una gran presa puede llegar a una catástrofe (económica, social, política, etc.). Por eso es necesario desarrollar, y actualizar continuamente normas y reglamentos.

Al respecto, una de las obras de gran relevancia para la seguridad son los desagües donde por su localización tienen diferentes funciones. En este caso

hablaremos específicamente del desagüe de fondo, en donde la CNA (1999) explica:

“Las obras de desfogue son el recurso normal para desalojar el agua embalsada por la presa. Con estas descargas se satisface el propósito para el cual se diseñó la presa como puede ser riego, abastecimiento de agua municipal o industrial, etc. Por último, las obras de descarga sirven como medio para abatir el nivel o drenar el embalse, en caso necesario, durante una emergencia” (pág. I.10).

El P.H. “La Yesca” cuenta con una obra de desagüe de fondo o descarga de fondo cuya finalidad es el vaciado del embalse, en caso de una falla de la propia estructura, y ante cualquier emergencia durante el primer llenado. El diseño y construcción del desagüe se consideró por la presencia de fallas geológicas del lado izquierdo causando un giro de 14° a la cortina aguas abajo y por la magnitud de la presa (normatividad y especificaciones).

Los estudios geológicos “La Yesca” se identificó un conjunto de fallas: Lavadero, Colapso, Vertedor 1, Crucero-Pitayo, Rodaderos y Sabanilla. Las zonas de fallas están formadas por espesores de roca fracturada y alterada, así como materiales arcillosos. Sobre el margen izquierda se localiza el bloque inestable, delimitado por las fallas Colapso 1 y 2, la Curva, Vertedor 1 y el dique granítico. La solución en la parte de los portales de entrada de la obra de desvío se colocó un monolito de concreto y colocación de material de enrocamiento; también como medida adicional las lumbreras de cortante para la estabilidad de la ladera izquierda.

Los elementos del desagüe de fondo son: una bocatoma con rejilla, un conducto de sección circular, bifurcación simétrica, cuatro válvulas (dos de mariposa tipo biplana y dos de chorro divergente de cono fijo), dos cámaras para disipar la energía, una zona de transición, un túnel de sección portal, y una estructura terminal (canal a cielo abierto y un deflector recto en plantilla y muros) en la salida, como se observa en la figura No. 11.

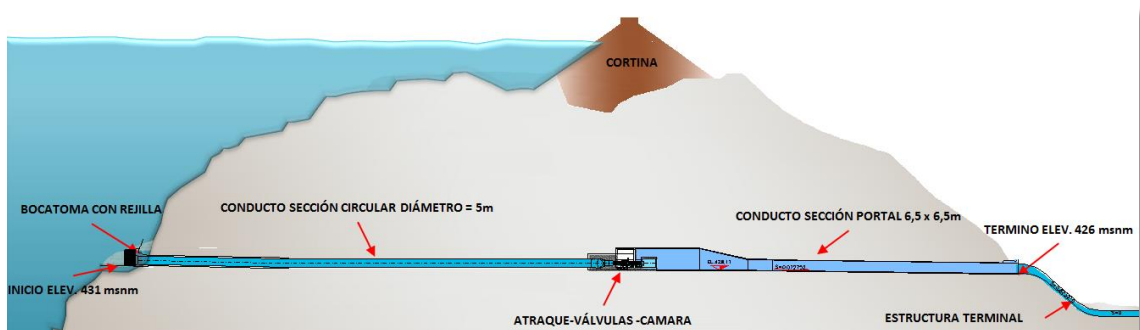


Figura No. 11 Perfil del desagüe de fondo del P.H. “La Yesca” (CFE, 2012).

El desagüe de fondo ubicado sobre la margen izquierda, inicia en la parte inferior de la cortina cerca de la cimentación (plinto) entre la ataguía aguas arriba y la

cortina teniendo como eje de inicio las coordenadas “X” 503 068 y “Y” 2 344 055, para después tener la misma dirección del túnel de desvío No. 2 para descargar casi en la misma zona, teniendo una elevación de plantilla de 431.00 msnm en plataforma y terminando a 426.00 msnm. La longitud total de 541.85 m y la estructural terminal de 8.50 m.

Diseñado para una descarga de diseño de 280 m³/s con respecto al NAMINO cuya elevación corresponde a 518.00 msnm, y un gasto máximo de 360.51 m³/s a base al NAMO con elevación de 575.00 msnm; el llenado del vaso hasta el NAMINO es de 154 días, cuya fecha se cumplió en julio de 2012; el vaciado desde el NAMINO, mediante el uso del desagüe de fondo, es por 100 días con respecto al nivel de estimación (Elev. 447.00 msnm). Lo anterior, de acuerdo al análisis probabilístico del llenado del vaso para un año medio.

Hidráulicamente el comportamiento del agua al sistema del conducto es a presión y como canal; el primero sucede entre cualquier nivel del embalse 442.00 msnm y NAMINO puede descargar gastos entre 90 a 280 m³/s; también entre las elevaciones del NAMINO y NAMO con gastos de 280 a 360 m³/s; si el nivel se encuentra entre 431.76 msnm y 442.00 msnm funciona como canal para la descarga de un gasto menor a 90 m³/s.

Para cualquier tipo de operación en caso de emergencia, pruebas y normal del desagüe de fondo se diseñó entre las elevaciones 442.00 msnm y 518.00 msnm, su regulación se realiza de forma automatizada y manual para su apertura y cierre. Entre las elevaciones 518.00 msnm y 575.00 msnm su apertura y cierre se realiza en forma manual para lograr una descarga extraordinaria con apertura de 100% de la válvula de chorro; ya que las válvulas de mariposa solo pueden operar totalmente abiertas o cerradas.

La secuencia de operación de las válvulas primeramente se realiza la igualación de presiones en las tuberías ubicadas atrás y delante de la válvula mariposa en una operación de llenado a través del bypass; posteriormente es abierta la válvula de mariposa y enseguida la válvula de chorro ambas deben cumplir con las condiciones eléctricas y mecánicas (Reporte técnico, 2011). Para el cierre consiste en cerrar la válvula de chorro, enseguida el cierre de la válvula mariposa y por último vaciar el agua que se encuentra en la tubería entre ambas válvulas, por los drenes. Es decir, todo lo anterior es una secuencia de operación de mecanismos hidráulicos.

En marzo de 2013, se realizó las primeras pruebas de toda la estructura de la descarga de fondo, lo cual consistió en probar cada una de las válvulas por separada y luego ambas se abrieron con un gasto de 200 m³/s equivalente a 95% en diseño. Las pruebas fueron todo un éxito por el buen funcionamiento en toda la estructura.

2.3 Elementos que conforman el desagüe de fondo

Una presa desde el punto de vista funcional se divide en tres componentes básicos: el cuerpo de la presa, estructuras de conducción del agua como el vertedor y las obras de desfogue, donde esta última es importante en “La Yesca”.

Enseguida se presentan las partes que integran y una breve descripción del desagüe de fondo del P.H. “La Yesca”, como se observa en la figura No. 12.

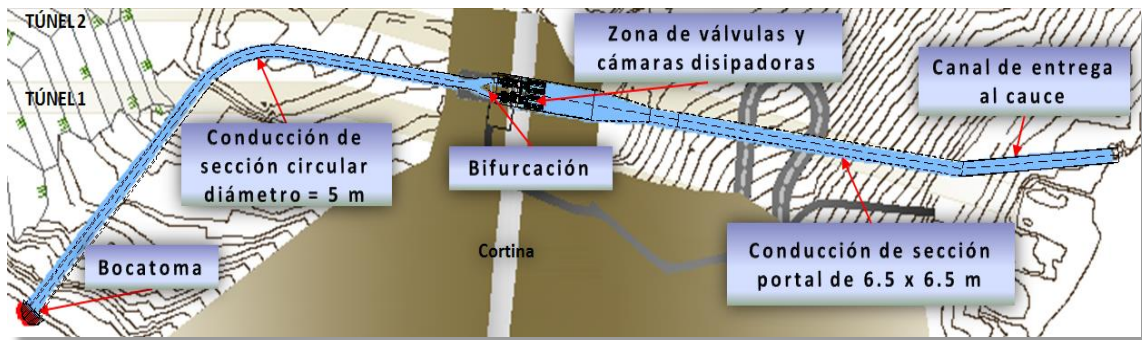


Figura No. 12 Elementos que integran al desagüe de fondo “La Yesca” (CFE, 2012).

1. **Bocatoma** con rejilla se ubica en la parte aguas arriba de la cortina, con una elevación de 331.00 msnm en plantilla, es la parte de inicio del sistema de descarga que conduce el agua hacia el túnel de conducción; por lo tanto, la rejilla su función es evitar que cuerpos sólidos ingresen al conducto, evitando problemas a las válvulas, compuesto de barrotes metálicos de sección rectangular, con dimensiones de 9.5 m de altura por 6.5 m de ancho, en la parte inferior de la rejilla se construyó una losa de protección, donde esta empotrada con el inicio de la conducción.
2. **Túnel de conducción circular** (aguas arriba) consiste en un túnel de conducción de sección circular localizado en aguas arriba, inicia después de la bocatoma, y termina donde inicia la bifurcación, tiene un diámetro de 5 m, y una longitud de 273.78 m; por los análisis geológicos, fue excavado en roca. El túnel está construido de concreto reforzado, en la cota 0+226.276, comienza con un acabado en su parte interna con un blindaje de tubería de acero (longitud de 50 m) y relleno de concreto simple en sobre-excavación. De la cota 0+002.50 a 0+095.00 tiene una pendiente de 0.02 ($s = 0.02$) y el resto tiene cero pendiente ($s = 0.00$).
3. **Bifurcación** es de forma simétrica con una longitud de 22 m, teniendo una pendiente cero ($s = 0$), con una elevación de 432.41 msnm respecto al eje, iniciando con un diámetro de 5 m y termina con dos conductos circulares de 2.5 m de diámetro, para continuar con la zona de válvulas.
4. **Zona de válvulas** se encuentra entre el suministro de bifurcación y las cámaras circulares, consta de 2 válvulas de mariposa tipo biplana y 2 válvulas de chorro divergente de cono fijo ambos con 2.5 m de diámetro,

-
- pendiente cero ($s = 0$); donde la válvula de chorro divergente tiene como coeficiente C_d 0.85 totalmente abierta, proporcionado por el fabricante.
5. **Sección de disipación de energía** se refiere a la cámara disipadora de energía ubicada después de las válvulas de chorro, se construyeron dos cámaras de sección circular, teniendo un diámetro de 5.6 m, la salida de boquilla 4.6 m, longitud es de 9.78 m y 4.25 m de diámetro del anillo de aireación. Tiene como objetivo disipar la mayor parte de la energía provocado por las válvulas. Constituido por una placa de acero y su exterior relleno de concreto. Continuando con la zona de transición en sección portal de 14 x 13.5 a 6.5 x 6.5 m, longitud de 30 m, elevación 428.21 msnm de platilla, y construido de concreto hidráulico reforzadas con marcos metálicas.
 6. **Túnel de conducción de sección portal** (aguas abajo) tiene una longitud de 165.47 m, el túnel es de sección portal de 6.5 x 6.5 m, revestido de concreto hidráulico en la plantilla y muros, y concreto lanzado en bóveda, en la parte de final del portal aguas abajo se colocaron como refuerzo marcos metálicos. Localizado entre la cámara y el canal de entrega al cauce. Donde su pendiente inicial es de 0.016374 ($s = 0.016374$), después de cinco metros cambia la pendiente a 0.012752 ($s = 0.012752$).
 7. **Estructura terminal** se localiza en la salida de aguas abajo, terminando el túnel de sección portal, formado por un canal a cielo abierto, con una longitud de 8.5 m; en la parte final tiene un deflector cuya función es disipar la energía y orienta el chorro hacia el cauce, ubicado en plantilla y muros. En la ladera se colocó una rampa de concreto armado, a fin de evitar la erosión.

Su construcción inició en diciembre de 2009 y se concluyó en febrero del 2013. La estructura del desagüe de fondo es una nueva estructura incorporado al proyecto original cuyo fin es el control del llenado de la presa y para eventuales vaciados del embalse.

En el diseño y construcción del desagüe de fondo se consideró las normas, reglamentos, especificaciones, de instituciones de nuestro país como: Comisión Federal de Electricidad (CFE), Comisión Nacional del Agua (CNA), Secretaría de Energía (SE) e internacional como la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD por sus siglas en inglés) entre otros.

2.4 Opciones estudiadas y solución

En este apartado se presenta las diferentes opciones de los arreglos estudiados para el diseño del desagüe. El propósito de las opciones estudiadas fue tratar de aprovechar los túneles de desvío ya construidos, pero esto ocasionaban interferencia con los trabajos propuestos como medida de seguridad para la estabilidad de la ladera izquierda (construcción de casquillos); lo cual retrasaría

la terminación de la obra, motivo por el cual la opción de un túnel independiente resulto la mejor opción.

A continuación se presentan las alternativas y arreglos del -Desagüe de Fondo- estudiadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE):

La primera solución que se estudió fue tener una alternativa que iniciara cerca de la cortina para después proseguir para conectarse al túnel de desvío dos, y así descargar al cauce. En este caso tendría un arreglo de compuertas deslizantes como estructura de control, teniendo como estructura una bocatoma, túnel de conducción, zona de control con compuertas.

El segundo estudio que se presentó, iniciaba en la misma zona que la alternativa anterior de igual manera seguía la misma dirección, hacia el túnel dos, pero en esta alternativa el arreglo era con válvulas como estructura de control de vaciado del embalse. Las otras estructuras del desagüe serían las mismas. Estas 2 alternativas se muestran en la figura No. 13.

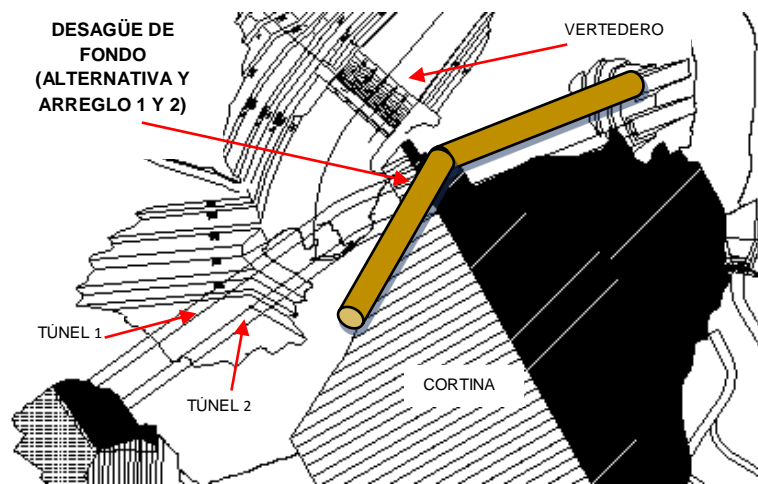


Figura No. 13 Alternativas uno y dos para el desagüe de fondo.

La tercera opción de la obra de desagüe iniciaba cerca de la cortina con dirección a la obra de desvío, para conectarse al túnel uno y seguir su trayecto en el mismo túnel. Su arreglo para la descarga sería mediante compuertas (se adaptaría en forma vertical por tener diferencia de altura), constituido por la bocatoma, túnel de conducción y compuertas. Como se indica en la figura No. 14.

La descripción que se presentó en la cuarta opción es parecida a la tercera alternativa con la diferencia de ocupar arreglos mediante válvulas en la zona de control con el mismo fin de las compuertas, sus otras partes son bocatoma y túnel de conducción. Como se puede ver en la figura No. 14.

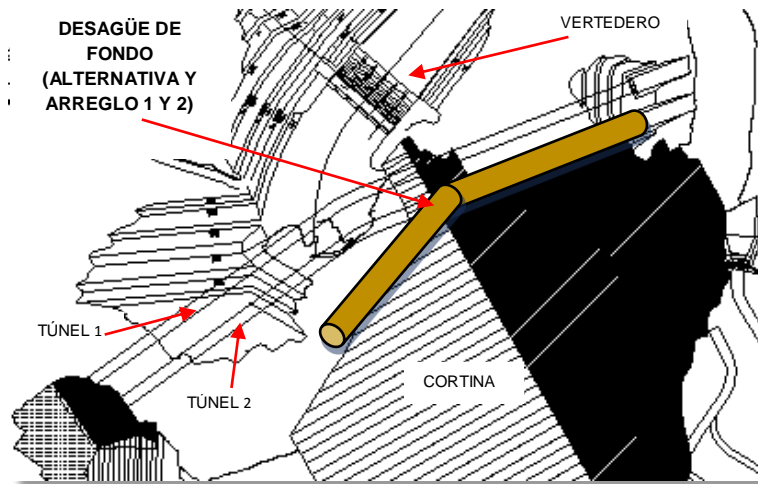


Figura No. 14 Alternativas tres y cuatro para el desagüe de fondo.

En la quinta alternativa, la obra de desagüe se propuso como una obra independiente, iniciando al margen izquierda de la obra de desvío (paralelo al túnel dos), y descarga a lado del túnel dos, teniendo un arreglo de compuertas como estructura de control de la descarga, ubicado en la parte exterior aguas abajo para descargar en el cauce. Contando con una bocatoma, túnel de conducción y zona de control (ver figura No. 15).

La sexta solución es similar a la anterior, con diferencia de ocupar un arreglo mediante válvulas. Por tanto, para las alternativas quinta y sexta se analizaron los costos de la estructura de control con válvulas y compuertas. Esto se observa en la figura No. 15.

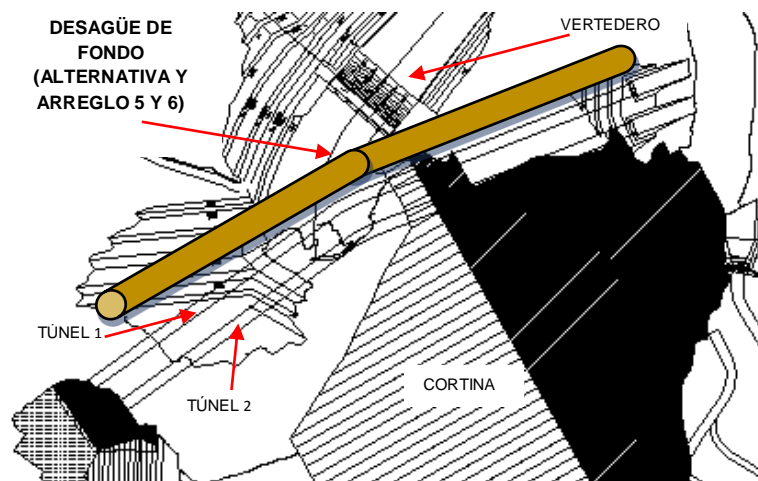


Figura No. 15 Alternativas quinto y sexto para el desagüe de fondo.

La séptima alternativa iniciaba cerca del cimiento de la cortina a unos metros del plinto, continuando hacia la obra de desvío para tomar su curso por encima del mismo y descargar a lado del túnel dos; con arreglo de compuertas, bocatoma, túnel de desvío, etc. En este caso se acercó mucho a la alternativa elegida, como se puede ver en la figura No. 16.

En la última opción se buscó y seleccionó después de analizar los costos de ejecución y tiempo de construcción. Esta octava alternativa fue parecida a la séptima, pero con la diferencia de usar el control de la descarga mediante el arreglo de válvulas. Su descripción se encuentra en el apartado anterior y en el anexo no. 3 se presenta el proceso constructivo de esta misma alternativa. Se puede observar en la siguiente figura No. 16 la vista en planta de esta opción.

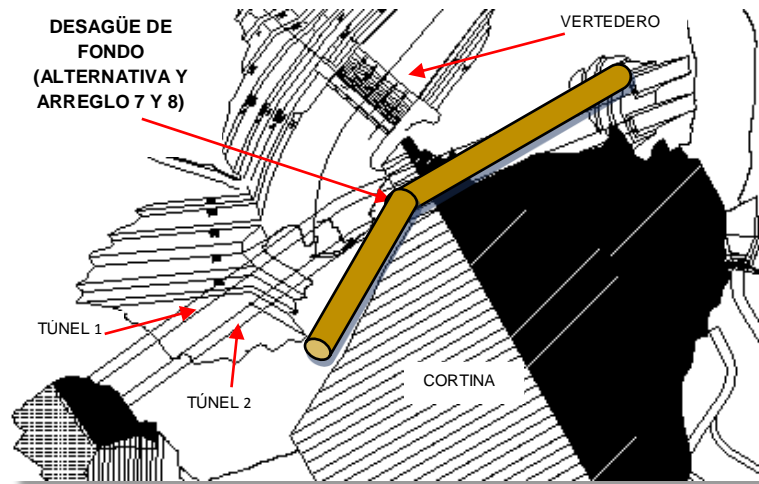


Figura No. 16 Alternativas séptima y octava para el desagüe de fondo.

Para finalizar este apartado fue necesario conocer las características de la presa “La Yesca”, incluyendo a detalle la estructura de la descarga elegida, así como las alternativas que se estudiaron; para comparar y ver las diferencias con la alternativa y arreglo seleccionado. Las perspectivas de alcance, en forma personal consideramos que no se llegó a cumplir, por falta de información a detalle sobre cada alternativa, a diferencia de la opción selecta, pero aun así, se tiene cierta idea en esos puntos. Por otro lado, en la parte del desagüe, tuvieron que realizar un conjunto de estudios para llegar a las partes que lo integrarían y la distribución; donde la teoría es parte fundamental como inicio de un análisis hidráulico.

CAPÍTULO III

ASPECTOS DEL DISEÑO HIDRÁULICO



CAPÍTULO III: ASPECTOS DEL DISEÑO HIDRÁULICO

En este apartado se expone las pérdidas (locales y fricción), la carga de trabajo, diámetros, longitudes, parámetros de construcción y ubicación de la zona de control (válvulas) en la tubería; el conocimiento de la descarga y nivel, permite prever obras como disipadores de energía, en general, para un diseño hidráulico, se considera: el cálculo de caudal, cálculo de niveles (máximos y mínimos de operación) y curva de elevaciones-gastos.

3.1 Generalidades

Principios Básicos de la Hidráulica

Para el desarrollo del diseño hidráulico es importante conocer los conceptos básicos de la hidráulica. De hecho, debemos entender cómo se forma la energía total donde cualquier línea de corriente que pasa a través de una sección se define como la suma de las energías de posición, más la de presión y de velocidad, es decir:

$$\text{Energía total} = \text{Energía de posición} + \text{Energía de presión} + \text{Energía de velocidad}$$

(Rodríguez, 2008).

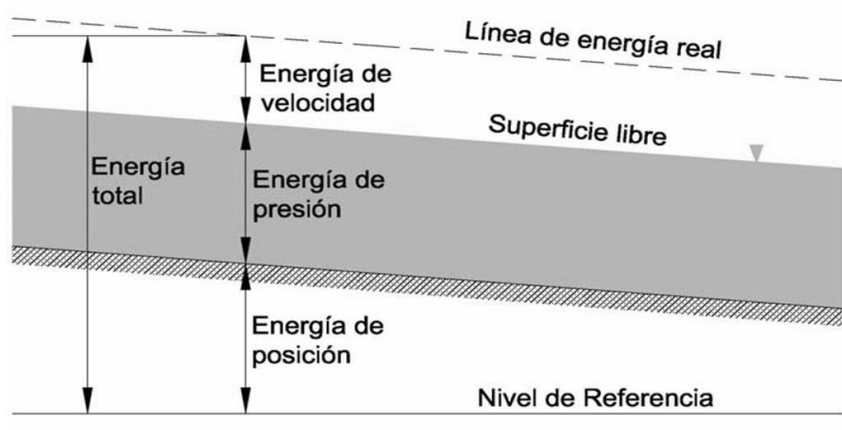


Figura No. 17 Energía total a través de una sección de tubería (Rodríguez, 2008).

Al conocer la composición de la energía total en una vena líquida sobre un conducto, es más práctico analizar y ver su comportamiento con un fluido. Así que, esto da origen a su estudio hidráulico, con ciertas leyes que rigen el flujo.

La dinámica de fluidos, también conocida como mecánica de fluidos, estudia el movimiento del fluido, a través de las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía, estos dan soluciones a diversos problemas aplicados en obras hidráulicas. Estas ecuaciones básicas se derivan de fundamentos de la concepción Euleriana hacia la Ley de Conservación de Masa, esto también aplica a la segunda Ley de Newton y primera Ley de Termodinámica.

Ecuaciones básicas

En la hidráulica para analizar un flujo de un conducto o en serie, se utilizan las ecuaciones básicas: continuidad, energía y cantidad de movimiento. El tipo de flujo que circula por los conductos varía por el tipo de régimen, cuando el flujo es agua, el régimen es turbulento por lo general, pero no siempre.

Con la ecuación de continuidad se resuelven problemas cuando se iguala el conducto mediante el gasto con el producto de velocidad y área. Con respecto a la ecuación de la energía y de la cantidad de movimiento (momentum o impulso), estos pueden describir el mismo fenómeno dentro de un campo de flujo pero con distintos puntos de vista; es decir, la primera considera únicamente los cambios internos de energía y no las fuerzas externas, la segunda toma en cuenta fuerzas externas que producen el movimiento sin atender los cambios internos de energía.

Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad, tiene como principio general de la Ley de Conservación de la Masa; es un balance de masas que establece la igualdad del gasto en todas las secciones de un fluido, siendo el conducto la frontera de ésta. Por tanto, es una expresión analítica del producto de la velocidad media del flujo, con el área de la sección transversal del conducto igual al caudal, o viceversa como se indica en la siguiente fórmula:

$$Q = VA = V_1A_2 = \dots V_nA_n \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

$$Q = \text{caudal en } \frac{m^3}{s}$$

$$V = \text{velocidad media del flujo en } \frac{m}{s}$$

$$A = \text{área de la sección transversal en } m^2$$

Ecuación de la energía

Sirve para calcular las pérdidas de energía que se producen por el desplazamiento del fluido de un punto a otro a lo largo de un conducto. Teniendo en cuenta la pérdida de carga entre dos puntos del conducto se establece una igualdad de energías llamada Ecuación de Energía.

En un flujo ideal, sin viscosidad, la energía en 1 es igual a la energía en 2; para un flujo real habría una pérdida de energía entre 1 y 2; en realidad no es energía pérdida, sino transformada en calor debido a la fricción (Rocha, 2008), lo anterior se muestra esquemáticamente en la figura No. 18.

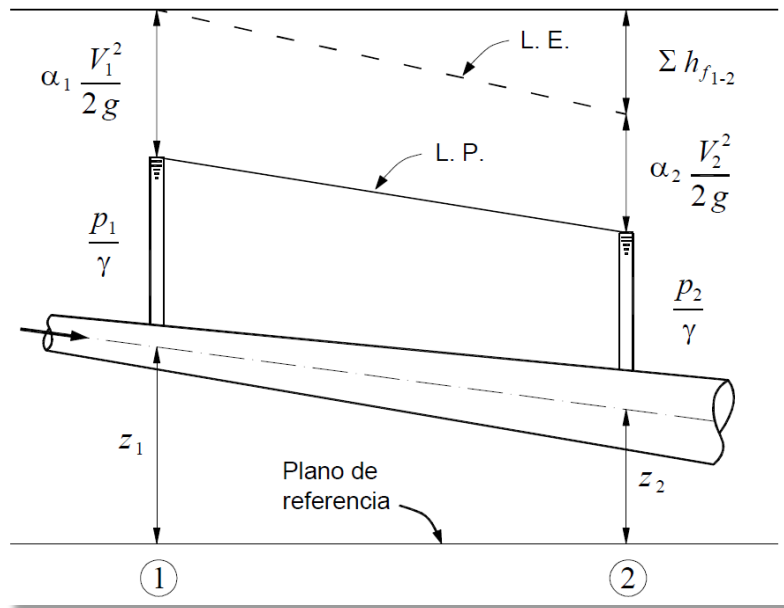


Figura No. 18 Ecuación de la energía en una tubería (Rocha, 2008).

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_{T\ 1-2} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

$z_1 - z_2 = H =$ diferencia de niveles

$\frac{p_2}{\gamma} =$ carga de presión

$\alpha \frac{V_2^2}{2g} =$ carga de velocidad

$\sum_1^2 h_{T\ 1-2} =$ pérdida total (pérdida de fricción y local)

Si aplicamos la ecuación de energía entre las secciones 1 y 2, donde α es el coeficiente de Coriolis, línea de energía (L.E.), línea piezométrica o línea de gradiente hidráulica (L.P.), ambos son paralelos y coinciden con la superficie libre para un líquido en reposo, obteniendo la ecuación No. 2.

Pérdidas por fricción (pérdidas por conducción)

Las pérdidas de fricción se presentan al desplazarse el agua por un conducto, originándose esfuerzos tangenciales que se oponen al movimiento debido a la influencia de las rugosidades, la viscosidad y la turbulencia (Guevara, 2011).

En 1857, la ecuación deducida por el ingeniero francés Henry Darcy y el ingeniero alemán Julios Weisbach, conocida como Darcy-Weisbach derivaron la ecuación de pérdida de fricción hf , proporcional a la carga de velocidad del flujo y la relación de la longitud al diámetro del conducto. Las pérdidas de fricción se calculan por medio de la fórmula de la ecuación general Darcy-Weisbach.

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

hf = pérdida por fricción en m

f = factor de fricción adimensional

D = diámetro en m

L = longitud del tubo en m

V = velocidad media en $\frac{m}{s}$

g = gravedad de $9.81 \frac{m}{s^2}$

La ecuación de Darcy-Weisbeach se utiliza para calcular la pérdida de energía de fricción en secciones rectilíneas y largas de tubos redondos, tanto para flujo laminar como turbulento; ambos flujos cambia el factor de fricción f , que es adimensional, esto depende de la rugosidad relativa ε/D y del número de Reynolds Re . Otras formas para determinarlo es mediante los trabajos de Hagen-Poiseuille, Blasius, Nikuradse, Prandtl y Von Karman, Colebrook-White todos respectos a los Re . Asimismo, Lewis F. Moody desarrollo un ábaco conocido como diagrama universal de Moody, donde es función de la rugosidad n , y el Re .

Pérdidas Locales (pérdidas menores o secundarias)

La pérdida local se presenta por los cambios de forma, dimensiones de los tramos rectos y curvos, dirección del flujo, separación y unión del flujo y presencias de controles (válvulas o compuertas). Esto es provocado generalmente por la alteración de la velocidad, sea magnitud o dirección.

La fórmula general de pérdida local se expresa:

$$h_l = K \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

h_l = pérdida de carga en m

K = coeficiente adimensional

$\frac{v^2}{2g}$ = la carga de velocidad en m

A continuación se presenta los valores del coeficiente K , de acuerdo con la ubicación y forma.

➤ Pérdida por entrada

“La entrada de las tuberías se produce una pérdida por el efecto de contracción que sufre la vena líquida y la formación de zonas de separación...” (Sotelo, 1997).

El coeficiente K , depende de las diferentes formas de entradas, como se observa en la figura No. 19.

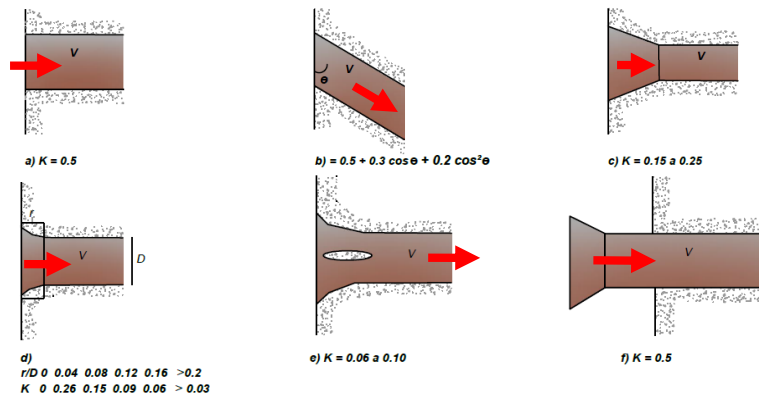


Figura No. 19 Coeficiente de pérdida por entrada en diferentes geometrías (Sotelo, 1997).

Cabe mencionar que una de las formas que tiene la menor pérdida es con una entrada elíptica. Este tipo de entrada depende de la sección circular o rectangular.

Si el tubo es circular la ecuación es:

$$\frac{x^2}{(0.5D)^2} + \frac{y^2}{(0.15D)^2} = 1 \dots\dots\dots (5)$$

La sección rectangular la ecuación es:

$$\frac{x^2}{H^2} + \frac{y^2}{(0.33H)^2} = 1 \dots\dots\dots (6)$$

Donde H es la dimensión vertical del conducto, para definir la forma del perfil superior e inferior.

➤ **Pérdida por rejilla**

La colocación de rejillas, tiene como función impedir la entrada de cuerpos sólidos a las tuberías, estructura conformado por barrotes horizontales y verticales apoyándose sobre los extremos de las estructuras dependiendo el diseño; esto dificulta la entrada del flujo, provocando pérdida de energía y el coeficiente varía por las condiciones (rejillas sumergidas y parcialmente).

✨ Para rejillas parcialmente sumergidas.

- Con el flujo normal al plano de la rejilla, es (fórmula de *Kirschmer*):

$$K = C_f (s/b)^{4/3} \text{sen} \theta \dots\dots\dots (7)$$

Donde:

C_f = coeficiente adimensional

En la figura No. 20 se muestra el significado de cada término de la fórmula anterior.

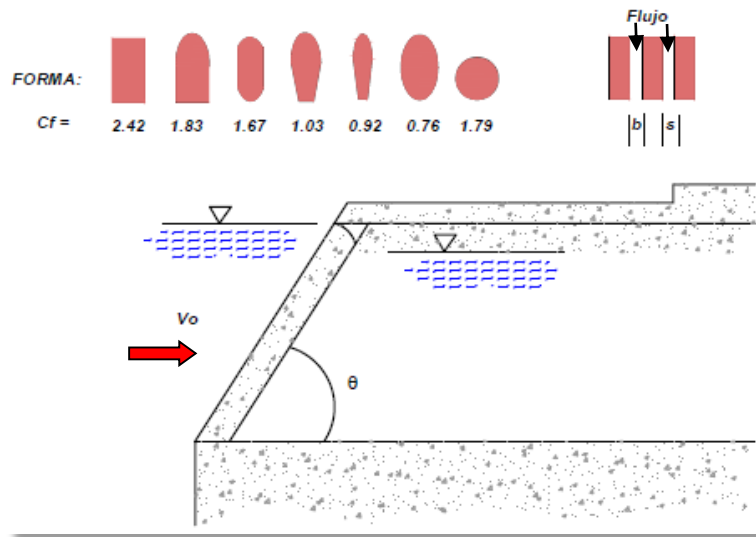


Figura No. 20 Coeficiente C_f y la relación de s/b para la fórmula de Kirschmer (Sotelo, 1997).

- Con el flujo no normal al plano de la rejilla, se utiliza la fórmula de Mosonyi:

$$K = K_* \beta \dots\dots\dots (8)$$

Donde:

K_* = coeficiente para flujo normal

β = coeficiente que depende del cociente $\frac{s}{b}$ y del ángulo δ

En ambos casos la velocidad V , de la ecuación general de la pérdida local, es la V_o , frente a las rejillas, como si estas no existieran.

✳ Para rejillas completamente sumergidas (fórmula de Creager).

$$K = 1.45 - 0.45 (A_n/A_b) - (A_n/A_b)^2 \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

A_n = área neta de paso entre rejillas;

A_b = área bruta de la estructura de rejillas

En este caso, la V de la ecuación general de la pérdida local es la velocidad neta V_n , a través de la rejilla.

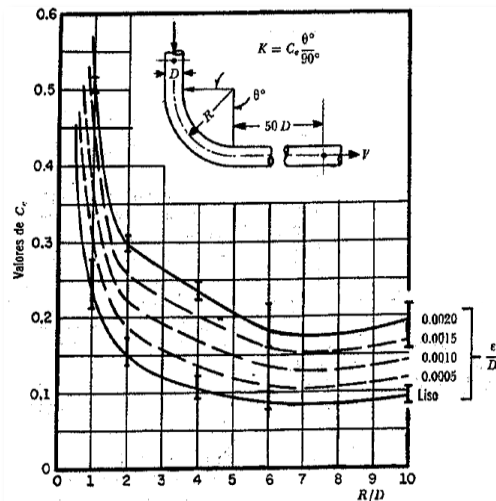
➤ **Pérdida por cambio de dirección**

El flujo por la inercia tiende a conservar un movimiento rectilíneo, al tener un cambio de dirección se modifica la distribución de velocidades y produce zonas de separación en el lado interior y aumentos de presión en el exterior. Para determinar el coeficiente K por los cambios de dirección, con ayuda de gráficas y fórmulas como se explica a continuación.

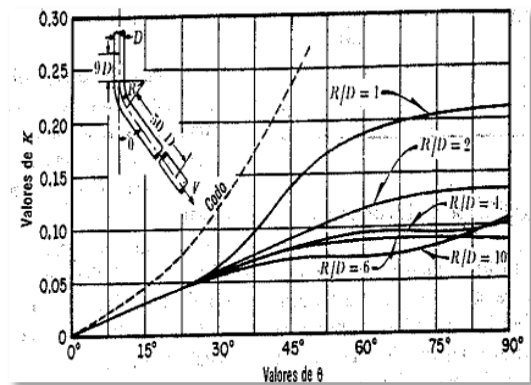
- ☀ Cambio de dirección *gradual* con una curva circular de radio medio R y rugosidad absoluta ϵ , para obtener el coeficiente de pérdida K se usa la gráfica de Hoffman, de la figura No. 21 a), tomando en cuenta la fricción en la curva, esto es:

$$K = c_c * \frac{\theta^\circ}{90^\circ} \dots\dots\dots (10)$$

- * Cambio de dirección por *tubo liso* y *tubos de gran diámetro* mediante la gráfica de Wasieliewski, de la figura No. 21 b).



a) Coeficientes C_c para curvas de diámetro constante y $R_e > 2.2 \times 10^5$ en tubos rugosos de Hoffman.



b) Coeficientes de pérdida en curvas de diámetro constante con superficie lisa y número de Reynolds de 2.25×10^5 de Wasieliewski.

Figura No. 21 Coeficiente por cambio de dirección de Hoffman y Wasieliewski (Sotelo, 1997).

Otros cambios de dirección de la conducción se presentan en ductos rectangulares (mediante la fórmula de Abramovich $K = 0.73CDE$), en tubos de menor diámetro, tipo brusco (depende del número de Reynolds), y de pequeños tramos rectos para tubos lisos y rugosos.

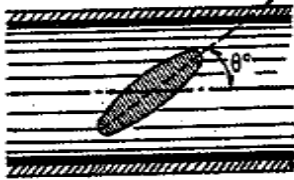
➤ **Pérdida por válvulas (mariposa y chorro hueco)**

“Los coeficientes de pérdidas por válvulas varían de acuerdo con el tipo y, para distintas posiciones, deben ser proporcionados por los fabricantes” (Ídem).

Cuando no son proporcionados estos valores para diseñar, se deben utilizar los que están presentados en libros o artículos en la sección de pérdidas locales con válvulas. A continuación se explica la válvula de mariposa y chorro hueco.

☀ Válvula de Mariposa (lenteja):

El coeficiente K , considerando el ángulo θ° , se obtiene de la tabla No. 1.



θ°	K	A/A_0
5	0.24	0.913
10	0.52	0.826
15	0.90	0.714
20	1.54	0.658
25	2.51	0.577
30	3.91	0.500
35	6.22	0.426
40	10.8	0.357
45	18.7	0.293
50	32.6	0.234
55	58.8	0.181
60	118	0.124
65	256	0.094
70	751	0.06
90	∞	0

Tabla No. 1 Coeficiente de pérdida para válvula de mariposa (Sotelo, 1997).

Si la válvula está completamente abierta entonces usar:

$$K = t/d \dots\dots\dots (12)$$

Donde:

t = espesor de la hoja

d = diámetro

☀ Válvula de chorro hueco:

Para este tipo de válvula cuya función es el control del gasto Q en tuberías de gran diámetro; el gasto se obtiene mediante la ecuación:

$$Q_{m\acute{a}x} = C_d * \frac{\pi D^2}{4} * \sqrt{2gH} \dots\dots\dots (13)$$

Donde:

$Q_{m\acute{a}x}$ = gasto máximo m^3/s ;

C_d = coeficiente (varía por el fabricante);

D = diámetro a la entrada de la válvula, en m ;

H = energía total antes de la válvula

Algunos valores del coeficiente C_d para válvulas totalmente abierta, son: la firma alemana Voith $C_d = 0.808$; la firma norteamericana U.S. Morgan Smith $C_d = 0.85$; el U.S. Bureau of Reclamation $C_d = 0.70$ (Sotelo, 1997).

Para la empresa Glenfield $C_d = 0.83$ (Glenfield, 2006); la empresa Rodney Hunt $C_d = 0.85$ en válvulas Howell-Bunger y $C_d = 0.78$ en válvulas Ring Jet (Rodney, 2012).

➤ **Pérdida por bifurcación**

La pérdida por bifurcación (Sotelo, 1997), explica que “la pérdida de energía en una bifurcación de conductos depende además del ángulo que forman la tubería secundaria con la maestra de la relación entre los diámetros de ambas tuberías y de la dirección de la corriente. Dicha pérdida es mayor en la unión que en la bifurcación y se expresa como un porcentaje de la carga de velocidad, lo que demuestra que el coeficiente K es independiente del número de Reynolds” (pág. 314).

Los diseños de bifurcación son: por separación y unión. En la primera separa un conducto principal en dos partes, y el gasto se divide en dos; la segunda consiste en unir dos conductos para formar un conducto. En ambos casos, su análisis se emplea la ecuación de la energía, y para obtener el gasto y velocidad con las ecuaciones siguientes.

$$Q = Q_a + Q_a, \quad V = \frac{4D}{\pi D^2} \dots\dots\dots (14)$$

En obras hidroeléctricas se emplean principalmente las bifurcaciones simétricas, como se muestra en la figura No. 22.

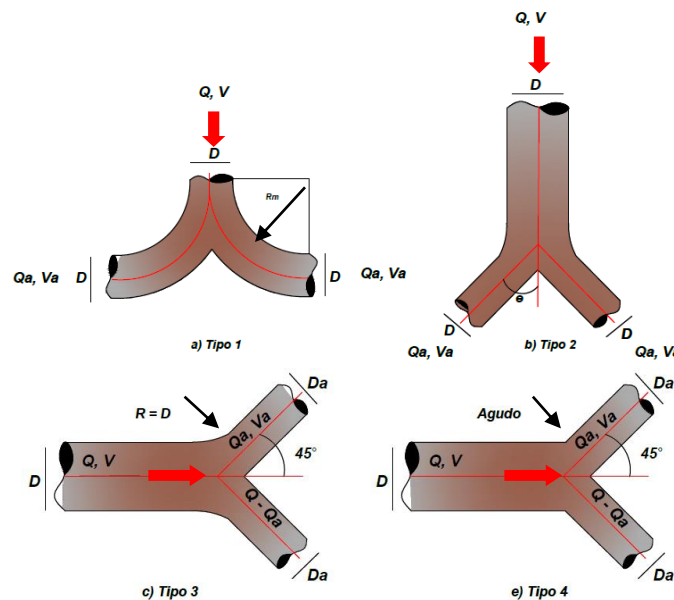


Figura No. 22 Bifurcaciones simétricas (Sotelo, 1997).

En la bifurcación de *tipo 1*, observando la figura anterior, donde $D =$ constante, presenta una distribución simétrica del gasto ($Q_a/Q_a = 0.5$), los coeficientes de

pérdida se obtiene de las siguientes ecuaciones No. 15, se obtienen de la tabla No. 2.

$$h = K_a * \frac{v^2}{2g} \quad \text{o} \quad h = K'_a * \frac{v_a^2}{2g} \dots\dots\dots (15)$$

En la bifurcación de *tipo 2*, observando la misma figura anterior, y de la tabla No. 2 se obtienen los valores de θ .

Tipo 1			Tipo 2		
R_m/D	K_a	K'_a	θ	K_a	K'_a
0.50	1.10	4.4	10°	0.1	0.4
0.75	0.60	2.4	30°	0.3	1.2
1.00	0.40	1.6	45°	0.7	2.8
1.5	0.25	1.0	60°	1.0	4.0
2.0	0.20	0.8	90°	1.4	5.6

Tabla No. 2 Coeficiente de pérdida para las bifurcaciones tipos 1 y 2 (Sotelo, 1997).

En la bifurcación de *tipo 3 y 4*, continuando con la misma figura No. 22 y de la tabla No. 3 se obtienen los coeficientes de pérdidas.

Tipo	D_a/D	Q_a/Q_d	0.5	1.0
3	1	K_a	0.40	0.30
		K'_a	1.60	0.30
	0.707	K_a	0.40	0.85
		K'_a	0.40	0.21
4	1	K_a	0.55	0.50
		K'_a	2.20	0.50
	0.707	K_a	0.75	1.35
		K'_a	0.75	0.34

Tabla No. 3 Coeficiente de pérdida para las bifurcaciones tipos 3 y 4 (Sotelo, 1997).

Existen otros tipos de pérdidas locales por ejemplo: las pérdidas por reducción, ampliación, válvulas, entre otros.

3.2 Capacidad de descarga

Conducto sencillo

El conducto sencillo también llamada tubería simple, consiste en tener un solo conducto considerando un depósito o bomba que sustenta al conducto localizado en aguas arriba, y descargar en otro depósito o al aire libre. En su trayecto para este tipo de conducto tendrá diferentes tipos de pérdidas locales h_l (entrada, rejilla, codo, etc.); así como pérdidas de fricción h_f (tramos con acabado de concreto, acero, tierra, etc.).

En la figura No. 23 se muestra el comportamiento hidráulico de un conducto sencillo, donde se analiza únicamente la entrada a la zona de válvula; despreciando la ampliación, tramo 2, la reducción, zona de transición y salida.

Para analizar el funcionamiento hidráulico se aplica las ecuaciones No. 1 y 2. Con la ecuación No. 1 se determina una estabilidad del gasto con respecto a la entrada y salida del conducto; después se determina la pérdida de energía entre la superficie libre del embalse a la zona de válvula, para este caso el coeficiente $\alpha = 1$.

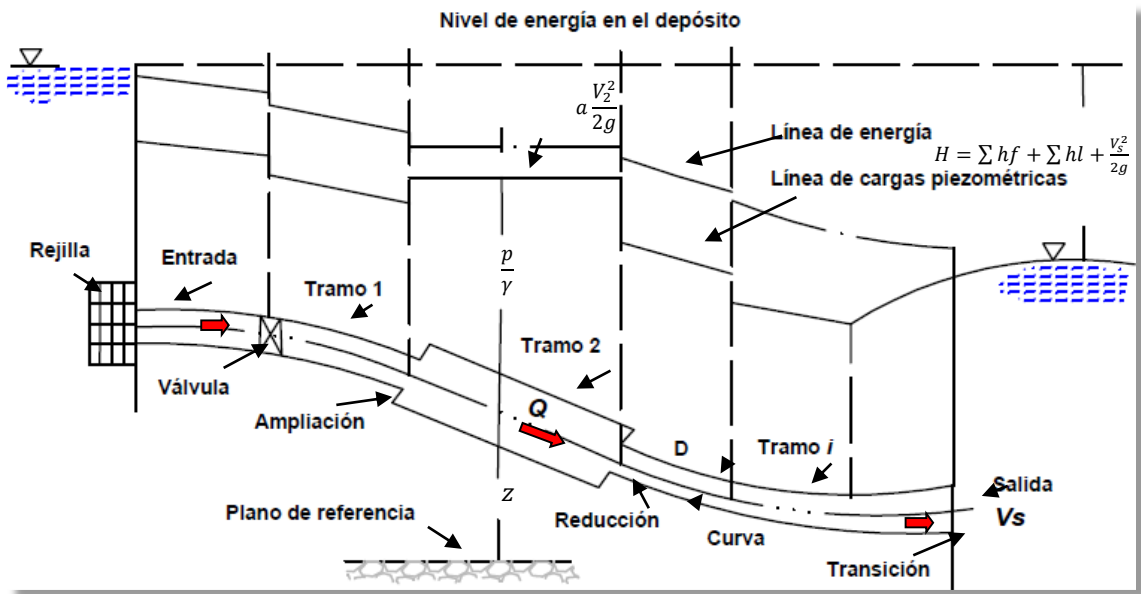


Figura No. 23 Conducto sencillo (Sotelo, 1997).

Con la aplicación de la ecuación de continuidad de la entrada hasta la salida de la figura anterior.

$$Q = V_i A_i \dots \dots \dots (1)$$

De igual forma con la ecuación de energía aplicada a la misma figura.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_f + \sum_1^2 h_l \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

$$\sum_1^2 h_f = \text{suma de las pérdidas de fricción};$$

$$\sum_1^2 h_l = \text{suma de pérdida locales}.$$

De lo anterior, tenemos el embalse en aguas arriba y considerando en este caso que no hay un depósito en aguas abajo, sino es una descarga libre hacia el

cauce. Entonces obtenemos que el desnivel H se mide con la diferencia de los niveles de la superficie libre del embalse y el eje del conducto de salida (puede ser libre o tener una zona de control mediante válvulas o compuertas). El desnivel H , queda con una expresión.

$$H = \sum hf + \sum hl + \frac{V_s^2}{2g} \dots\dots\dots (16)$$

Donde:

$$\frac{V_s^2}{2g} = \text{es la carga de velocidad de la sección final del conducto.}$$

Con este análisis, se conoce el desnivel H , la geometría y la rugosidad; desconociendo la zona de flujo (laminar, transición, o turbulento) en la que trabaja el conducto; y se demuestra que la velocidad y los coeficientes de pérdidas son incógnitas. Luego, de la ecuación no. 2, obtenemos.

$$H = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) = \frac{V_s^2}{2g} + \sum_1^2 h_f + \sum_1^2 h_l \dots\dots\dots (17)$$

De tal manera, para considerar las pérdidas de fricción (Darcy-Weisbach) y locales, sustituimos en la ecuación no. 17, obteniendo.

$$H = \frac{V_s^2}{2g} + \left(\frac{f_1 L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + \frac{f_2 L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} + \dots \right) + \left(K_1 \frac{V_1^2}{2g} + K_2 \frac{V_2^2}{2g} + \dots \right) \dots\dots\dots (18)$$

Siguiendo con la aplicación de la ecuación de continuidad, resulta.

$$Q = V_s A_s = V_i A_i \dots\dots\dots (1)$$

$$H = \frac{V_s^2}{2g} \left(1 + \frac{f_1 L_1}{D_1} \frac{A_s^2}{A_1^2} + \frac{f_2 L_2}{D_2} \frac{A_s^2}{A_2^2} + \dots + K_1 \frac{A_s^2}{A_1^2} + K_2 \frac{A_s^2}{A_2^2} + \dots \right) \dots\dots\dots (19)$$

Y despejando la velocidad de salida V_s , vemos que:

$$V_s = \sqrt{\frac{2g \cdot H}{1 + \sum_{i=1}^{n=s} \left(\frac{f_i L_i A_s^2}{D_i A_i^2} + K_i \frac{A_s^2}{A_i^2} \right)}} \dots\dots\dots (20)$$

Entonces al conocer la rugosidad n , y el diámetro D , se puede estimar un valor para cada f_i mediante el diagrama de Moody, puede consultarse en el libro de Sotelo, pág. 282 y así como K_i .

Después de obtener la V_s , se determina el gasto Q .

$$Q = V_s A_s \dots\dots\dots (21)$$

Donde:

$$Q = \text{gasto en } \frac{m^3}{s}$$

$$V_s = \text{velocidad de salida} \frac{m}{s}$$

$$A_s = \text{área de salida} m^2$$

Posteriormente se obtiene la velocidad V_i .

$$V_i = \frac{4Q}{\pi D_i} \dots \dots \dots (22)$$

Con los números de Reynolds (Re), se obtiene nuevos valores f_i . El proceso se repite para obtener por cada tramo del conducto e ir comprobando.

3.3 Análisis numérico

Para un buen funcionamiento hidráulico, se debe analizar el comportamiento del flujo a lo largo de toda la estructura del conducto, donde un conducto a presión, se debe tener sus líneas fundamentales (energía estática, energía dinámica y presión). Al respecto Rodríguez (2008), afirma que la energía estática se comporta de forma horizontal; la energía dinámica y presión de forma vertical dando origen la energía cinética $v^2/2g$ y la combinación de la energía estática y dinámica conforma la integral de la pérdida de carga $\int K v^2 dL$ a cada sección. La importancia de la demanda y suministro de aire, es parte esencial para el funcionamiento hidráulico del conducto.

A continuación se presenta una síntesis del cálculo hidráulico del desagüe de fondo "La Yesca". El funcionamiento hidráulico se considera a partir de las elevaciones 431.76 msnm al 518.00 msnm (NAMINO) como operación normal; para la operación extraordinario hasta el NAMO con una elevación de 575.00 msnm; el comportamiento del conducto a presión debe ser superior a la 442.00 msnm y si el nivel se encuentra entre la elevación de 442.00 msnm a 431.76 msnm, su comportamiento funciona como un canal.

- ✳ Determinación de diámetros, longitudes, coeficientes de fricción.

Datos de la primera parte, de la bocatoma a la bifurcación.

La **Longitud** de la sección circular, es

$$L1 = 278.1 m$$

Con un **diámetro** constante, es

$$D1 = 5 m$$

El **área** de la sección circular, es

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 5^2}{4} = 19.63 m^2$$

Donde el **perímetro** de la sección circular, es

$$P = \pi * D = \pi * 5 = 15.71 m$$

Y un **Radio hidráulico** de la misma sección anterior, obteniendo

$$Rh = \frac{D}{4} = \frac{5}{4} = 1.25 \text{ m}$$

De los datos de la segunda parte, la bifurcación al eje de salida de la válvula de chorro divergente.

La **Longitud** de la sección circular, es

$$L2 = 16.6 \text{ m}$$

Con un **diámetro** constante, de

$$D2 = 2.5 \text{ m}$$

El **área** de la sección circular, es

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 2.5^2}{4} = 4.91 \text{ m}^2$$

Con un **perímetro** de la sección circular, es

$$P = \pi * D = \pi * 2.5 = 7.85 \text{ m}$$

Y un **Radio hidráulico** de la misma sección anterior, obteniendo

$$Rh = \frac{D}{4} = \frac{2.5}{4} = 0.625 \text{ m}$$

En resumen:

Diámetros, longitudes, coeficientes				
Elemento	Conducción aguas arriba		Coeficientes k (pérdidas locales)	
	(bocatoma a bifurcación)	(bifurcación a válvulas)		
Longitud	278.1 m	16.6 m	k rejilla	0.268
Diámetro (D)	5 m	2.5 m	k entrada	0.25
Área (A)	19.63 m ²	4.91 m ²	k codo	0.20
Perímetro (P)	15.71 m	7.85 m	k bifurcación	0.05
Radio hidráulico (Rh)	1.25 m	0.625 m	k mariposa	0.05
Manning n (concreto y acero)	0.012 mm	0.014 mm	Cd (fabricante)	0.85

Tabla No. 4 Resumen de diámetros, longitudes y coeficientes (CFE, 2011).

En la siguiente figura No. 24 se visualiza a detalle los datos de la tabla anterior y la distribución de las partes que integran el desagüe de fondo.



Figura No. 24 Distribución del desagüe de fondo.

☀ Determinar la velocidad de salida V_s , y la pérdida total h_T ,

Con el siguiente esquema se limita el estudio, donde se coloca los datos que se requieren y facilita el análisis hidráulico del desagüe, figura No. 25.

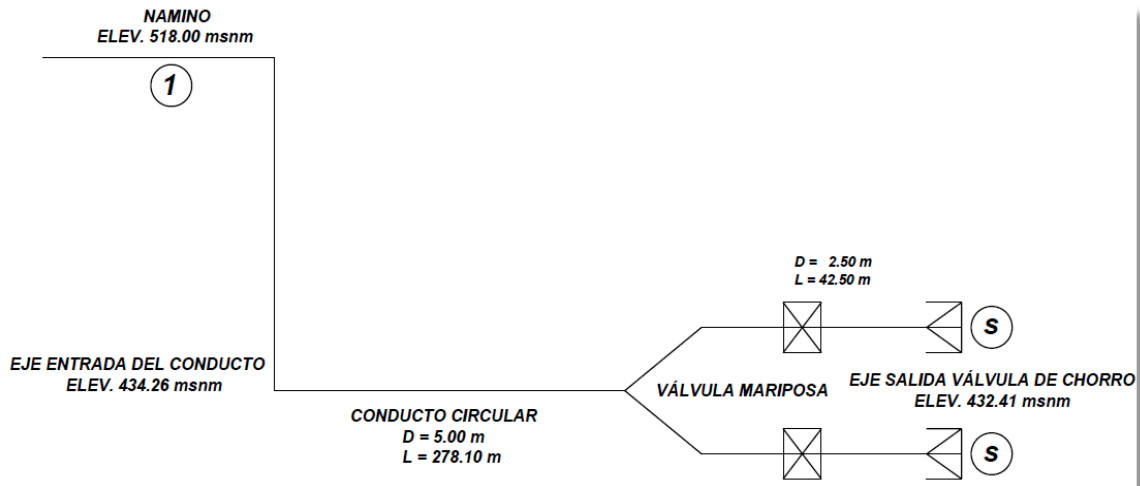


Figura No. 25 Diagrama del desagüe de fondo.

Aplicando la **ecuación de la energía**, con respecto al NAMINO y el eje de salida de la válvula de chorro divergente, se obtiene:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_s + \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + \sum_1^s h_f + \sum_1^s h_l \dots\dots\dots (22)$$

$$\sum_1^s h_T = \sum_1^s h_f + \sum_1^s h_l$$

$$(z_1 - z_s) = \frac{V_s^2}{2g} + \sum_1^s h_T \dots\dots\dots (23)$$

La pérdida total h_T , es la sumatoria de las pérdidas de fricción h_f (Darcy-Weisbach) y pérdidas locales h_l , se expresa:

$$\sum_1^s h_T = \frac{f_1 L_1 V_1^2}{D_1 2g} + \frac{f_2 L_2 V_2^2}{D_2 2g} + \dots + K_1 \frac{V_1^2}{2g} + K_2 \frac{V_2^2}{2g} + \dots \dots\dots (24)$$

y debido a la **ecuación de continuidad**, $Q = V_1 A_1 = 2V_s A_s$

$$V_1 = \frac{2V_s A_s}{A_1} ;$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{V_s^2}{2g} \frac{4A_s^2}{A_1^2} \dots\dots\dots (25)$$

Entonces:

$$\sum_{i=1}^{n=s} h_T = \frac{f_1 L_1}{D_1} \frac{4A_s^2}{A_1^2} + \frac{f_2 L_2}{D_2} \frac{4A_s^2}{A_2^2} + \dots + K_1 \frac{4A_s^2}{A_1^2} + K_2 \frac{4A_s^2}{A_2^2} + \dots = \frac{f_i L_i}{D_i} \frac{4A_s^2}{A_i^2} + K_i \frac{4A_s^2}{A_i^2} \dots (26)$$

Si simplificamos la ecuación No. 26 a, obtenemos

$$(z_1 - z_s) = (1 + \sum_{i=1}^{n=s} h_T) \frac{V_s^2}{2g} \dots\dots\dots (27)$$

$$H = z_1 - z_s$$

Posteriormente, despejando la ecuación No. 27, la velocidad de salida V_s , y sustituyendo H , corresponde a

$$V_s = \sqrt{\frac{2g*H}{1 + \sum_{i=1}^{n=s} h_T}} \dots\dots\dots (28)$$

Obteniendo la pérdida total $\sum_{i=1}^{n=s} h_T$, observamos que:

$$\sum_{i=1}^{n=s} h_T = K_{rejilla} \frac{4A_s^2}{A_1^2} + K_{entrada} \frac{4A_s^2}{A_2^2} + K_{codo} \frac{4A_s^2}{A_2^2} + K_{bifurcación} \frac{4A_s^2}{A_i^2} + K_{v.mariposa} \frac{4A_s^2}{A_i^2} + \frac{f_1 L_1}{D_1} \frac{4A_s^2}{A_1^2} Cc + \frac{f_i L_i}{D_i} \frac{4A_s^2}{A_i^2} Ca \dots\dots\dots (29)$$

Cc conducto de concreto
Ca conducto de acero

o bien, se simplifica la ecuación No. 29 a

$$\sum_{i=1}^n h_T = h_{rejilla} + h_{entrada} + h_{codo} + h_{bifurcación} + h_{v.mariposa} + h_{fricción D=5} + h_{fricción D=2.5} \dots\dots\dots (30)$$

De donde se obtuvo una pérdida total h_T , de

$$\sum_{i=1}^n h_T = 0.499$$

Determinando la carga bruta H , resulta

$$H = \text{elev. del NAMINO} - \text{elev. del eje de la válvula de chorro}$$

$$H = 518 - 432.41 = 85.59 \text{ m}$$

Sustituyendo valores en la ecuación No. 28, donde $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, se tiene:

$$V_s = \sqrt{\frac{2 * 9.81 * 85.59}{1 + 0.499}} = 33.47 \frac{m}{s}$$

Despejando la pérdida total h_T , de la ecuación No. 23:

$$(z_1 - z_s) = \frac{V_s^2}{2g} + \sum_1^s h_T \dots\dots\dots (23)$$

$$H = z_1 - z_s$$

ésta resulta ser,

$$h_T = H - \frac{V_s^2}{2g} = 85.59 - \frac{33.47^2}{2 * 9.81} = 28.49 \text{ m}$$

En resumen, es:

Velocidad de salida V_s y pérdida total h_T , sin válvula de chorro				
Elevación NAMINO	Eje de conducción de salida	Carga Bruta H	V_s	h_T
518 msnm	432.41 msnm	85.59 m	33.47 m/s	28.49 m

Tabla No. 5 Resumen de velocidad y pérdida, sin válvula de chorro (CFE, 2011).

Comprobación de las pérdidas de cada tramo y accesorios, sin válvula de chorro divergente:

$$\sum_{i=1}^n K = K_{rejilla} \frac{A_s^2}{A_1^2} + K_{entrada} \frac{A_s^2}{A_2^2} + K_{codo} \frac{A_s^2}{A_2^2} + K_{bifurcación} \frac{A_s^2}{A_1^2} + K_{mariposa} \frac{A_s^2}{A_1^2} + \frac{f_1 L_1}{D_1} \frac{A_s^2}{A_1^2} Cc + \frac{f_1 L_1}{D_1} \frac{A_s^2}{A_i^2} Ca \dots\dots\dots (31)$$

Cc conducto de concreto
 Ca conducto de acero

Teniendo la velocidad de conducción $V_{cond} = 16.74 \text{ m/s}$, ahora determinamos las pérdidas por tramo y comprobar. Sin considerar las válvulas de chorro divergente.

1.- REJILLA		2.- ENTRADA		3.- CODO		4.- BIFUR.		5.- MARIPOSA		6.- FRICCIÓN D=5m		7.- FRICCIÓN D=2.5m		TOTAL
K_{coef}	0.268	K_{coef}	0.25	K_{coef}	0.20	K_{coef}	0.05	K_{coef}	0.05	n	0.012	n	0.014	
$K_{pérd}$	3.00	$K_{pérd}$	3.57	$K_{pérd}$	2.86	$K_{pérd}$	2.86	$K_{pérd}$	2.86	$K_{pérd}$	8.33	$K_{pérd}$	5.01	28.47

Tabla No. 6 Pérdidas por accesorios.

- ✳ Después se determina el gasto de salida Q_s , considerando la válvula de chorro divergente, localizado al final de la conducción de la sección circular; para el coeficiente de descarga Cd , propuesto por el fabricante.

El gasto, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$Q_s = 0.85 * \frac{\pi D^2}{4} * \sqrt{2gH_{NETA}} \dots\dots\dots (32)$$

Donde:

$$Q = \text{caudal en } \frac{m^3}{s}$$

$Cd = 0.85$ por el fabricante

$D =$ diámetro en m

$g =$ gravedad $9.81 \frac{m}{s^2}$

$H_{NETA} =$ carga neta en m

$H_{NETA} = H_{BRUTA} - \Delta H =$ carga bruta – pérdidas

$$H_{NETA} = 85.59 - 28.48 = 57.11 \text{ m}$$

Sustituyendo términos, donde $D = 2.5 \text{ m}$ y obteniendo el gasto de salida Q_s , por una válvula:

$$Q_s = 0.85 * \frac{\pi * 2.5^2}{4} * \sqrt{2 * 9.81 * 57.11}$$

$$Q_s = 139.67 \frac{m^3}{s}$$

y el gasto total Q_{Total} , con las dos válvulas.

$$Q_{TOTAL} = 279.34 \frac{m^3}{s}$$

Con la ecuación de continuidad, y el despeje de la velocidad V , tenemos

$$Q = AV ;$$

$$V = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (33)$$

De los datos obtenidos, se determina en la zona de válvula la velocidad con válvula de chorro ($V_{válvula \text{ cvc}}$) con diámetro de 2.5 m y la velocidad de conducción con válvula de chorro ($V_{conducción \text{ cvc}}$) con diámetro de 5 m, igual a:

$$V_{válvula \text{ cvc}} = \frac{279.34}{\frac{\pi * 2.5^2}{4}} = \frac{56.90}{2} = 28.45 \frac{m}{s}$$

$$V_{\text{conducción cvc}} = \frac{279.34}{\frac{\pi * 5^2}{4}} = 14.23 \frac{m}{s}$$

cvc con válvula de chorro

En resumen, es:

Gasto por válvula, total y velocidad con diámetro 5 m y 2.5 m, con válvula de chorro			
Gasto de salida Q_s	Gasto total Q_{total}	Velocidad de la zona de válvula $V_{\text{zona válvula } D=2.5 m}$	Velocidad de la conducción $V_{\text{conducción } D=5 m}$
139.67 m ³ /s	279.34 m ³ /s	28.45 m/s	14.23 m/s

Tabla No. 7 Gastos por válvula, total y velocidad con válvula de chorro.

Con los datos anteriores, se realiza la comprobación de las pérdidas de cada tramo y accesorios, con válvula de chorro divergente:

$$\sum_{i=1}^n K = K_{\text{rejilla}} \frac{A_s^2}{A_1^2} + K_{\text{entrada}} \frac{A_s^2}{A_2^2} + K_{\text{codo}} \frac{A_s^2}{A_2^2} + K_{\text{bifurcación}} \frac{A_s^2}{A_1^2} + K_{\text{mariposa}} \frac{A_s^2}{A_1^2} + \frac{f_1 L_1}{D_1} \frac{A_s^2}{A_1^2} Cc + \frac{f_1 L_1}{D_1} \frac{A_s^2}{A_i^2} Ca \dots (34)$$

*Cc conducto de concreto
Ca conducto de acero*

Teniendo la velocidad de salida V_s , determinamos las pérdidas por tramo y comprobamos. Considerando las válvulas de chorro divergente:

1.- REJILLA		2.- ENTRADA		3.- CODO		4.- BIFUR.		5.- MARIPOSA		6.- FRICCIÓN D=5m		7.- FRICCIÓN D=2.5m		TOTAL
Kcoef	0.268	Kcoef	0.25	Kcoef	0.20	Kcoef	0.05	Kcoef	0.05	n	0.012	n	0.014	
Kpérd	2.76	Kpérd	2.58	Kpérd	2.06	Kpérd	2.06	Kpérd	2.06	Kpérd	6.01	Kpérd	3.61	21.17

Tabla No. 8 Pérdidas considerando las válvulas de chorro divergente.

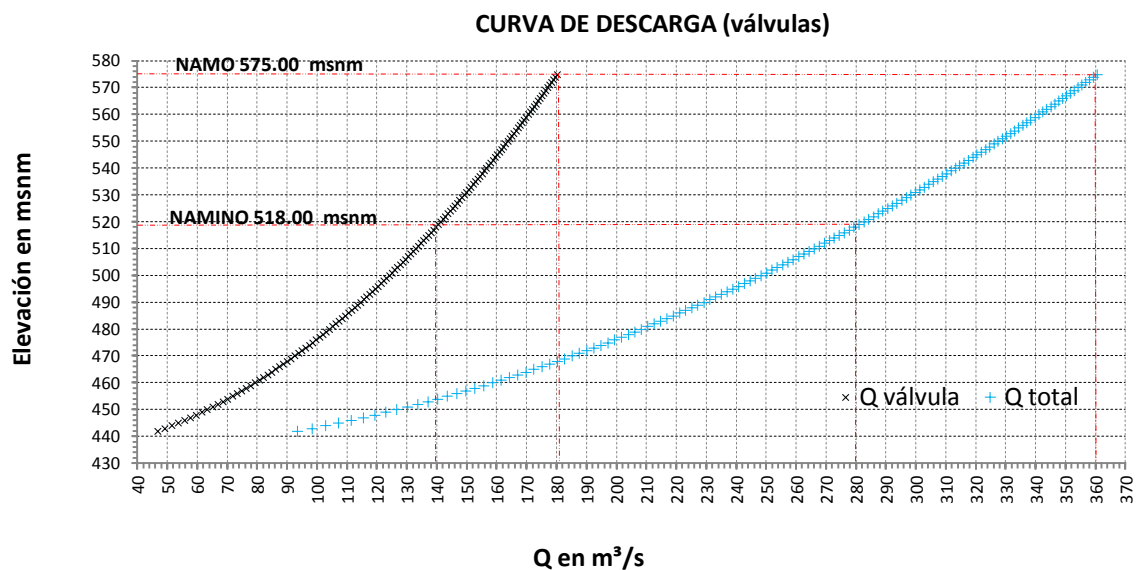
- ✳ Del resultado anterior se toma como máxima elevación 518.00 msnm, y se realiza operaciones regresivas hasta la mínima elevación de 442.00 msnm, tomados esta elevación para considerar la presión, y entre la elevación de 442.00 msnm a 431.76 msnm, la descarga funciona como un canal.

Elevación	Carga h	Vel. salida	Q válvula	Q total	Pérdida total
575 (NAMO)	142.59	43.20	180.25	360.51	47.47
...					
518 (NAMINO)	85.59	33.47	139.65	279.31	28.49
517	84.59	33.27	138.83	277.67	28.16
516	83.59	33.08	138.01	276.02	27.83

515	82.59	32.88	137.18	274.37	27.49
514	81.59	32.68	136.35	272.70	27.16
513	80.59	32.48	135.51	271.02	26.83
512	79.59	32.28	134.67	269.34	26.49
511	78.59	32.07	133.82	267.64	26.16
510	77.59	31.87	132.97	265.93	25.83
...					
450	17.59	15.17	63.31	126.62	5.86
449	16.59	14.74	61.48	122.97	5.52
448	15.59	14.28	59.60	119.20	5.19
447	14.59	13.82	57.66	115.32	4.86
446	13.59	13.34	55.65	111.30	4.52
445	12.59	12.84	53.56	107.12	4.19
444	11.59	12.32	51.39	102.78	3.86
443	10.59	11.77	49.12	98.25	3.53
442	9.59	11.20	46.75	93.49	3.19

Tabla No. 9 Resultados del gasto de elevación 442.00 a 518.00 msnm.

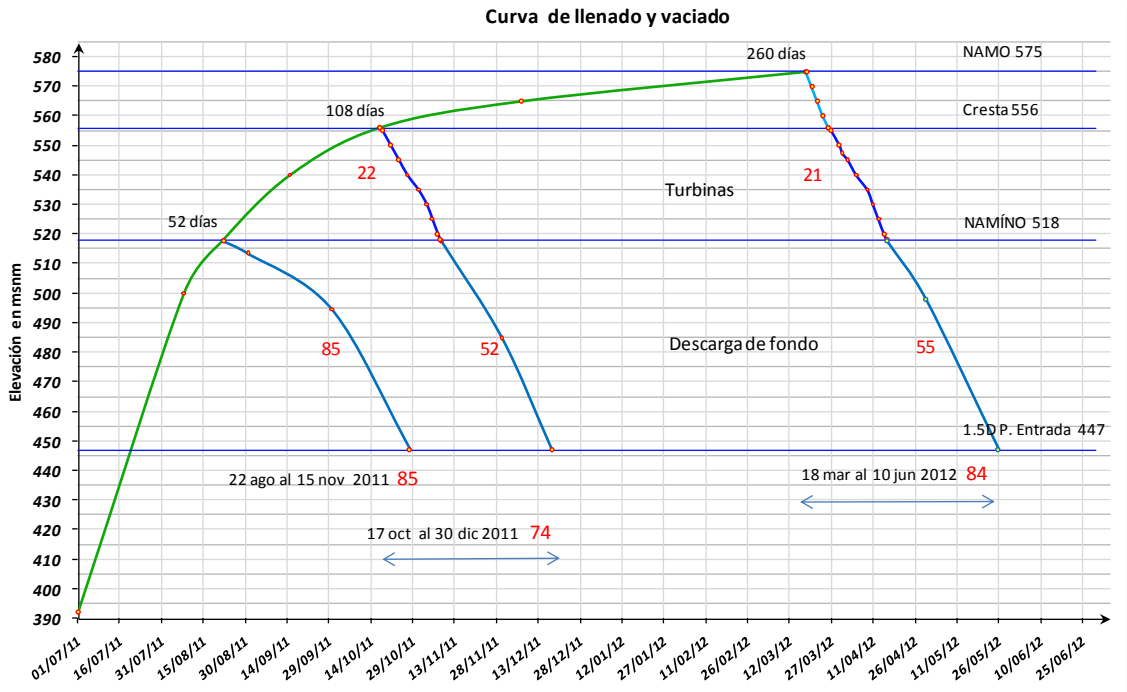
Con los datos obtenidos de la tabla No. 9 se construyó la gráfica de la curva gasto-descarga de las válvulas, se tiene:



Gráfica No. 1 Curva de gasto-descarga mediante las válvulas.

De la gráfica anterior se visualiza el comportamiento de la descarga mediante una y dos válvulas, esto considerando el gasto y la elevación. Con la capacidad de descarga de una válvula inicia con un gasto de 46.8 m³/s y termina con 139.65 m³/s; al emplear la descarga con las dos válvulas de chorro inicia con 93.5 m³/s y termina a 279.3 m³/s; una descarga máxima al NAMO con un gasto total de 360.51 m³/s.

☀ En base a los estudios hidrológicos, con el escurrimiento de todo el año (húmedo, medio y seco), y considerando la elevación del embalse y el funcionamiento del vertedor, turbinas y la descarga de fondo, se obtiene la siguiente gráfica de curva de llenado y vaciado (reporte hidráulico-memoria de cálculo, 2010).



Gráfica No. 2 Curva de llenado y vaciado del desagüe (CFE, 2010).

En la gráfica No. 2 se observa a detalle el comportamiento del llenado del embalse, así como la descarga mediante el desagüe de fondo, turbinas y vertedores. Especifica los días, fecha y elevación del llenado, e igual forma en el vaciado del embalse.

En la selección de los diámetros de la descarga de fondo, fue mediante un análisis de diferentes diámetros de la conducción, costos en material (tubería y concreto) y excavación; así como gastos, velocidades que realizó la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Con la comparación de los resultados se seleccionó un total promedio, donde se determinó un diámetro de 5.00 m para la conducción, así como las válvulas de mariposa y chorro hueco en 2.5 m.

Para concluir, este capítulo podemos decir que fue satisfactorio en todo su desarrollo y los resultados obtenidos nos llevan a otro paso de estudio en la cual es importante recalcar, ciertos pasos de análisis no se presentan por privacidad de información de la CFE. En base de estos resultados teóricos se diseñan los modelos físico y matemático, en ver su funcionalidad y modificar si es necesario la geometría con respecto a una parte o toda la estructura de la descarga de fondo.

CAPÍTULO IV

MODELO FÍSICO



CAPÍTULO IV: MODELO FÍSICO

4.1 Conocimientos teóricos en modelos físicos

Una de las tareas de todo el ingeniero es dar soluciones factibles a problemas ingenieriles, algunas veces son sencillas y otras complejas, o aún desconocidas; y dentro de las solo complejas se encuentra el análisis del comportamiento hidráulico del flujo utilizando para diferentes tipos de obras hidráulicas, y su solución se conceptualiza y esquematiza el problema, después se selecciona la técnica o las fórmulas matemáticas, con el propósito de hacer una modelación, entiendo el termino modelo como un sistema que simula un objeto real llamado prototipo (Vergara, 1995); en donde se puede observar el comportamiento del agua y sus variaciones, para así obtener mejores resultados en el diseño, y por ende construir obras eficientes, durables y económicas; evitando riesgos de operación y ejecución, para tener una máxima seguridad.

Para ello, los modelos utilizados en hidráulica se clasifican en tres tipos:

1. *Matemáticos*: tiene solución matemática de las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno hidráulico, es decir, es numérico, con factores de exactitud de los datos iniciales, como el tipo de fenómeno a estudiar, exactitud en las ecuaciones que rige el fenómeno, perfeccionamiento del modelo y aproxima las ecuaciones.
2. *Analógicos*: este tipo de modelos se necesita el conocimiento de las ecuaciones y condiciones que rige el proceso, no es una representación detallada del sistema real, sino que refleja la estructura de relaciones y determina las propiedades de la realidad, con un modelo con apariencia física distinta al original, como un comportamiento representativo.
3. *Modelo físico*: son construcciones en escala reducida o simplificada de obras, maquinas o sistemas de ingeniería para analizar su comportamiento y perfeccionar los diseños, también conocido como *modelo hidráulico*.

Este último, es en el que nos enfocaremos, por el objeto de estudio del presente trabajo. Al respecto, Castillo (2011: 67) asegura que, “la modelación física tiene como fin reproducir a escala reducida fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua. Y además lograr que las magnitudes físicas o hidrodinámicas en el modelo hidráulico correspondan a las magnitudes en la naturaleza, bajo determinadas leyes”.

Por otro lado, lo referente a la **semejanza hidráulica** (conocida también como condiciones de semejanza), es importante, y se deduce entre modelo y prototipo; permiten que trabajen de manera semejante para obtener resultados confiables. Esta similitud permita hacer ensayos sobre modelos y referir los resultados

obtenidos al dispositivo real llamado prototipo; para lo cual deben satisfacerse las condiciones de similitud geométrica, cinemática y dinámica:

- a) La *similitud geométrica* en el flujo, tanto en el modelo como en el prototipo, deben cumplir la igualdad de sus dimensiones geométricas; es decir, la relación de longitud, área y volumen deben ser homólogos; lo que implica para cualquier longitud L_e , igual a la longitud de prototipo L_p , entre la longitud del modelo L_m , lo que se denomina escala de longitudes ($Le = L_p/L_m$).
- b) La *similitud cinemática* que existe entre modelo y el prototipo, es para que exista una trayectoria de las partículas móviles, en otras palabras son las velocidades de las partículas, ambos homólogos y constantes, esto se denomina escala de velocidades ($Ve = V_p/V_m$); y se forma de la escala de líneas y escala de tiempos ($te = t_p/t_m$).
- c) La *similitud dinámica* es la relación entre prototipo-modelo, es cuando dos movimientos, tanto en su masa y la fuerza de los objetos, afecta al movimiento y son iguales, o muestra si las fuerzas están relacionadas entre sí mediante un valor fijo, esto es una escala de fuerza Fe .

En cuanto a las **condiciones de similitud** (también conocidas como leyes de semejanzas), son utilizadas principalmente para el diseño de modelos hidráulicos usando los números Froude (Fr), Reynolds (Re), y otros como Euler (Eu), Weber (W), Cauchy (Ca) y Mach (Ma).

El *número de Froude* (Fr), es adimensional, relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad; es decir, es por gravedad. Esta similitud tanto modelo como prototipo establece una condición $V_e/\sqrt{g_e L_e} = 1$, indica la relación que tiene que existir entre las escalas. Esto obliga a que el Fr del escurrimiento sea idéntico en modelo y prototipo; es decir $Fr = V_p/\sqrt{g_p L_p} = V_m/\sqrt{g_m L_m}$ (CFE, 1983).

Los *números de Reynolds* (Re), es un parámetro adimensional, representa la razón entre las fuerzas inerciales y viscosas del modelo y del prototipo; es decir por la viscosidad del líquido. Esta similitud tanto modelo como prototipo establece una condición $V_e L_e/\sqrt{\nu_e} = 1$, donde ν_e es la escala de viscosidad cinemática. El cumplimiento de la condición del Re en modelo y prototipo sean iguales; es decir $Re = V_p L_p/\nu_p = V_m L_m/\nu_m$ (Ídem).

La **escala en modelos hidráulicos**, depende del criterio de similitud adoptado. En los modelos físicos se tiene similitud geométrica; la escala es una relación entre un valor de prototipo y su correspondiente valor del modelo, donde cada variable tiene su propia escala y están relacionadas entre sí por las leyes de los fenómenos físicos.

La escala de un modelo para su selección está en función del problema a estudiar, condiciones del laboratorio, amplitud y alcance del estudio. Por último, los efectos de escala causan cierta incertidumbre sobre la información obtenida, obliga que los datos sean cuidadosamente interpretados y corregidos si es necesario para hacer una predicción correcta al prototipo.

La **calibración y verificación del modelo físico** para que se vean reflejadas las cualidades del prototipo que se trata de reproducir, es necesario verificar si es efectivamente capaz de reproducirlas o si es necesario efectuar cambios para superar todo aquello que diferencie con la realidad. Entonces, al construir el modelo físico debe calibrarse y verificarse, ya que depende del tipo de estudio que se desee hacer; por tanto, la calibración, consiste en adecuar las condiciones y características físicas e hidráulicas, como la rugosidad de fondo, el gasto y los niveles de agua, con las del prototipo.

Una buena calibración de un modelo físico requiere datos precisos del prototipo de geometría, elevaciones de la superficie del agua, del transporte de sedimento y las velocidades; esto nos lleva a la recopilación de una base de datos, que puede ser costosa y tomar mucho tiempo; después de tener una calibración, empieza la verificación, indica que requiere datos independientes de la calibración y busca confirmar que el modelo haya sido correctamente calibrado. De hecho, nos lleva un proceso riguroso de verificación como la obtención de la recopilación de datos empíricos adecuados y confiables.

4.2 Modelo físico del desagüe de fondo del P.H. “La Yesca”

La investigación del modelo es fundamental, es por ello que se realizó el estudio mediante el modelo físico de la descarga del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”, donde se obtuvieron resultados favorables, con todas las modificaciones y variables que se presentaron. El modelo se construyó en base a la información teórica y experiencia del equipo de trabajo del laboratorio.

Para las pruebas con el modelo físico se requería estudiar y optimizar los parámetros siguientes: la prueba de funcionamiento en algunas partes del desagüe (bifurcación, zona de válvulas, transición y conducción de sección portal); especialmente modificar la geometría y dimensiones de la cámara disipadora de energía mediante el manejo de ambas válvulas; por último determinar la capacidad de descarga mediante diferentes aperturas de las válvulas.

La localización del modelo hidráulico del desagüe de fondo, ubicada en el Laboratorio de Hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en Cuernavaca, estado de Morelos.

La escala del modelo construido para el estudio, $Le = 16.40$, desde el inicio fue necesario la elección de la escala considerando el espacio físico, costo, la capacidad del gasto y el tiempo de construcción, que se tiene en el laboratorio; considerando que las válvulas, tuviera una medida comercial, tomando en consideración la similitud de Froude, se obtuvo y se llegó a la conclusión de los valores de las escalas siguientes:

ESCALA	VALOR
Líneas (Le)	$Le = 16.4$
Velocidades (Ve)	$Le^{0.5} = 4.05$
Gastos (Qe)	$Le^{2.5} = 1\ 089.20$
Rugosidad (ne)	$Le^{1/6} = 1\ 594$

Tabla No. 10 Valores de escalas del modelo físico del desagüe de fondo (Lab. CFE, 2010).

Material seleccionado se obtuvo en base a la disponibilidad en el mercado, en su mayoría fue acero y acrílico en toda la estructura, su ventaja es que son fácilmente manejables. La base es de acero, sirve para el soporte del modelo y obtener la pendiente para ser un equivalente al terreno. Los conductos de sección circular y portal, la cámara disipadora, es de acrílico (acrílico liso y acrílico difuso, para ser semejante a la rugosidad) por ser transparente, permitiendo observar el estudio, mediante sus conexiones con pegamento, aros metálicos y tornillos, y las válvulas son de acero en su totalidad, véase la figura No. 26.



Figura No. 26 Modelo físico del desagüe de fondo La Yesca (Lab. CFE, 2010).

Conocimiento de la infraestructura se encuentra en un espacio considerado por la escala, sobre un piso firme de concreto, con un tejado armado de lámina galvanizada, soportes de acero y contando con algunas lámparas de iluminación.

El modelo hidráulico o físico, inicia al terminar la curva (codo) teniendo como cadenamiento $K\ 0+184.60$, es la parte de la conducción de sección circular con blindaje de acero, representando una longitud de $91.67\ m$, y con diámetro de $5\ m$ en prototipo, a escala del modelo $12''$ de diámetro. Continuando con el suministro de bifurcación simétrica de 5 a $2.5\ m$ de diámetro en prototipo.

Después, las zonas de válvulas, donde el primer par son válvulas de mariposa de diámetro 2.5 m, y el segundo par son válvulas de chorro divergente de 2.5 m de diámetro, ambas medidas a escala del modelo corresponde a un diámetro de 6"; dos cámaras disipadoras de energía y una zona de transición; por último el túnel de sección portal, figura No. 27.



Figura No. 27 Partes del modelo del desagüe de fondo (Lab. CFE, 2010).

En la parte de la cámara se construyó la mitad considerando la parte húmeda; localizando en su interior las dos válvulas de chorro divergente, y el dissipador de energía; para el funcionamiento del modelo se conectó directamente con el tanque, teniendo una válvula para el control del agua.

La instrumentación que se ocupó para determinar el gasto de operación fue mediante un medidor ultrasónico AT 868 y monitoreadas con equipo computarizado; la medición y registro de la carga de presión se realizó en todo el modelo con el uso de manómetros de carátula y celdas de presión, como se muestra en la figura No. 28; para ver el comportamiento del aire en la parte de la zona de cámaras, transición y conducto de la sección portal, se realizó mediante una cámara de humo y referente a su medición fue por medio un tubo Venturi, construido en acrílico e instalado a un costado de la válvula derecha (Lab. CFE, 2010).



Figura No. 28 Equipo de medición y registro del modelo físico (Lab. CFE, 2010).

Para la **calibración de las válvulas de chorro divergente**, se analizaron dos geometrías diferentes de válvulas, conos de 30° y 45° (ver figura No. 29), para su medición se colocaron celdas de presión preciline keller (rango de 0 a 1000 mbar), utilizando dos antes de la bifurcación y dos antes de la válvula de chorro divergente (uno en ambos lados), como se distingue en la figura No. 28.

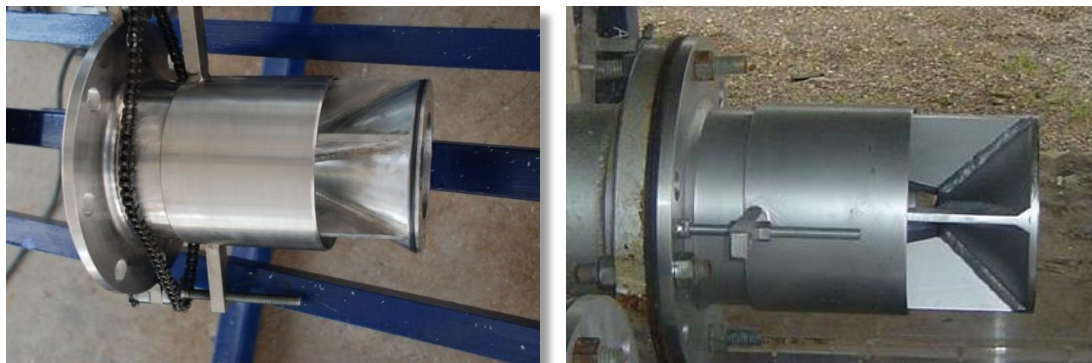


Figura No. 29 Válvulas de chorro divergente de 30° izquierda y 45° derecha (Lab. CFE, 2010).

Para la calibración de la válvula de 30° , se hicieron cinco aperturas S (tabla No. 9), a partir de un gasto de diseño de $140 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta el mínimo de operación. Los datos analizados en tablas y figuras sobre la calibración son confidenciales, mientras que en los resultados obtenidos se tuvo una discrepancia, posiblemente por defecto de fabricación de las válvulas. Los coeficientes proporcionados por el laboratorio, son:

Apertura (S) m	Coeficiente de descarga (Cd)	
	válvula izquierda	válvula derecha
1.676	0.8460	0.8152
1.394	0.7217	0.6532
1.225	0.6648	0.6794
1.066	0.6436	0.5677

Tabla No. 11 Coeficientes de diferentes aperturas de las válvulas (Lab. CFE, 2010).

Funcionamiento hidráulico se realizaron varias modificaciones del proyecto original, de todas las alternativas, el sexto fue el más eficiente en su funcionamiento, esta opción está compuesta por las válvulas de chorro divergente con un cono de 30° con respecto a la horizontal, teniendo una apertura de 1.676 m, con anillo de aireación de 4.25 m, cámaras cilíndricas de 5.6 m de diámetro y longitud de 9.78 m, túnel de descarga de 6.5 x 6.5 m con pendiente de 0.0012752, los gastos máximos ensayados se encontraron entre 255 y 265 m³/s, y no se pudo alcanzar la de diseño 280 m³/s (ídem).

Los ensayos realizados en esta alternativa fueron mejores en el funcionamiento hidráulico, su comportamiento de la corriente no se ahoga y observando el modelo en la parte del anillo de aireación se presenta escurrimiento, esto se solucionó con los drenes, donde se cambió la medida del anillo, a 4.25 m de diámetro sugerido por el fabricante, considerando el efecto de escala del modelo; teniendo ya un buen funcionamiento se realizó la medición de las variables físicas.

De acuerdo con las variables, las velocidades del flujo a lo largo del túnel de descarga oscilaron entre 18 y 20 m/s. La siguiente figura muestra el funcionamiento de la alternativa seis del modelo con cono de 30° con respecto a la horizontal.



Figura No. 30 Funcionamiento hidráulico de la alternativa seis (Lab. CFE, 2010).

Modelo físico del desagüe de fondo de la parte terminal, corresponde otro modelo de estudio para observar la descarga del agua hacia el río y también el problema de la erosión con la estructura y laderas, esto depende del acabado del canal, así como de otros factores en consideración de espacio, costo y tiempo.

Se construyó con una escala a 25 ($Le = 25$) las condiciones de operación con gasto de $280 \text{ m}^3/\text{s}$ (abiertos totalmente las válvulas), con una elevación en el río de 390.71 msnm, con una representación del modelo de 125 m de longitud de túnel, 120 m en el cauce a partir del punto de descarga hacia aguas bajo (Reporte CFE, 2010; Lab. CFE, 2010).

La estructura de esta obra tiene como condición que la parte de la salida del túnel tenga una velocidad de 17 m/s, para un gasto de $280 \text{ m}^3/\text{s}$ y con término en el portal de salida del túnel No. 2. En la parte de platilla se colocó grava ($3/4''$ que en prototipo corresponde a 47 cm) y taludes hacia el túnel ya mencionado, con cemento, yeso y agua. Analizando con y sin una fosa disipadora de energía y fondo móvil en la platilla para ver el comportamiento de la erosión.

En su estudio para la estructura terminal del modelo se realizaron varias modificaciones y se concluyó con un canal a cielo abierto, en su parte final se colocó un deflector recto en platilla y muros laterales; es decir, el deflector ayuda direccionar el chorro, para que no se derrame en la ladera, evitando la erosión y afectar la estructura del túnel No. 2, el gasto mínimo fue de $90 \text{ m}^3/\text{s}$.

En la siguiente figura No. 31 se observa, el modelo de la estructura terminal de la descarga de fondo:



Figura No. 31 Modelo físico de la descarga terminal del desagüe.

4.3 Análisis de resultados

La construcción del modelo, se realizó con la escala 16.40 ($Le= 16.40$) considerando el espacio físico, costo del modelo y capacidad de carga. Un elemento importante fueron las válvulas, para buscar una medida comercial; así como el modelo construido por acrílico y acero, para simular el material ocupado en prototipo; es decir, el acero ocupado en las válvulas, el acrílico difusor para el concreto lanzado y el acrílico liso para concreto pulido.

Del funcionamiento hidráulico del modelo físico, resultó que toda la estructura, con respecto a la alternativa seis es positiva, con válvula de chorro divergente con cono de 30° con respecto a la horizontal; como consecuencia de las modificaciones de la cámara de disipadora en la geometría y dimensiones; además se tomó en cuenta la opinión del fabricante de las válvulas y de todo el equipo participante.

A vista de los resultados obtenidos, mediante los ensayos del modelo, sobre la capacidad de descarga se determinaron diferentes aperturas de las válvulas. La capacidad máxima de descarga de la salida fue de 255 a 265 m^3/s en ambas válvulas totalmente abierto; comparando los resultados teóricos que se analizaron con un gasto de diseño de 280 m^3/s , ambos resultados fueron correctos, aún con una diferencia apreciable, porque dieron idea de cómo se va a comportar toda la estructura en la realidad, también se consideró lo impredecible que es la naturaleza más con la falla geológica que se tiene en el mismo lado, de la estructura de la descarga.

A margen de ejemplos, se presentan estudios de modelos hidráulicos del Proyecto Hidroeléctrico Dasu (Pakistán) y Proyecto Hidroeléctrico Kárahnjúkar (Islandia).

El Proyecto Hidroeléctrico Dasu, es de concreto compactado con rodillo, localizado en el río Indus, Pakistán, tiene una capacidad de 4 240 MW y altura de 233 m (Malik; Munirt, 2011). El modelo físico de la presa Dasu, es con el fin de verificar las condiciones de flujo en la entrada y la salida; su capacidad de descarga y perfiles de trayectoria han sido también estudiados; construida a escala de 1:80 y con la similitud de Froude.

Las pruebas han demostrado que el modelo de las condiciones de entrada y salida es satisfactorio a todas las descargas. No hubo formación de remolinos o movimiento de circulación a la entrada en cualquier etapa de la operación. Donde mostraron que las condiciones de descarga en las salidas se mantienen bastante satisfactorias como los chorros de flujo, aterrizando directamente en la piscina, lo que resulta en la disipación de energía satisfactoria, véase en la figura No. 32.

Las pruebas del modelo se realizaron con una descarga de 6 000 m³/s. Su diseño estructural está compuesto por: bocatoma, conducto, compuertas de resguardo, emergencia y regulación (está última de forma radial).

También se verificó la calibración de la descarga, donde el modelo de la curva de descarga obtenida y la curva de calibración calculada para todas las descargas fue para niveles diferentes; esto valida los coeficientes seleccionados para los parámetros de diseño diferentes. La presión, la velocidad y los perfiles de flujo a lo largo de toda la longitud no se pudo estudiar en el modelo, pero se propone en la etapa de diseño detallado, la construcción de un modelo en sección de la salida, y que estos parámetros deben ser ensayados en esa etapa.

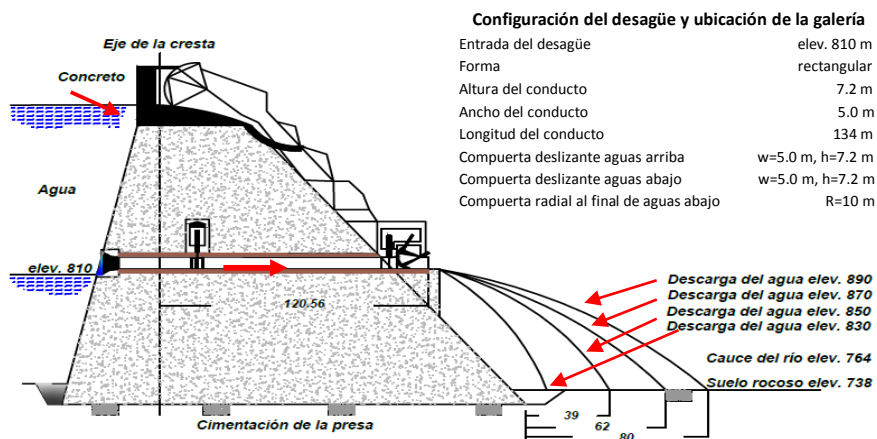


Figura No. 32 Desagüe de fondo del P.H. Dasu, Pakistán (Malik; Munirt, 2011).

El Proyecto Hidroeléctrico Kárahnjúkar, en Islandia, está equipado con 6 turbinas Francis, tendrá una capacidad de 690 MW, con una longitud de 696 m y 198 m de altura; la cortina de enrocamiento con cara de concreto ECC, con un volumen de llenado de 8.5 millones de m³, ubicado entre los ríos Jökulsa á Dal y Jökulsa í Fijótsdal (Schneider, Mayr, 2007).

Por su dimensión el P.H. Kárahnjúkar, tendrá altas velocidades y descargas en el prototipo, para obtener estos datos usados en el diseño, se construyó el modelo físico del aliviadero y desagüe de fondo, además cálculos numéricos. El modelo fue construido para el estudio a escala de 1:15 en el laboratorio de hidráulica, de la Universidad de Tecnológica de Graz; donde se produjo la salida del fondo de la cámara de compuerta hacia abajo hasta la descarga, aplicando la base de la similitud de Froude y el conducto de túnel en forma de herradura.

Prácticamente todo el modelo fue construido en acrílico, las únicas excepciones fueron los deflectores y las modificaciones (acero); la pared que bordea el cañón fue construido con ladrillo tradicional, y el fondo del cañón se niveló con grava gruesa, que también se utilizó para la construcción de las pistas; obteniendo resultados de descarga máxima de 341 m³/s, mostrando una velocidad máxima de 47 m/s y los resultados fueron satisfactorios.

Además de determinar la capacidad de descarga, se describen líneas hidráulicas de grado en las secciones de alta presión y de flujo libre, la determinación de la entrada de aire en el modelo, y las pruebas están principalmente dirigidos a estudiar las condiciones de flujo inmediatamente aguas abajo de la zona de la puerta, a lo largo del túnel y en la parte del área del cucharón, en los ensayos con modelo no se presentaron ninguna presión que pueda constituir un riesgo en el prototipo.

Para la instalación de deflectores, se modificó la geometría de la sección superior del túnel de flujo libre, con el fin de evitar el desarrollo de saltos o remolinos; las mediciones y cálculos permitieron cuantificar, incluso con todas las incertidumbres involucradas, los requisitos de aire previstos en el prototipo.

La geometría del recipiente se optimizó a fin de dar sólo la presión positiva y hacer que el chorro incida en el punto mejor posible en el cañón, donde el foso de erosión constituye el menor riesgo, figura No. 33.

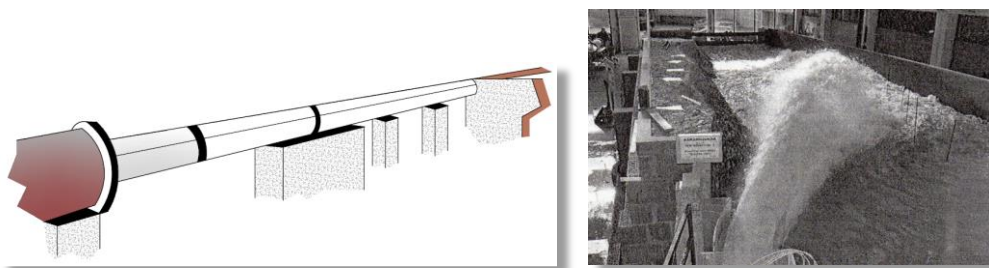
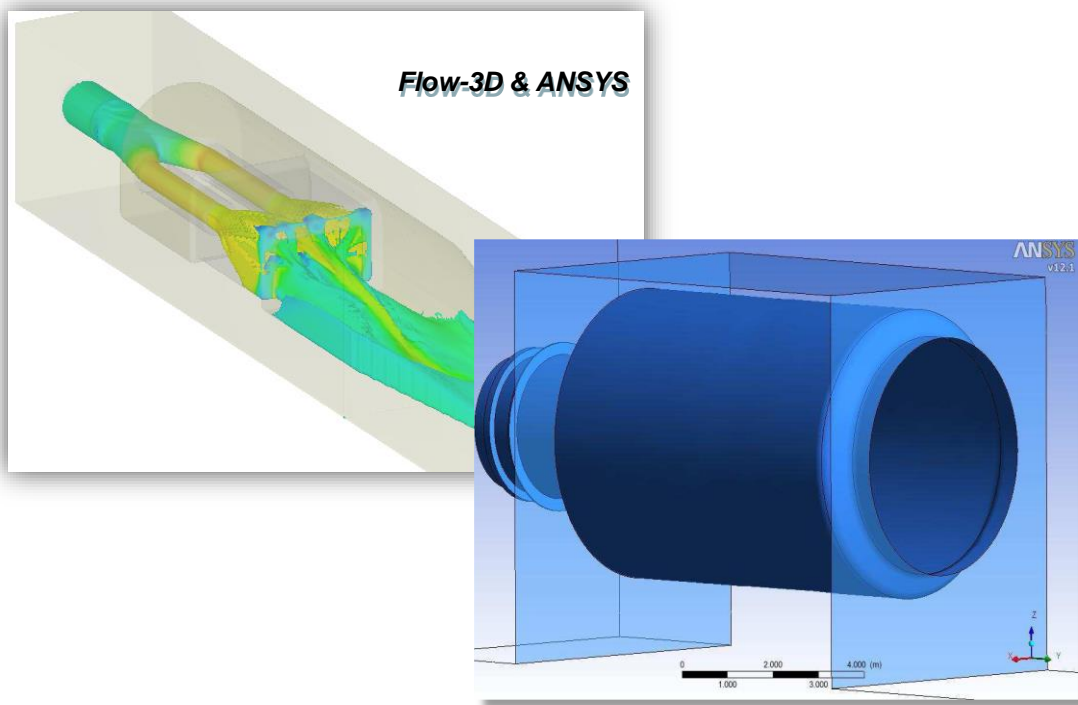


Figura No. 33 Desagüe de fondo del P.H Kárahnjúkar, Islandia (Schneider, 2007).

En conclusión con este apartado del modelo físico fue satisfaría por los resultados mostrados en imágenes y en tablas, observando en la opción elegida un buen funcionamiento hidráulico. Por el cambio de la geometría y con las condiciones de datos de entrada (gasto de diseño, etc.).

CAPÍTULO V

MODELOS NÚMERICOS



CAPÍTULO V: MODELOS NÚMERICOS

5.1 Generalidades teóricas de modelos numéricos

A finales del s. XX y comienzos de este siglo, se ha visto el avance de los modelos matemáticos con salidas visuales, técnica que se conoce con el nombre de modelación visual (León, 2012). En la actualidad existen varias empresas que se han dedicado a programar y ofrecer software para la modelación, esto ha permitido a científicos e ingenieros el desarrollo de proyectos en simulaciones virtuales, solo usando un computador como laboratorio, y con sus experimentos se predice el comportamiento y se conocen las variables que afectan, o se desconocen.

Un modelo numérico también conocido como modelo matemático o digital consiste en la representación virtual del medio físico en un ordenador, que mediante las operaciones adecuadas se obtienen soluciones de problemas complejos de modelado de fluidos. Según Santiago (2010) sus ventajas son predecir las propiedades, diseño con soluciones rápidas, una visualización y animación del proceso, y las desventajas es que requieren usuarios con amplia experiencia y formación especializada, además todo el equipo de hardware y software es costoso.

Sin embargo, se ha incrementado las herramientas computacionales, siendo posible crear modelos numéricos de diferentes procesos para tener resoluciones a detalle y así resolver cualquier tipo de problema. En el caso de Flow-3D y ANSYS, la simulación de estructuras ha sido utilizada para la optimización de partes de diferentes complejidades y requerimientos en proyectos.

Con respecto, al tema de esta investigación se realizaron una serie de simulaciones mediante Flow-3D (Flow Science Inc.), utilizando el método de Volumen Finitos de las ecuaciones de Navier-Stokes y de continuidad. Otra forma en qué se realizaron las simulaciones fue mediante el software ANSYS, para lo cual se usó el método de Volumen Finito basado en variaciones de presión acoplado.

Los fundamentos básicos principales de los programas mencionados anteriormente se sintetizan en (León, 2012; Kazu, 2006):

Ecuaciones matemáticas fundamentales:

- La ecuación de Continuidad (deriva de Ley de Conservación de la Masa)
- La variación de la densidad respecto a la presión (se obtiene de la ecuación de Estado)
- Conocer la turbulencia con que se está moviendo un conducto cerrado (número de Reynolds).

-
- Las ecuaciones de Momentum de Navier-Stokes

Para ello, todos los programas de simulación numérica utilizan tres componentes: preprocesador, solución (procesador) y postprocesador.

- I. *Preprocesador*, trata todos los datos creados o transferidos (geometría del problema, materiales, secciones, acciones externas, condiciones de contorno y mallado) para resolver problemas con base a las condiciones del entorno: primero se identifica el área de interés, se determinan los datos de registro de las variables del sitio (temperatura, velocidad, presión, tensión superficial, etc.) y se analiza el fluido; posteriormente se crea la geometría de malla a base de otro programa y se transporta. Por último se ingresa al programa todas las condiciones para asimilar el fenómeno a ser simulado (físico o químico): tipo de fluido y sus propiedades físicas, características de escurrimiento (rugosidad, temperatura), características de simulación (bifásico o monofásico, etc.), y las condiciones de contorno.
- II. *Solución (procesador)* se puede resolver numéricamente con diferentes métodos (elementos finitos, diferencias finitas y volumen finitos); los métodos se realizan en tres etapas básicas: aproximación de variables a través de funciones simples, discretización y solución con ecuaciones algebraicas.
- III. *Postprocesador* es una herramienta de visualización gráfica; sirve como un elemento de entendimiento o comprensión del fenómeno físico simulado, para después hacer el análisis. La visualización incluye: gráficos, superficies, líneas y puntos con variación de variables de interés, geometría y malla, vectores de variables de interés, animaciones y superficies en 2D y 3D.

Por lo tanto, es altamente recomendando que cualquier simulación numérica lleve un proceso de validación y control de calidad de resultados; esto garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos. La modelación puede ejecutarse con diferentes programas comerciales siempre y cuando se conozca el problema que se va a analizar para resolverlo. La diferencia entre ellos son las capacidades adicionales que tienen, y características particulares para su resolución.

Las simulaciones, deben considerar que se puede perder de vista la realidad; ya que de nada sirve una bonita resolución si no se aproxima a los experimentos físicos reales o visualizar campos de presiones y velocidades. Si los datos plasmados en la respuesta son falsos, esta se resuelve si se toma en cuenta las hipótesis y operación del software. Es por ello, que cualquier simulación numérica debe buscar un método de validación experimental y/o analítica.

El modelo numérico del desagüe de fondo del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”, empleó soluciones de programas comerciales Flow-3D y ANSYS. Ambos dieron resultados favorables como se puede observar en los dos siguientes apartados, Flow-3D fue utilizado por personal especializado de la CFE y ANSYS se contrató una empresa privada para la modelación virtual de la obra mencionada.

5.2 Solución con Flow-3D

Flow-3D es un software creado por Flow Science Inc., es un programa para simulaciones de dinámica de fluidos computacional CFD o fluidodinámica computacional de propósito general especializado en el cálculo de fluidos en superficie de forma libre. Flow-3D incluye todos los módulos necesarios y no necesita ningún software adicional (Flow-3D, 2012). Incluye herramientas de malleo de geometría (meshing) incluyendo superficies y sólidos, opciones de propiedades para diferentes tipos de fluidos, como los cartesianos, viscosos, fluidos de 2 fases, saturados e insaturados, etc.

Entre otras características incluye la definición de opciones de fluidos y condiciones de frontera, modelado numérico, modelado térmico, así como análisis de fundición (casting), modelos de turbulencia y medios porosos. Flow-3D permite a los ingenieros analizar y estimar fenómenos físicos de fluidos en diferentes aplicaciones como: ingeniería civil e hidráulica, medioambiente, aplicaciones navales y marítimas, etc.

A modo ilustrativo, se presenta el resultado de la modelación numérica de alternativas analizadas, en donde se puede observar el comportamiento de la estructura del desagüe de fondo del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”, con el uso del programa de Flow-3D, son:

Datos de entrada:

Simulación de la Descarga de Fondo, P.H. “La Yesca”			
Alternativas	1	2	3
Datos			
Gasto	280 m ³ /s		
Velocidad inicial	28.45 m/s		
Diámetro del túnel de descarga	7.0 m	6.5 m	
Pendiente en el túnel de descarga	0.02544	0.22	0.02544
Longitud de transición	30 m		
Forma de la cámara	Cuadrada chaflán 45°	Cuadrada chaflán 90°	Cuadrada chaflán 90° sin el inferior

Tiempo simulado Flow-3D	69 s
-------------------------	------

Tabla No. 12 Datos de entrada para la simulación para Flow-3D (Presentación CFE, 2010).

Al iniciar el proceso de simulación la geometría se crea en AutoCAD, como se presenta en la tabla No. 13 de la cámara de disipación de energía del desagüe “La Yesca”.

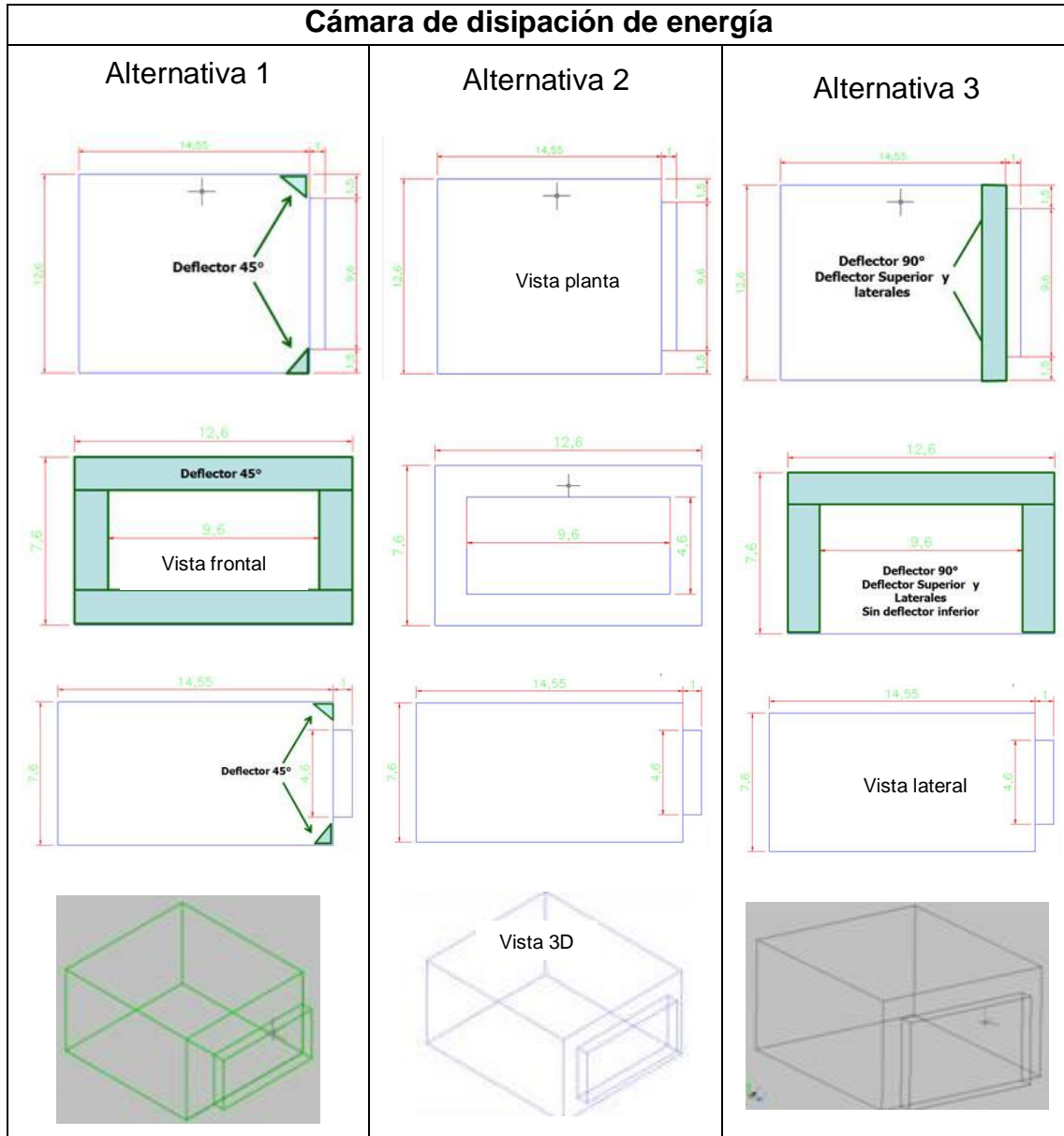


Tabla No. 13 Geometría de la cámara disipadora en AutoCAD (Presentación CFE, 2010).

En la figura No. 34 se muestra la bifurcación de forma simétrica (5 m a 2.5 m de diámetro), para las alternativas.

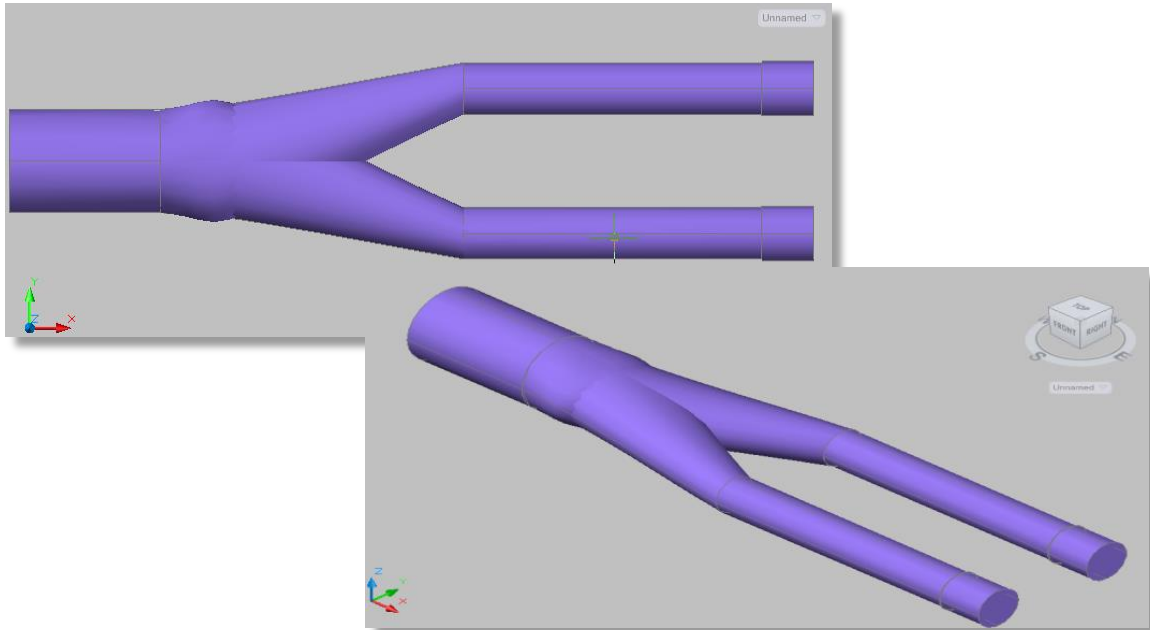


Figura No. 34 Bifurcación del desagüe de fondo en AutoCAD (Presentación CFE, 2010).

A continuación se presenta el cono obturador de las alternativas, con las mismas dimensiones, procesado en AutoCAD, figura No. 35.

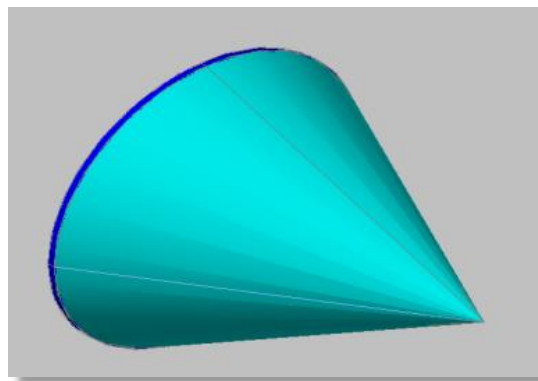


Figura No. 35 Cono obturador en AutoCAD (Presentación CFE, 2010).

En las siguientes ilustraciones, se observa las tres alternativas en conjunto la zona de bifurcación, válvulas y cámara de disipación de energía de la descarga.

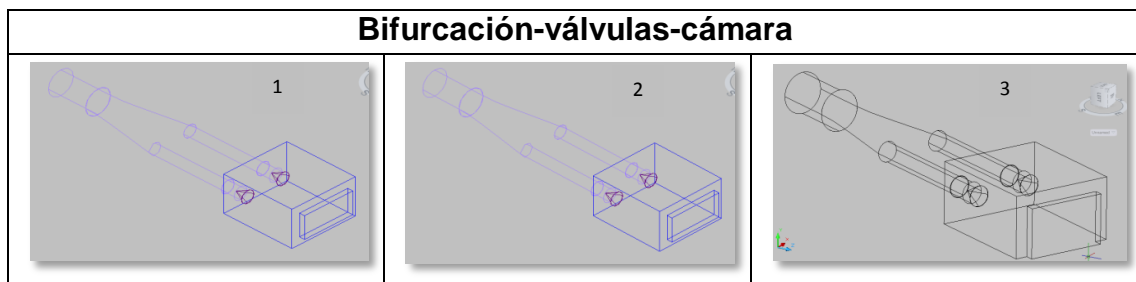


Tabla No. 14 La zona de bifurcación-válvula-cámara del desagüe (Presentación CFE, 2010).

Después se crea la geometría de la zona de transición del desagüe, la primera y tercera alternativa las medidas son iguales y la segunda tiene diferente medida, procesado en AutoCAD, tabla No. 15.

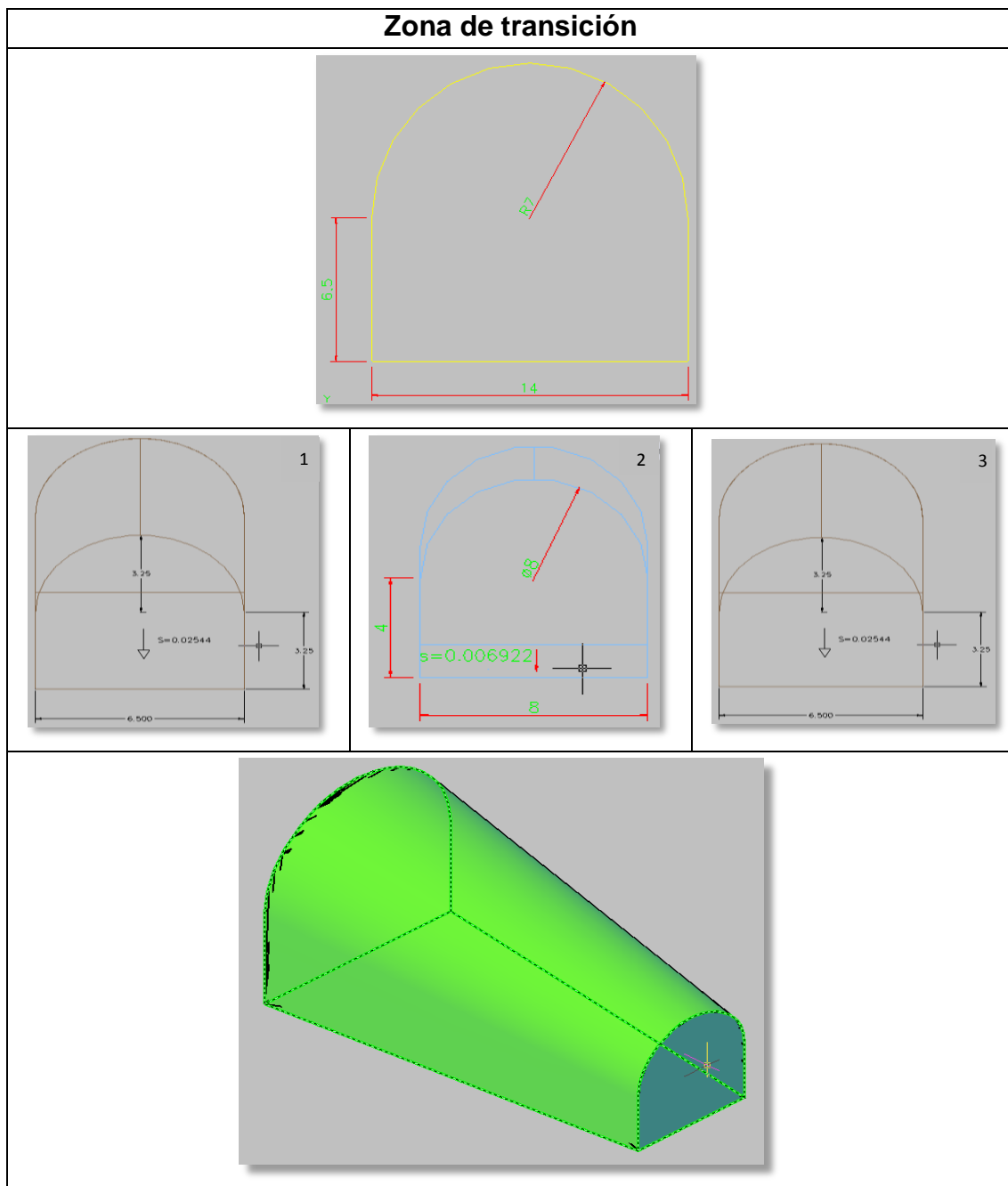


Tabla No. 15 La geometría de la zona de transición en AutoCAD (Presentación CFE, 2010).

A continuación, se presentan los resultados de la simulación visual mediante Flow-3D, con los datos de entrada de la tabla No. 12 de las tres alternativas.

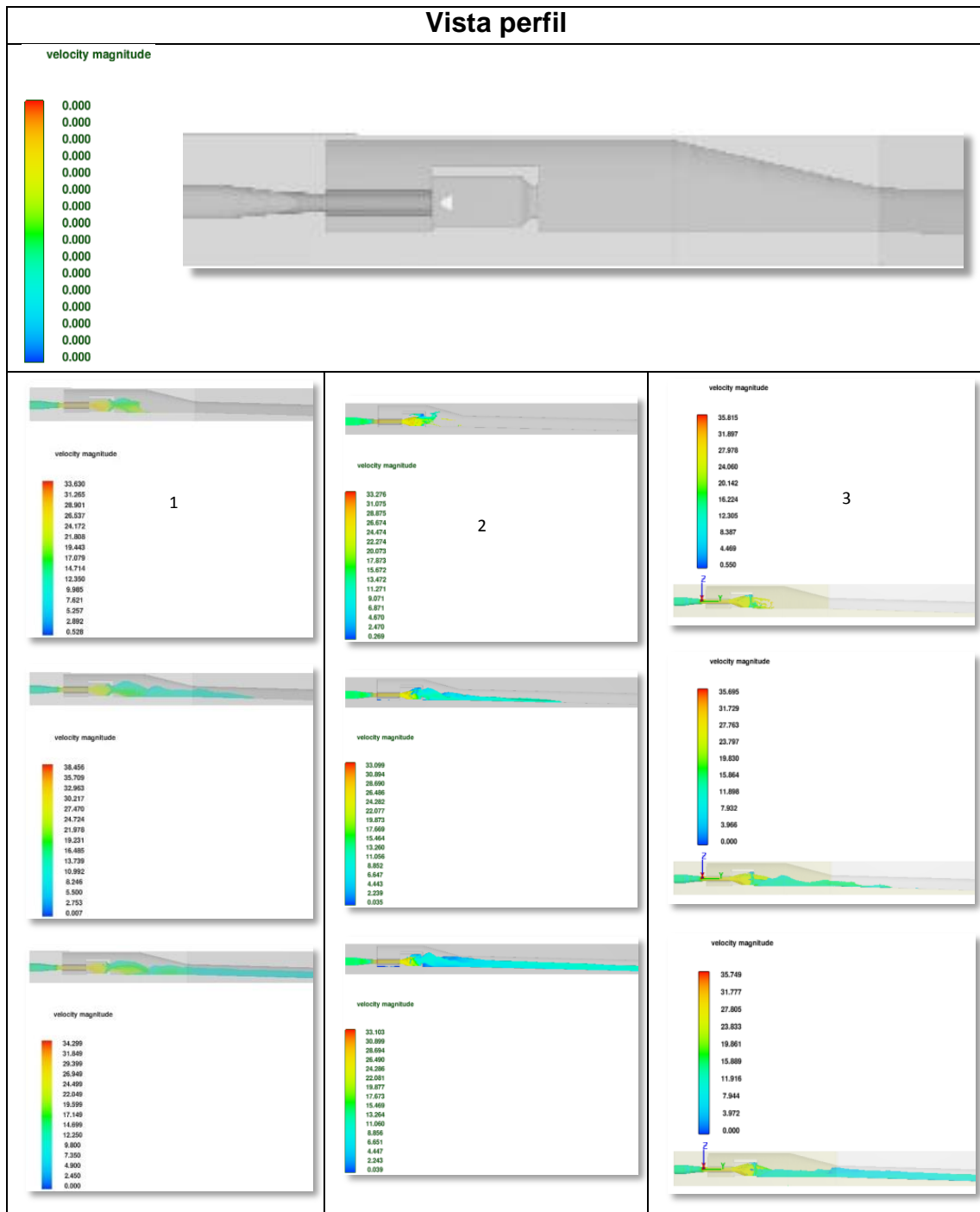


Tabla No. 16 Vista perfil en Flow-3D (Presentación CFE, 2010).

El comportamiento de las velocidades, de la alternativa uno vista en planta, véase en la tabla No. 36.

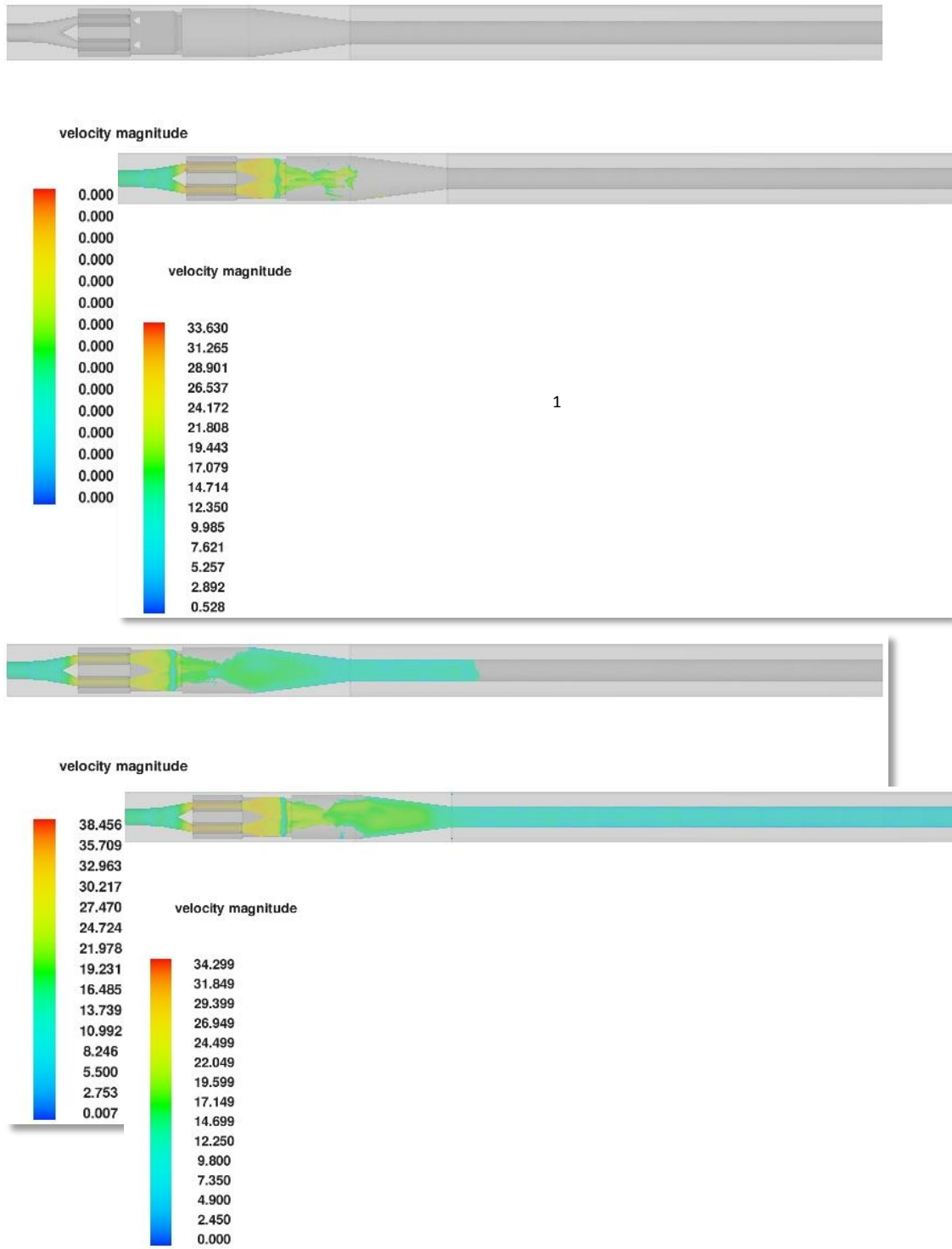


Figura No. 36 La alternativa uno vista en planta, Flow-3D (Presentación CFE, 2010).

En la tabla No. 17 se presenta las 3 alternativas de modelación en vista isométrica de la zona de bifurcación-válvulas-transición-conducción de la descarga.

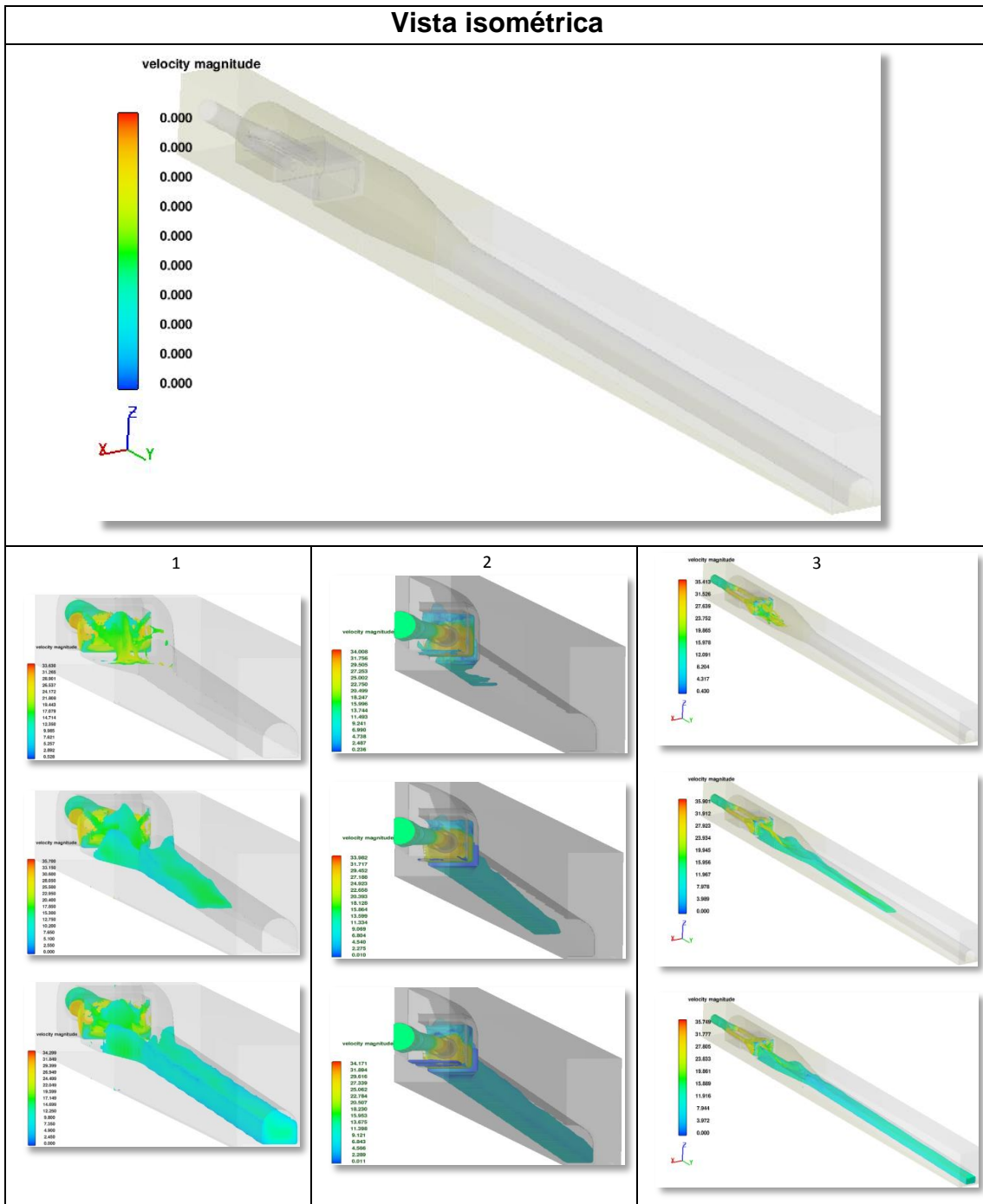


Tabla No. 17 Vista isométrica en Flow-3D (Presentación CFE, 2010).

Por último, se presenta los detalles de cada alternativa en análisis, mediante Flow-3D del desagüe de fondo “La Yesca”, tabla No. 18.

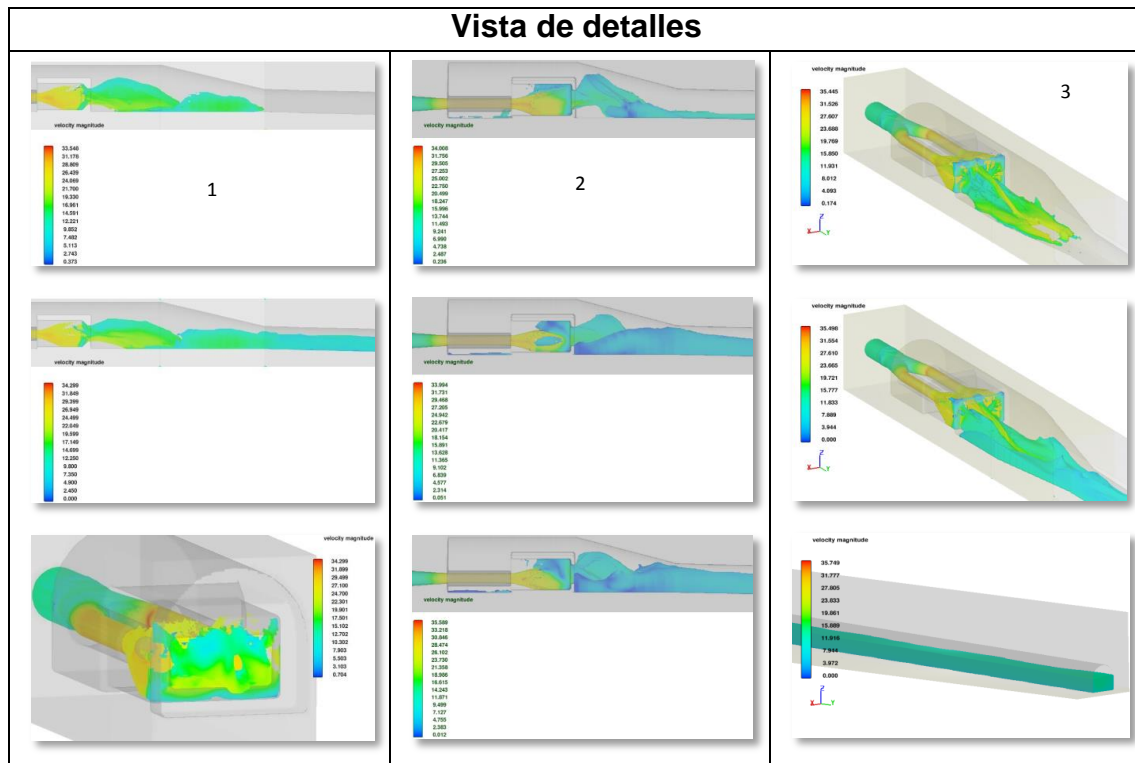


Tabla No.18 Vista de detalles en Flow-3D (Presentación CFE, 2010).

En terminas general, los resultados mostrados anteriormente mediante Flow-3D se concluye que el funcionamiento hidráulico es satisfactorio por el buen desempeño que tiene la estructura en no presentar ningún ahogamiento con la circulación del agua; es importante decir, que la alternativa seleccionada no fue presentada por falta de información, sus características de geometría varía únicamente en la cámara disipadora de energía la cual es de forma circular (diámetro de 5.6 m, la salida de boquilla 4.6 m, longitud es de 9.78 m y 4.25 m de diámetro del anillo de aireación) y no cuadrada como se presentaron en estas alternativas. No cabe duda, aún sin la alternativa elegida se puede observar el comportamiento de la estructura sin problema de otro tipo.

Por otro lado, con apoyo del modelo físico se realizaron modificaciones en su geometría y dimensiones, principalmente en la cámara disipadora; y la parte de la zona de bifurcación, válvula, transición y la conducción de sección portal fue igual al modelo hidráulico y alternativas estudiadas mediante Flow-3d.

5.3 Solución con ANSYS

ANSYS incluye un gran número de nuevas y avanzadas características que hacen más fácil, rápido y barato el trabajo para los científicos e ingenieros, con un alto grado de confianza en los resultados finales. ANSYS es un software con base en el fundamento de la simulación de ingeniería inteligente y se utiliza para

dar resolución una gran variedad de problemas (estáticas, dinámicos, lineales, no lineales, térmicos, etc.). Y maximiza la precisión de prototipos virtuales, con la automatización del proceso de simulación.

El manejo de ANSYS se realiza en tres etapas: el preproceso (geometría del problema, materiales, secciones, acciones externas, condiciones de contorno y mallado; o importado de otro programa), solución (se calcula el modelo generado anteriormente, mediante la resolución del sistema de ecuaciones) y el postproceso (mostrar los resultados en 2D, 3D y videos así comprobar si los resultados son correctos, ya sea en forma conjunto o detalles) (ANSYS, 2012).

A continuación se presenta la modelación virtual de la descarga de fondo del P.H. “La Yesca”, mediante la resolución de ANSYS.

Datos de entrada:

NAME	578 msnm
NAMO	575 msnm
NAMINO	518 msnm
Elevación de la válvula	432.41 msnm
Diámetro nominal	2.5 m
Presión de diseño	1.43 MPa
Presión de Prueba	2.145 MPa
Gasto de Diseño	140 m ³ /s
Tiempo apertura	150-300 s
Tiempo de cierre	150-300 s

Tabla No. 19 Datos de entrada para la simulación en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

En la figura No. 37 se observa la geometría tridimensional del desagüe: válvula de chorro divergente y en conjunto válvula con la cámara la disipadora de energía. Con medidas de válvula de chorro 60° con respecto al eje y la cámara de disipación de energía de 4.6 de diámetro.

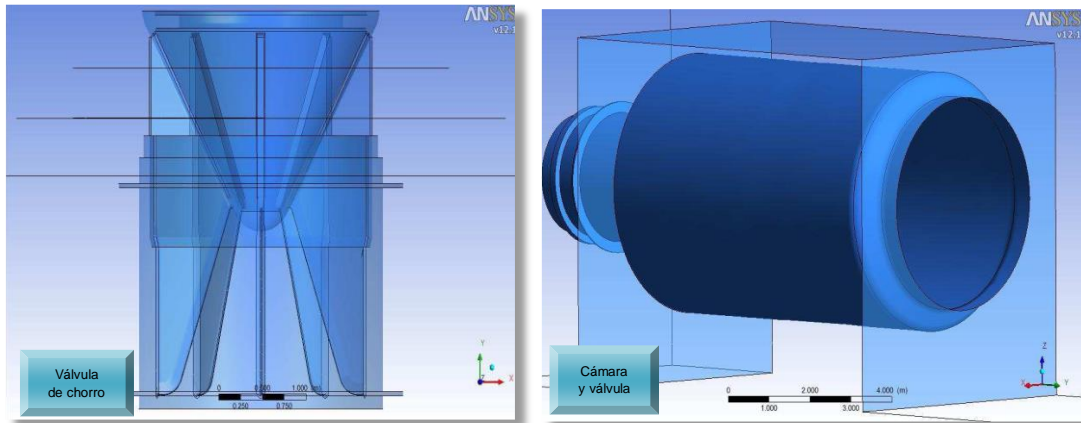


Figura No. 37 Válvula y cámara disipadora de energía en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

En la siguiente figura No. 38 se puede apreciar la discretización de los dominios de solución del flujo en malla y de frontera (bifurcación, válvula mariposa y chorro, cámara disipadora, zona de transición, conducción sección portal) en la modelación del desagüe.

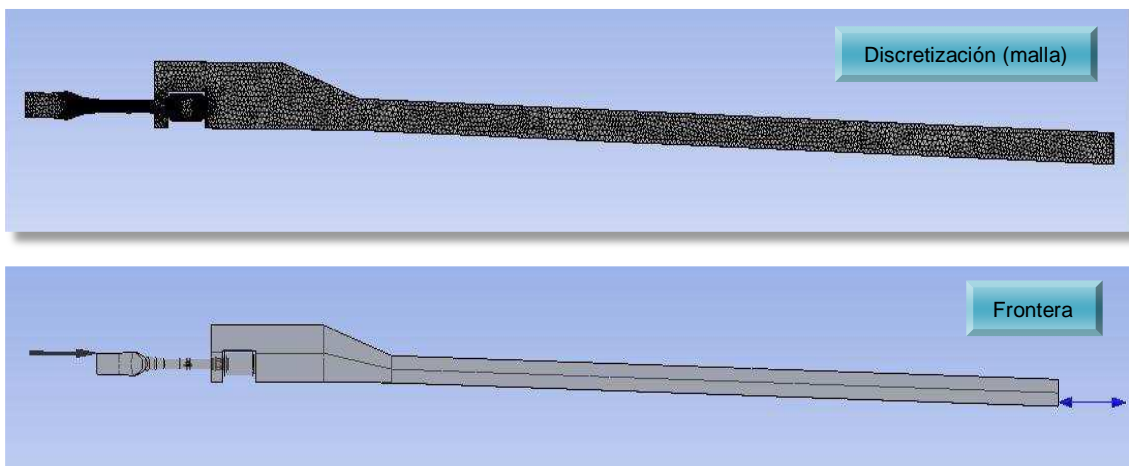


Figura No. 38 Desagüe de fondo de la malla y frontera en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

Según en el reporte CFE (2012), indica que el "...análisis empleado fue la metodología de **Volumen Finito** basado en variaciones de Presión acoplado, con dos fases continuas en no equilibrio, incluyendo la tensión superficial interface de $0.073 \text{ [N m}^{-1}\text{]}$, Coeficiente de arrastre de 0.44, Modelo isotérmico con 25 [C] , Régimen completo, Laminar-transición-Turbulencia con SST, Aceleración de la gravedad en la dirección "-Z", esquema de advección High Resolution, Rhie Chow de cuarto orden como Acoplamiento entre la presión y la velocidad y funciones de forma paramétricas" (pág. 3.4).

A continuación se presentan los resultados del modelo numérico de la descarga de fondo "La Yesca", mediante el análisis de ANSYS considerando los datos de entrada de la tabla No. 19.

Por tanto, en la siguiente ilustración se observa el buen comportamiento de la estructura del desagüe.

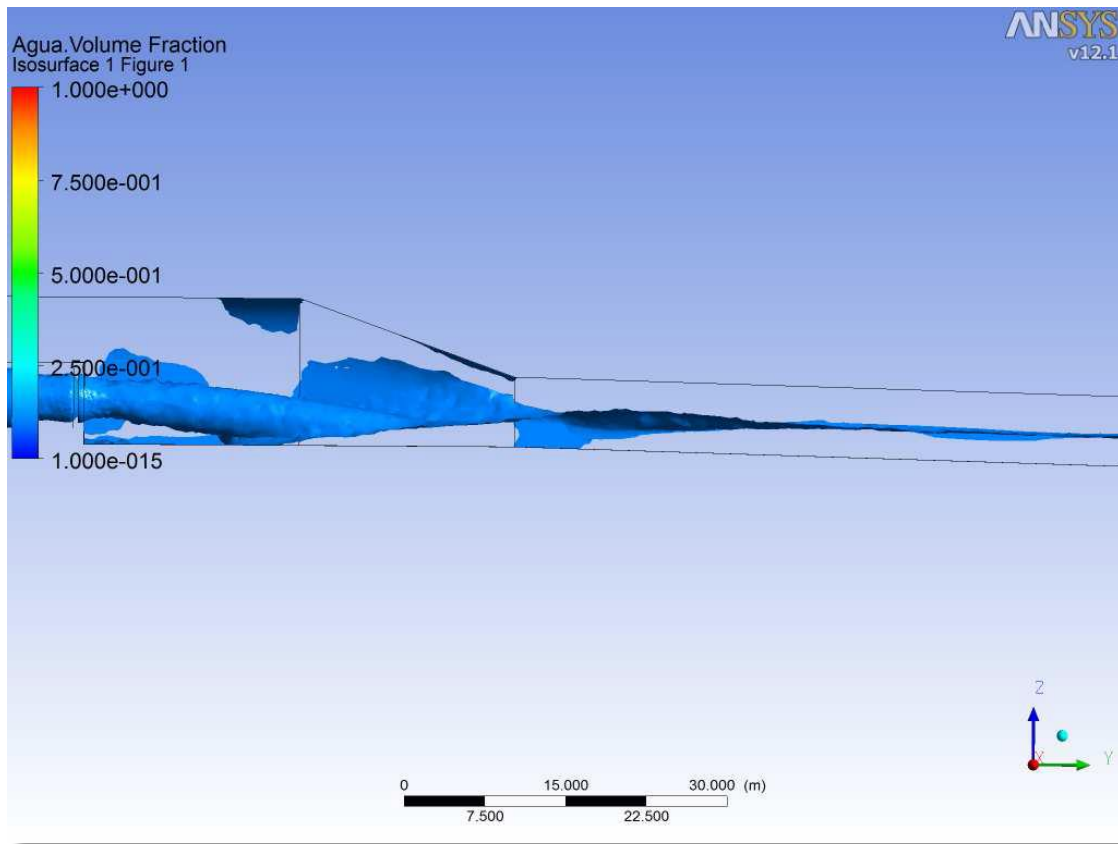


Figura No. 39 El comportamiento del desagüe de fondo en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

El estudio se realizó con gastos máximo de $360 \text{ m}^3/\text{s}$ y de diseño $280 \text{ m}^3/\text{s}$; en la figura No. 40 muestran el comportamiento y datos de fracción de volumen de agua, en la zona de válvula de chorro y cámara disipadora de energía.

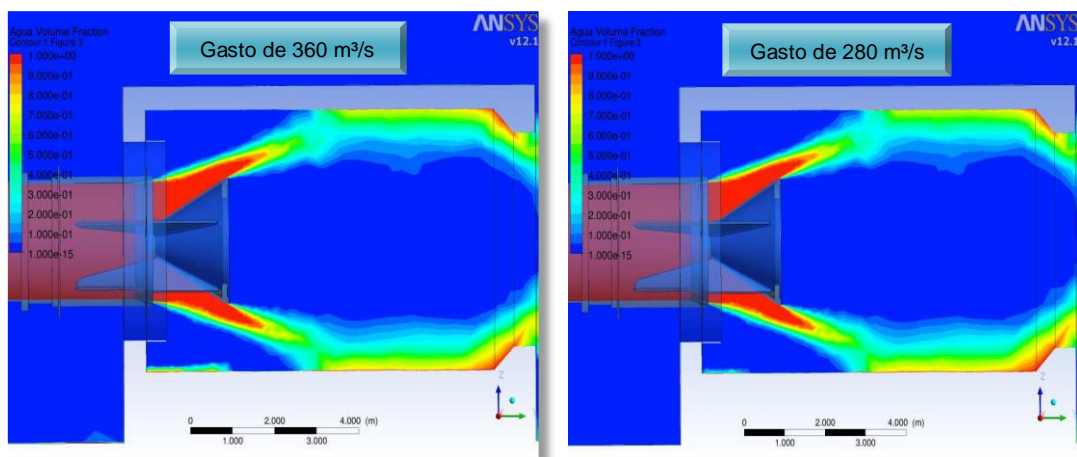


Figura No. 40 Comportamiento de la válvula y cámara en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

A base de los resultados con los dos gastos mencionados anteriormente se realiza una comparación en la distribución de presiones de la cámara de disipación de energía, tabla No. 20.

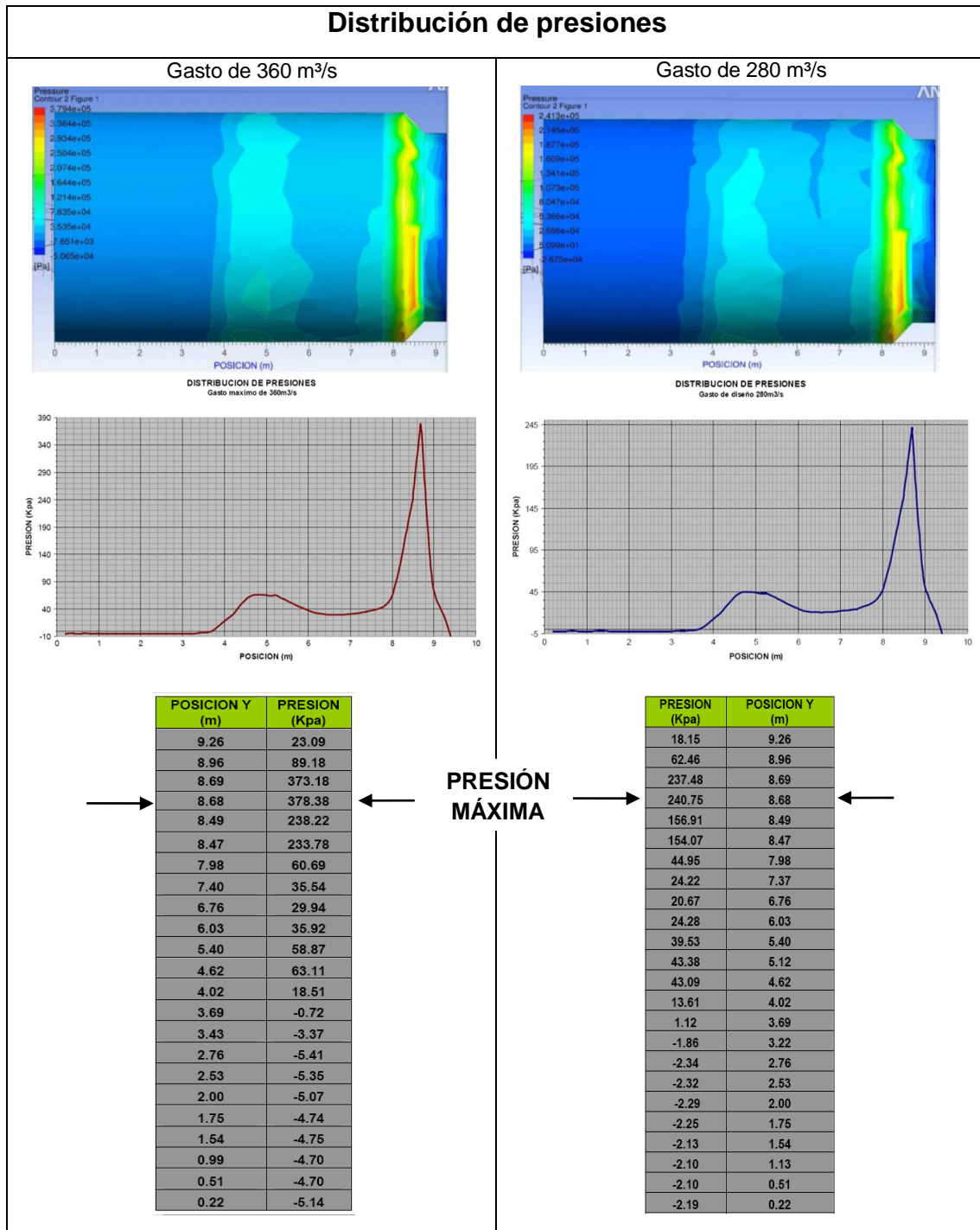


Tabla No. 20 Comparación de distribución de presiones en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

Los resultados anteriores corresponden a las distribuciones de presiones de dos gastos en estudio: gasto máximo de 360 m³/s y de diseño 280 m³/s. La primera se observa que la presión máxima es de 378.38 Kpa, su posición está en 8.68 m, y esto ocurre en la garganta de salida de la cámara disipadora. La segunda su presión máxima es de 240.75 Kpa, localizando en la misma posición que la

primera, también sucede en la garganta de salida. Ambos gastos se observa que la presión producida por el chorro de agua de la válvula se distribuye aproximadamente a 3 m en el sentido del flujo en la cámara disipadora.

Del mismo reporte técnico (2012), se obtuvo que teniendo un gasto de 360 m³/s la fuerza hidrodinámica transmitida a la cimentación: la bifurcación es 7.278 MN, cámara disipadora 1.683 MN y válvula mariposa 1.301 MN. La velocidad en la descarga del portal es de 25.06 m/s. El flujo mínimo de aire requerido para las dos válvulas es 683 m³/s.

Por último, el estudio de la válvula de chorro divergente lo realizó el mismo fabricante por separado mediante ANSYS, se tomó los mismos datos de entrada de la tabla No. 19. A continuación se presenta de forma ilustrativa, los resultados obtenidos y gráfica.

El método para el cálculo de la válvula fue por elementos finitos, donde la geometría en 3D de la válvula de chorro divergente fue creado con Unigraphics y después transportado a ANSYS Workbench (Reporte técnico, 2012).

En la figura No. 41 presenta las condiciones de frontera, donde como punto de fijación fue el tubo de anclaje hacia el concreto y la carga de presión fue aplicada a la superficie en contacto con el agua.

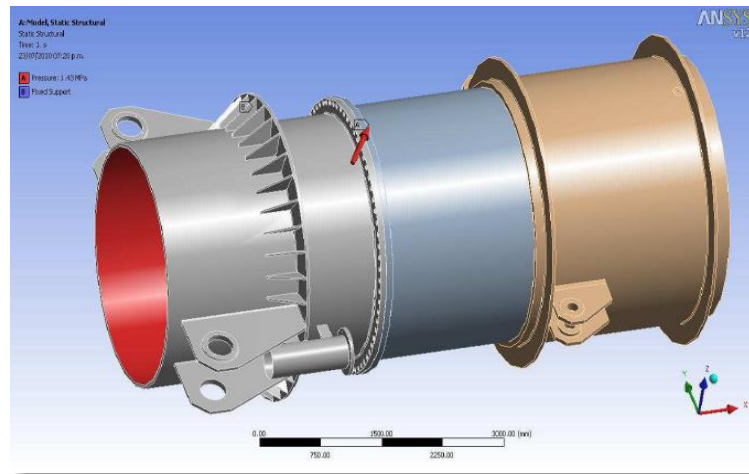


Figura No. 41 Condiciones frontera en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

Como resultados de deformación para la válvula, se aprecia en la ilustración siguiente de la izquierda que el azul tiene 0 mm significa como mínimo, el rojo tiene un valor máximo de 0.37429 mm y derecha el azul tiene un valor mínimo de 0 mm, el rojo es de 0.45489 mm como máximo; esto significa los puntos más vulnerables de deformación para la válvula de chorro divergente, como se puede observar en la figura No. 42.

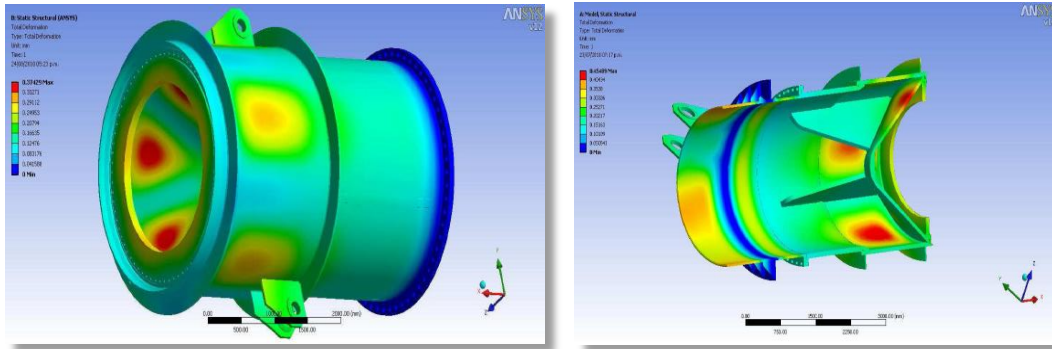


Figura No. 42 La deformación de la válvula de chorro en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

Los resultados de esfuerzo de la válvula, se presentan en las siguientes imágenes con corta diferencia de valores: el azul 0.01 Mpa como mínimo, el verde 50.4 Mpa y el rojo con un valor de 100.86 Mpa como máximo. Por tanto, los esfuerzos permitidos es 161.6 Mpa (ASME sección VIII Div. 02 indica que $1/3R_m = 1/3 \cdot 485$ esfuerzo último de tensión para la placa = 161.6 Mpa). Se observa el esfuerzo máximo 100.86 Mpa, significa que los valores están por debajo del límite permitidos, figura No. 43.

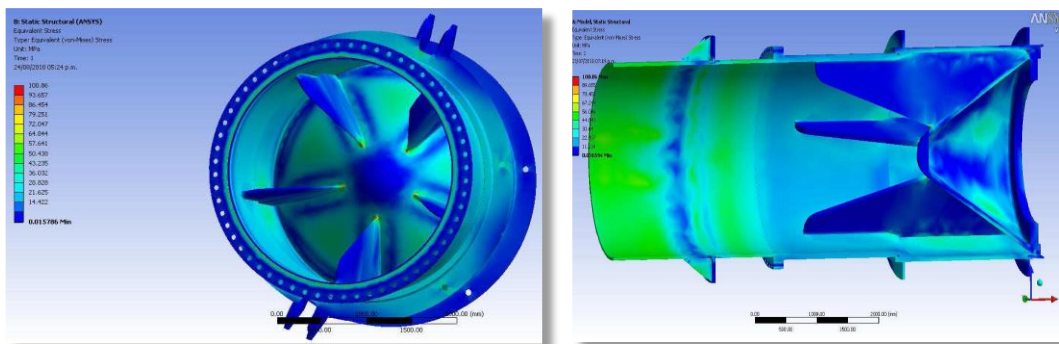


Figura No. 43 El esfuerzo de la válvula en ANSYS (Reporte CFE, 2012).

En la figura No. 44, se muestran los resultados del esfuerzo y deformación en el soporte del servomotor; la izquierda es el esfuerzo: el azul 0.0003 Mpa como mínimo, el rojo 59.23 Mpa como máximo; y la derecha la deformación: el azul 0 mm como mínimo, el rojo 0.51 mm como máximo; se concluye que cumple con la fuerza requerida durante el cierre y apertura.

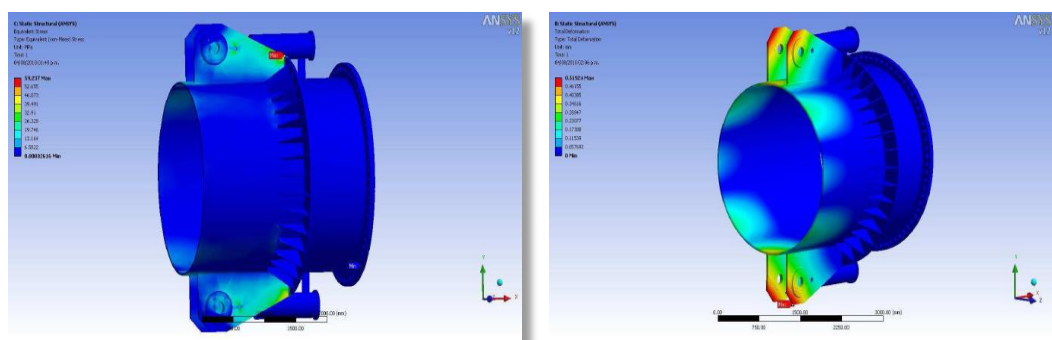
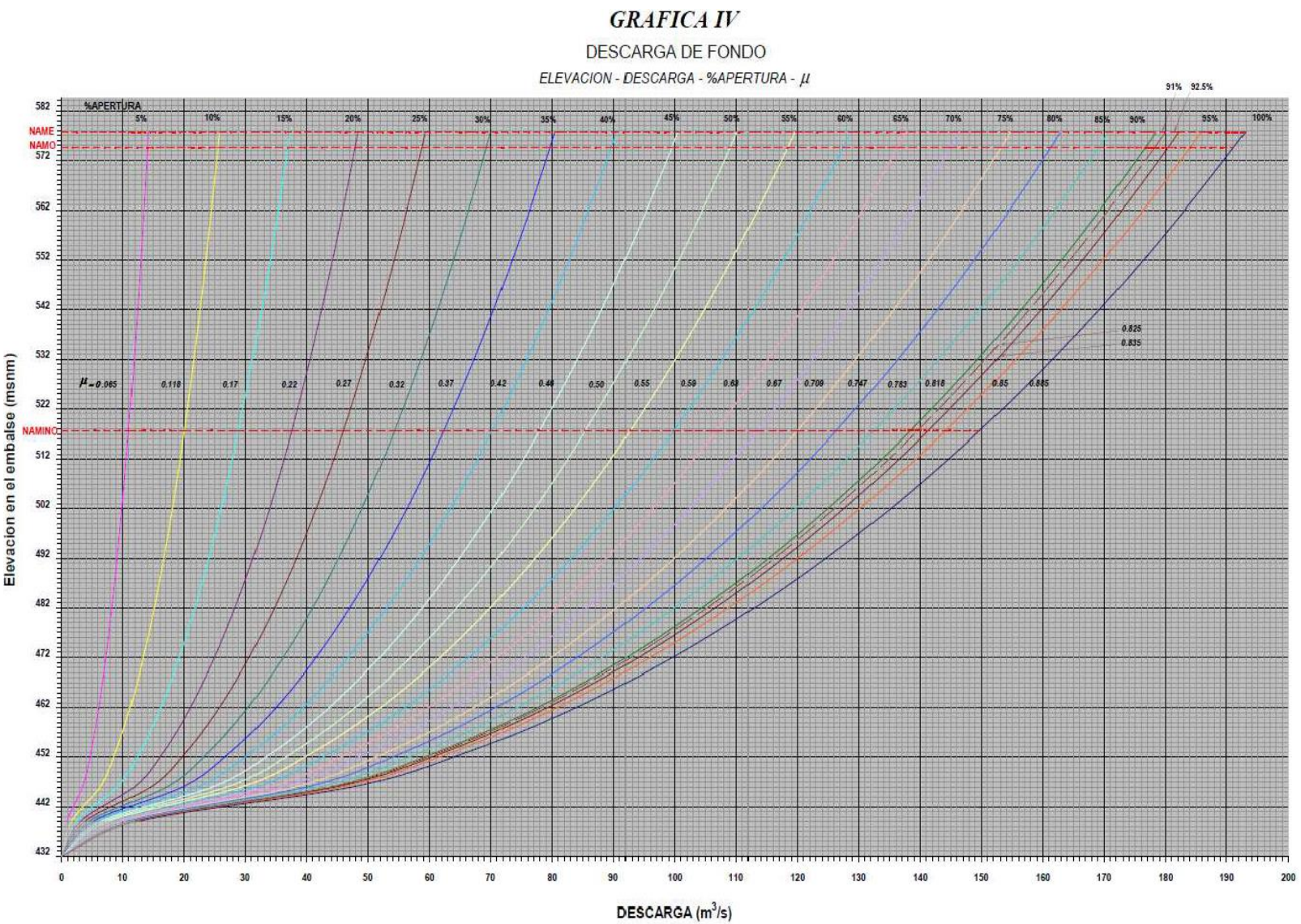


Figura No. 44 El esfuerzo y deformación en el soporte del servomotor (Reporte CFE, 2012).

A continuación se presenta la gráfica de Elevación-Descarga-%Apertura- μ . Donde $\mu = C_d$ es el coeficiente de la válvula de chorro divergente. En conclusión, se cumple con el gasto de diseño de 180 m³/s con una apertura de 92.5%, obteniendo un coeficiente $C_d = 0.835$ ($C_d = 0.85$).



Gráfica No. 3 Gráfica de Elevación-Descarga-%Apertura- μ (Reporte CFE, 2012).

Los resultados mostrados esquemáticamente en el apartado de la descarga de fondo mediante la resolución de ANSYS se concluye que fue satisfactorio por el buen funcionamiento hidráulico de la parte más importante de la zona de válvula, cámara y zona de transición; podríamos decir, que faltarían imágenes de toda la estructura para observar más a detalle sobre el funcionamiento en general.

Posteriormente, con el estudio independiente de la válvula de chorro, los resultados muestran que de acuerdo con las especificaciones de la CFE y empresa particular se cumplen; obteniendo así el coeficiente Cd mediante la gráfica de Elevación-Descarga-%Apertura- μ ; donde $\mu = Cd$ es el coeficiente, de esta forma se comprueba que la válvula de chorro cumple con el gasto de diseño de 180 m³/s con una apertura aproximada de 92.5%, tal como se indica en la gráfica No. 3.

5.4 Análisis de resultados

Para la solución de este estudio es necesario conocer el comportamiento y las condiciones que pueden afectar la adecuada operación del desagüe de fondo; además de los cálculos de diseño para emplear modelos físicos y simulaciones utilizando herramientas computacionales.

Las simulaciones matemáticas se desarrollaron utilizando los programas comerciales de Flow-3D y ANSYS. La primera realizada por el Departamento de Ingeniería Civil de la CFE y la segunda por el fabricante de las válvulas. Ambas están diseñadas y validadas para calcular el campo de flujo y estructura utilizando la técnica de volumen finito y elemento finito.

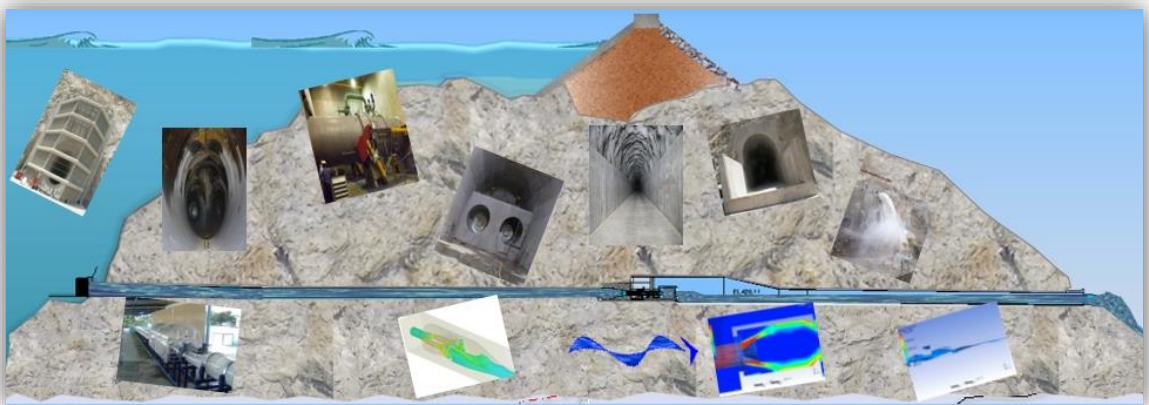
El modelo para el desagüe de fondo con Flow-3D, se basa en la simulación del comportamiento del agua en la estructura de la descarga (bifurcación, zonas de válvulas, cámara, transición y conducción de sección portal); con los datos de entrada y las simulaciones presentadas; se concluyó en forma general un comportamiento satisfactorio en toda la estructura, como se puede ver en el apartado V.2.

Los resultados numéricos que se obtuvieron mediante ANSYS, fueron analizadas en el apartado V.3. Concluyendo que con el uso de este programa es bueno por los datos obtenidos, observado su comportamiento de la descarga, ayudando en el diseño y construcción.

Estos modelos están diseñados para asegurar una predicción casi exacta, con las resoluciones obtenidas a detalle con ambos software, ya que los diferentes equipos que analizaron la estructura son expertos en la materia. Primero, por cumplir con las especificaciones técnicas de la CFE y las normas nacionales vigentes, así como, según las recomendaciones de organismos internacionales como ICOLD.

La modelación conjunta de los modelos numéricos con los diferentes programas resultaron muy satisfactorias, no sólo desde el punto de vista cualitativo, que proviene de la simple observación del comportamiento del flujo, sino también desde el punto de vista cuantitativo, ya que puede verificarse de las ilustraciones, tablas, gráficas y datos presentados en los apartados V.2 y V.3. Así, como comparar resultados del modelo físico.

CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

La enseñanza hidráulica se basa en las ecuaciones teóricas, soluciones empíricas dadas por instituciones, personalidades y por los resultados de la modelación física y matemática de los problemas (León, 2012). Los problemas que se presentan en las obras hidráulicas siempre son analizados, ya que cambian dependiendo el proyecto de estudio y el costo. Es decir, con ayuda de información y con el uso de la tecnología siempre puede mostrarse con claridad y seguridad los resultados de las diferentes obras. Actualmente podemos aseverar que ya existe herramientas de forma ágil y convincente, tanto cualitativa como cuantitativamente, conocer el comportamiento del fluido en pruebas de modelos o en prototipo, construidos con el seguimiento de operación y rehabilitaciones.

Para la elaboración de este proyecto se tomó en cuenta la importancia de la teoría y la práctica, ya que gracias a ellas, se conoce el origen, las finalidades, como su ubicación y sus partes de la estructura que lo integran el “Desagüe de Fondo” en presas de gran tamaño. Así, como nuevas técnicas para su estudio y ejemplos de presas con desagüe de fondo.

Como ejemplo práctico se describió el diseño hidráulico del desagüe de fondo del P.H. “La Yesca” que se desarrolló entre los límites de Jalisco y Nayarit. La ubicación del proyecto, las descripciones de sus partes importantes como la bocatoma con rejilla, la conducción de sección circular, bifurcación (simétrica), zonas de válvulas (2 mariposa y 2 chorro divergente), cámaras (2 circulares), zona de transición, conducción de sección portal y la estructura terminal. Así, como sus alternativas y arreglos que surgieron durante la elección del diseño, principalmente se detalla la alternativa elegida.

En la parte de diseño hidráulico nos percatamos de la importancia de tener una investigación de forma desglosada como se muestra en esta tesis, para su mejor entendimiento, así como datos obtenidos que servirá a otros estudios. Al presentar como caso práctico la descarga de fondo “La Yesca” mediante un análisis detallado se comprende la importancia de la hidráulica. Por ello, estos resultados ayudaron para su diseño y construcción de modelos físico y matemático contrastándolo con la obra real.

El modelo físico se realizó por separado para su construcción, contemplando el espacio, costo y tiempo. La parte construida fue la conducción circular, bifurcación, zonas de válvulas, cámara disipadora de energía, zona de transición y conducción de sección portal; sin tomar en cuenta el resto la bocatoma con rejilla, parte de la conducción circular y la parte terminal. Con las modificaciones se dieron resultados favorables, en tener un buen funcionamiento hidráulico. Hubo una excepción de la estructura terminal por el espacio y la escala que se

manejó el modelo no se podía analizar el comportamiento con el problema de la erosión, entonces se tuvo que construir un modelo independiente para su estudio, después de varios cambios se dio un resultado factible, en cuestión de no provocar problemas de erosión de la ladera y la salida del túnel desvió No. 2.

Por otro lado, los modelos numéricos han avanzado notablemente en años recientes, mediante el uso de métodos modernos, en programas comerciales de Flow-3D y ANSYS; con ayuda de estos programas se realizó la resolución del desagüe de fondo, considerando datos de entrada y, parte de la estructura como condiciones frontera; con los resultados obtenidos de los reportes, se observa que en la zona de bifurcación, válvulas, cámara y transición, el agua circula de forma estable, sin ningún problema de ahogamiento.

En forma general, de acuerdo a los resultados que se obtuvieron en todo el proceso de investigación para cada caso de exposición; se conoce el desagüe de fondo y los estudios de la descarga de fondo "La Yesca". En el caso de "La Yesca" se llegó a concluir que el funcionamiento hidráulico en la zona de bifurcación-válvulas-cámara-transición, es buena, sin embargo puede generarse problemas de estructura por el impacto del agua, pero se solucionó con la construcción y ensayos de los modelos. Con los modelos de la descarga de fondo se obtuvo que se debe resistir la carga estática total con el embalse lleno y ser capaz de funcionar con esa carga máxima. Para cualquier tipo de funcionamiento de emergencia, prueba y normal trabajará con presión reducida y máxima con seguridad de maniobra. Cabe considerar que el suministro de aire para el funcionamiento del desagüe será mediante el túnel de salida; ya que las válvulas y el conducto son necesarios.

Entonces una vez logrado estos resultados favorables, se dejó personal calificado para su control, teniendo a su cargo equipo sofisticado para dar mantenimiento, con el fin de evitar problemas de mal funcionamiento cuando se pueda requerir esta obra de seguridad como parte del proceso en cuestión.

Se recomienda que aún con todos estos estudios (teóricos y prácticos en modelos físicos y numéricos) del comportamiento de la estructura del desagüe de fondo y aún con el conocimiento de la falla geológica del margen izquierda no esté al cien por ciento ya que como cualquier otra obra de su dimensión, esto depende en gran manera de la naturaleza o un error de construcción y humano; sabemos antemano que forma parte de las medidas preventivas para presas de gran magnitud, pero se tiene registro que en cualquier obra hay fallas. En otras palabras, esta obra debe ser analizada por otras personas que ya tienen experiencias en este campo y llevar un registro, no únicamente en esta área de interés, sino en todo el proyecto hidroeléctrico.

Es importante denotar que el uso de las pruebas de campo o emergencia, con las altas velocidades puede provocar daños como cavitación, vibraciones y depresiones; porque no es lo mismo observar en modelos físicos y numéricos que trasladándolo a una estructura real. Los modelos nos ofrecen ideas de comportamiento general de la estructura, pero no el real construido, entonces es necesario aprovechar cuando se realizan pruebas de campo para comparar los resultados. De lo anterior, surgen otras interrogantes: ¿En cuánto tiempo los equipos y materiales estarán en buenas condiciones hasta su primer mantenimiento? ¿Fue necesario todo el costo? ¿En caso de rehabilitación qué proceso de construcción y solución se daría; en cualquier parte de la estructura del desagüe? Lo que se podía contestar en futuras investigaciones.

Para finalizar, en marzo de 2013 se realizaron pruebas al desagüe de fondo del Proyecto Hidroeléctrico “La Yesca”, las cuales consistió en probar cada una de las válvulas por separado, después ambas simultáneamente con un gasto de 200 m³/s que corresponde a un 95% de diseño, por lo que, cumplió satisfactoriamente su funcionamiento. Así, se contestan algunas de las interrogantes de esta investigación. En el apartado de anexo No. 3 del proceso constructivo se puede observar ilustrativamente en la parte final las pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

Manuales, especificaciones y guías técnicas.

CFE, Válvulas de Seccionamiento Tipo Mariposa y Mecanismos de Operación para Centrales Hidroeléctricas, Especificación CFE GV000-87, Editorial CFE, México, D.F., 2010.

CFE, Desagüe de Fondo con Válvulas para Centrales Hidroeléctricas, Especificación CFE G0100-06, Editorial CFE, México, D.F., 2011.

CFE, Manual de Diseño de Obras Civiles: Hidrotecnia/técnicas experimentales, Editorial Comisión Federal de Electricidad, México, D.F. 1983.

CNA, Manual para Capacitación en Seguridad de presas, Módulo Inspección de Vertedores y Obras de Desfogue, Editorial CNA, México, D.F., 1998.

CNA, Manual para Capacitación en Seguridad de Presas, Módulo La Importancia de la Seguridad de presas, Editorial CNA, México, D.F., 1999.

CNEGP (Comité Nacional Español de Grandes Presas), Guías Técnicas de Seguridad de Presas. Guía Técnica no. 5: Aliviaderos y Desagües, I.S.B.N. 84-89567-06-9, Editorial CNEGPC, España, Madrid, 1997.

Reportes, publicaciones y otros.

CFE, PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA, NAYARIT, presentación en pdf de la SUBDIRECCIÓN DE CONSTRUCCIÓN, COORDINACIÓN DE GENERACIÓN, DIRECCIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN FINANCIADA; CFE, México, D.F., febrero de 2007.

CFE, PROYECTO HIDROELÉCTRICO LA YESCA, JAL.-NAY. “DESCARGA DE FONDO”, presentación en PowerPoint de la SUBGERENCIA DE DISEÑOS HIDROELÉCTRICOS, COORDINACIÓN DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA, GERENCIA TÉCNICA, CFE, México, D.F., octubre de 2010.

CFE, P. H. LA YESCA, “FUNCIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA TERMINAL DE LA DESCARGA DE FONDO, EN MODELO HIDRÁULICO”, presentación en PowerPoint del Laboratorio de Hidráulico; CFE, México, Mor. Cuernavaca, marzo de 2011.

CFE, MEMORIA DESCRIPTIVA DE LA OBRA MONTAJE DE LA VÁLVULA DE SEGURIDAD DN 3500 EN LA TUBERÍA DE PRESION Y DEL DESAGUE DE FONDO EN LA CORTINA, Coordinación de Proyectos Hidroeléctricos gerencia

de construcción de Proyectos Hidroeléctricos, Del P.H. Zimapán, área de electromecánica, México, 2010.

De Fco. J. P., and D. Perez-Cecilia, Implementation a new bottom outlet in Jarosa dam, employment a tunnel boring machine without emptying the reservoir, International congress in large dams/CIGB (ICOLD), 23, 2009, Brasilia, Brasil, [Conference proceedings]. París, Francia: ICOLD, 2009, p. 12.

Documento de ESTUDIO 1016. LA YESCA, FUNCIONAMIENTO DE LA DESCARGA DE FONDO, EN MODELO HIDRÁULICO, $Le=16.40$, De la SUBGERENCIA DE DISEÑO HIDROELECTRICOS, CFE, LABORATORIO DE HIDRÁULICA. México, Mor. Cuernavaca, Diciembre de 2010.

CFE, PROCEDIMIENTO PARA LA OPERACIÓN DEL DESAGÜE DE FONDO, LA YESCA, COORDINACIÓN DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS, MÉXICO, D.F., junio de 2012.

Hydro Equipment, International Power Generation, vol. 12, núm. 3, abr. 1989, pp. 13-16.

Malik, and Munir, Hydraulic design of the low level outlets for Dasu dam, Pakistan, International journal on hydropower and dams, vol. 18, núm. 1, 2011, pp. 41-44.

Marengo, H., Análisis de riesgo de falla en presas, estadísticas y parámetros de referencia, Ingeniería hidráulica en México, vol. 11, núm. 2, mayo/ago. 1996, pp. 65-77.

Marengo, H., Seminario Seguridad de Presas con título Consideraciones de riesgos de falla en presas mexicanas, coordinado por SEMARNAT y CNA, en 2002.

REPORTE TÉCNICO No. 912 001 519 Rev. 06, LA YESCA, DESCARGA DE FONDO, ESTUDIO DE LA CÁMARA DISIPADORA MEDIANTE ANÁLISIS NUMÉRICO CON ANSYS CFD. Andritz Hidro S. A. de C. V., México, Mich. Morelia, Julio de 2012.

REPORTE TÉCNICO No. 912 001 513 Rev. 05, LA YESCA, VÁLVULA DE CHORRO DIVERGENTE, CÁLCULO DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE LA VÁLVULA DE CHORRO DIVERGENTE. Andritz Hidro S. A. de C. V., México, Mich. Morelia, Junio de 2012.

REPORTE TÉCNICO No. 912 001 576 Rev. 03, LA YESCA, MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO VÁLVULA DE CHORRO DIVERGENTE

PARA LA ESTRUCTURA DE DESCARGA DE FONDO. Andritz Hidro S. A. de C. V., México, Mich. Morelia, Abril de 2011.

Riera J., New bottom outlets for Iznájar dam, International congress in large dams/CIGB (ICOLD), 23, 2009, Brasilia, Brasil, [Conference proceedings]. París, Francia: ICOLD, 2009, p. 9.

Schneider J., D. Mayr, G. Heigerth, The model tests of the bottom outlet of the Kárahnjúkar hydro-electric project, Waterpower XV, 2007, www.hcipub.com.

Libros y tesis.

Castillo, Fernando, Estudio experimental de dos alternativas de disipadores de energía a la salida del túnel de desvío del Proyecto Sopladora II, Tesis de la Escuela Politécnica Nacional, Fac. de Ing. Civil y Ambiental, Ecuador, Septiembre de 2011.

Rodríguez, Pedro, Hidráulica de Canales, Editorial Sistema Nacional de Educación Superior Tecnológica, México, Oaxaca, 2008.

Saldarriaga V. y Juan G., Hidráulica de Tuberías, I.S.B.N. 958-600-831-2, Editorial Limusa, Colombia, Bogotá, 1998.

Sotelo, Gilberto, Hidráulica General, volumen 1, I.S.B.N. 968-18-0503-8, Editorial Limusa, México, D.F., 1997.

Vergara, S. y Miguel A., Técnicas de Modelación en Hidráulica, I.S.B.N. 970-15-0114-4, Editorial Alfaomega, México, D.F., 1995.

Vallarino, Eugenio, Tratado Básico de Presas Tomo II/ Construcción y Explotación de Presas, I.S.B.N. 84-380-0145-9, Cuarta edición, Editorial CICCIP, España, Madrid, 1998.

Páginas y/o Documentos electrónicos

ANSYS (2012) ANSYS CFD, [En línea], < <http://www.ansys.com/> > [Consulta: septiembre de 2012].

CFE (2012) CENTRALES HIDROELÉCTRICAS/LA YESCA, [En línea], < <http://www.cfe.gob.mx/YESCA/ES/Paginas/Inicio.aspx> > [Consulta: abril de 2012].

Cursos y Apuntes (2005) LAS LEYES DE NEWTON, [En línea], < <http://fisica.ciencias.uchile.cl/~rferrer/cursos/04.pdf> > [Consulta: mayo de 2012]

Castro, Marco (2003) SOBRE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA EN OBRAS DE SANEAMIENTO, [En línea], <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/ecuador10/le_o.pdf> [Consulta: junio de 2012].

De Dios, Mariano (2012) MODELACIÓN MATEMÁTICA Y FÍSICA DE UN VERTEDERO MODIFICADO, [En línea], <http://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/04_019_de_Dios.pdf> [Consulta: agosto de 2012].

Física (2006) CALOR Y LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA, [En línea], <<http://www2.udec.cl/~jinzunza/fisica/cap13.pdf>> [Consulta: mayo de 2012].

Flow-3D (2012) CFD Software: FLOW-3D Overview, [En línea], <<http://www.flow3d.com/>> [Consulta: septiembre de 2012].

González, Santos (2008) LOS DESAGUES DE FONDO EN PRESAS, [En línea], <http://www.spancold.es/Ponencias/JEPVIII_081.pdf> [Consulta: marzo de 2012].

García, S. (2008) CENTRALES ELÉCTRICAS, [En línea], <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/contenidos_didacticos/CentralesElectricas.pdf> [Consulta: marzo de 2012].

ICOLD (2012) Instrucción para Proyectos, Construcción y Explotación de Grandes Presas (IPCEGP), [En línea], <<http://www.spancold.es/normativa/instruccion.pdf>> [Consulta: marzo de 2012].

Kazu, Fábio (2006) MODELAGEM MATEMÁTICA EM OBRAS HIDRÁULICAS, [En línea], <http://www.ppgerha.ufpr.br/dissertacoes/files/108-Fabio_Kazuo_Inoue.pdf> [Consulta: agosto de 2012].

Llamas, Ángel (2004) SOBRE DESAGUES DE FONDO EN LAS GRANDES EMBALSES, [En línea] <http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1948/1948_tomo1_2801_03.pdf> [Consulta: marzo de 2012].

León, Alcides (2012) EMPLEO DE LOS MODELOS VISUALES EN LA ENSEÑANZA Y LA INVESTIGACIÓN, HIDRÁULICOS, INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, VOL. XXXIII, No. 1, Ene-Abr 2012, [En línea], <http://revistascientificas.cujae.edu.cu/Revistas/Hidraulica/Vol-XXXIII/1-2012/03-17-Empleo_de_los_modelos_visuales.pdf> [Consulta: agosto de 2012].

Monroy, Cristóbal (2006) ENERGÍAS RENOVABLES: HIDRÁULICA/ENERGIA HIDRAULICA, [En línea] <<http://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/hidraulica.pdf>> [Consulta: marzo de 2012].

Mendaña, Felipe (1997) COMPORTAMIENTO DE LOS EMBALSES, [En línea] <http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1997/1997_diciembre_3371_06.pdf> [Consulta: marzo de 2012].

Mateos, Critobal (2000) LA MODELACIÓN FÍSICA EN LAS OBRAS HIDRÁULICAS, INGENIERÍA DEL AGUA, VOL. 7, No. 1, Marzo 2000, [En línea], <<http://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2810/1/71article6.pdf>> [Consulta: junio de 2012].

Monografías básicas (2007) ASPECTOS TEÓRICOS DE EN MODELOS HIDRÁULICOS, [En línea], <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/monografias/basic/rojas_rl/cap2.pdf> [Consulta: julio de 2012].

Nanía, Leonardo (2011) ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO 3D DEL FLUJO SUPERCRÍTICO EN UN CRUCE DE CALLES, [En línea], <<http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/10972/1/4474320.pdf>> [Consulta: agosto de 2012].

Orbinox (2006) CATALOGO DE EQUIPOS HIDROMECAÑICOS, ISO 9000:2000, primera edición, [En línea] < www.orbinox.com > [Consulta: marzo de 2012].

Orrego, Santiago (2010) SIMULACION DE FLUIDOS UTILIZANDO COMPUTADORES, Universidad EFIT, Medellín, Colombia, [En línea], <http://mecanica.effit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf> [Consulta: agosto de 2012].

Papiros (2004) LEY DE CONSERVACIÓN DE LA MASA, [En línea], <http://www.papiros.com.uy/2004/biblioteca/Biblioteca_Curricular%5Cciencias-fisicas/Ley-de-conservacion-de-la-masa.pdf> [Consulta: mayo de 2012]

Revistas de Obras Públicas (1997) PROYECTO HIDROELÉCTRICO ING. FERNANDO HIRIART BALDERRAMA (ZIMAPÁN) MÉXICO, [En línea], <http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1997/1997_marzo_3363_35.pdf> [Consulta: agosto de 2013].

ANEXOS



ANEXO No. 1 GLOSARIO.

Obra de Desagüe: Una obra de desfogue es el mecanismo normal para desalojar el agua embalsada por la presa, debe trabajar durante las emergencias para evitar pérdidas de vida y daños materiales. Las obras de desfogue se puede clasificar de acuerdo con tres criterios diferentes: finalidad, configuración estructural y operación hidráulica.

Falla de presa: Descarga sin control de agua embalsada. Incluye daños físicos a la estructura de la cortina y a estructuras adicionales, tales como la obra de excedencias, obra de toma, etc. Puede comprender pérdida de vidas, de propiedades o daños y cambios adversos al medio ambiente, aguas debajo de la presa.

Seguridad: Es la capacidad de la estructura, el embalse, y la zona aguas abajo, para llenar los requisitos de comportamiento, durante la vida útil de la presa, relacionados con aspectos ambientales, estructurales, hidráulicos y operacionales.

Cortina o presa: Es una barrera fabricada con piedra, hormigón o materiales sueltos, que se construye habitualmente sobre un río o arroyo. También son obras de ingeniería que contribuyen al logro de mejores niveles de bienestar para las sociedades.

NAME: Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias, que corresponde al nivel más alto que debe alcanzar el agua en un vaso bajo cualquier condición.

NAMO: Nivel de Aguas Máximas Ordinarias o de Operación, es el máximo nivel del agua que puede operar la presa para satisfacer las demandas.

Superalmacenamiento: Es el volumen que se encuentra entre el NAME y el NAMO y es utilizado para controlar las avenidas que se presentan cuando el nivel en el vaso de la presa está cercano al NAMO.

NAMINO: Nivel de Aguas Mínimas de Operación, corresponde al nivel más bajo con que opera una presa.

NAMIN: Nivel de Aguas Mínimas, corresponde al nivel más bajo con que opera una presa cuando ésta es con fines de irrigación y otros usos.

Ley de Conservación de Masa, esta ley fue enunciada por el científico francés Antoine Lavoisier en la segunda mitad del siglo XVIII, también es conocida como Ley de Lavoisier. Ley de Conservación de la Masa: *La masa de un sistema cerrado es constante, aunque en el sistema se produzcan cualquier tipo de procesos físicos o químicos.* La siguiente frase extraída de una publicación de A. Lavoisier, nos dice: “Nada se crea, nada se destruye, todo se transforma”.

La segunda Ley de Newton, indica que: “El cambio de momentum de una partícula es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo, como también al intervalo durante el cual ella se aplica, y apunta en la dirección y sentido de esta fuerza”. Esta ley se publicó en los principios fundamentales de la mecánica que Isaac Newton en el libro “Principia” en 1687.

La primera ley de Termodinámica, es una generalización de la ley de conservación de la energía que incluye los posibles cambios en la energía interna. Es decir, que establece que cuando un sistema experimenta un cambio de un estado a otro, el cambio en su energía interna.

Prototipo, obra, máquina, fenómeno o sistema natural que se desea estudiar. A las variables relacionadas con él se les añade el subíndice p.

Modelo, representación de un prototipo, para lo cual deben utilizarse condiciones de similitud o semejanza. A estas variables se les asigna el subíndice m.

Modelo físico, también conocido como modelo hidráulico, es cualquier modelo físico que sirve para la simulación de un estado o comportamiento del flujo sobre una determinada estructura, que esté relacionada con problemas hidrodinámicos o de ingeniería hidráulica.

Escala, relación que existe entre una magnitud del prototipo y su correspondiente en modelo. Se representa con el símbolo de la variable tratada, a la cual se añade el subíndice e.

Modelo numérico, representación virtual sobre un ordenador, mediante un proceso de ingreso de datos.

Válvula de mariposa

“Las válvulas de mariposa constituyen uno de los medios más simples, robustos y económicos para manejar caudales en conductos de tomas y descargas” (Orbinox, 2006).

“Las válvulas de mariposa se utilizan en funciones de emergencia, y aunque en algunos casos, principalmente válvulas de diámetros pequeños, se han utilizado para regular el caudal, esta forma de operación no es aconsejable, debido a la gran turbulencia, vibraciones y posible cavitación que tienen lugar en la válvula y tubería aguas abajo” (Ídem).

Por otro lado, se localizan principalmente en “...tuberías forzadas de las centrales hidroeléctricas, tomas y descargas, así como en órganos de cierre en casos de emergencia. Las válvulas de mariposa, en la mayoría de los casos,

están constituidas por una caja de acero, la cual es una tubería cilíndrica con el mismo diámetro interior que el conducto en el cual está instalada” (Ídem).

La obtención de la ventaja sobre este tipo de válvula es mediante “...la geometría de cierre bi-excéntrica, que elimina en gran parte el rozamiento junta-asiento, y hace que el flujo del agua tienda al cierre de la válvula. Ofrece un sellado continuo en toda la circunferencia y la robustez de su diseño permite abrir y cerrar en aguas vivas”. En la figura siguiente se muestra sus partes que lo integran:

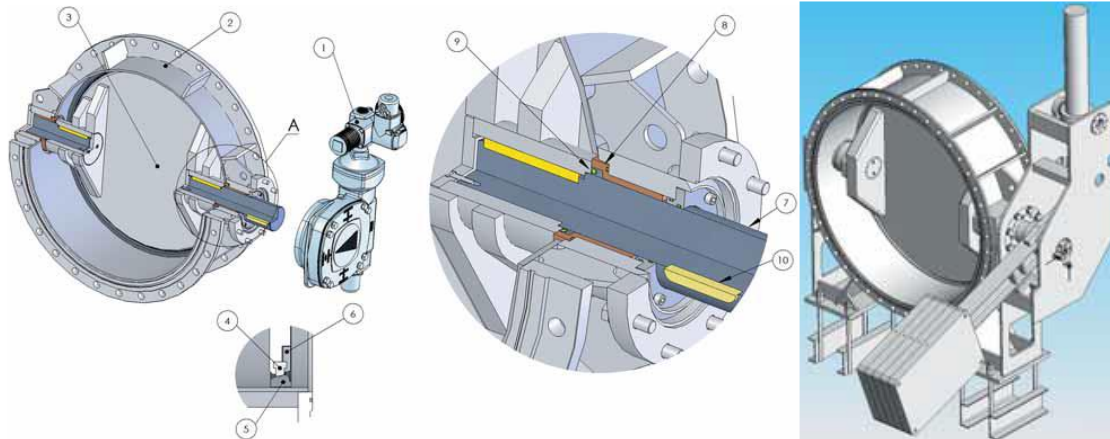


Figura No. 45 Elementos y accionamiento hidráulico de la válvula de mariposa: 1. Accionamiento, 2. Cuerpo, 3. Disco, 4. Junta, 5. Asiento, 6. Anillo sujeción junta, 7. Eje, 8. Cojinete 9. Sellado eje y 10. Chaveta (Orbinox, 2006).

Válvula de chorro hueco (también conocidas como Howell Bunger o válvulas de salida cónica o chorro divergente)

Esta “...se utiliza normalmente como órgano de cierre y regulación en desagües de fondo e intermedio de presas y embalses así como válvula de bypass de turbina en centrales hidroeléctricas. La válvula de chorro hueco descarga directamente al aire libre como prolongación del conducto de desagüe de fondo que va embebido en el hormigón del cuerpo de la presa...Esta válvula descarga un chorro en forma de cono hueco (tipo abanico o spray). Al entrar en contacto con el aire, se disipa la energía por pulverización y mezcla con el aire. El agua es recogida normalmente aguas abajo en un cuenco amortiguador” (Ídem).

Las ventajas que tiene este tipo de válvulas: es que son “...livianas, sencillas, sin problemas de cavitación ni vibraciones, y muy fáciles de operar y mantener” (Ídem). El diseño, la fabricación, accionamientos, pruebas, materiales y normas, todo esto forma la válvula para tener una excelente operación sin tener limitaciones en las descargas. En la siguiente figura se muestra como está constituida la válvula de chorro hueco.

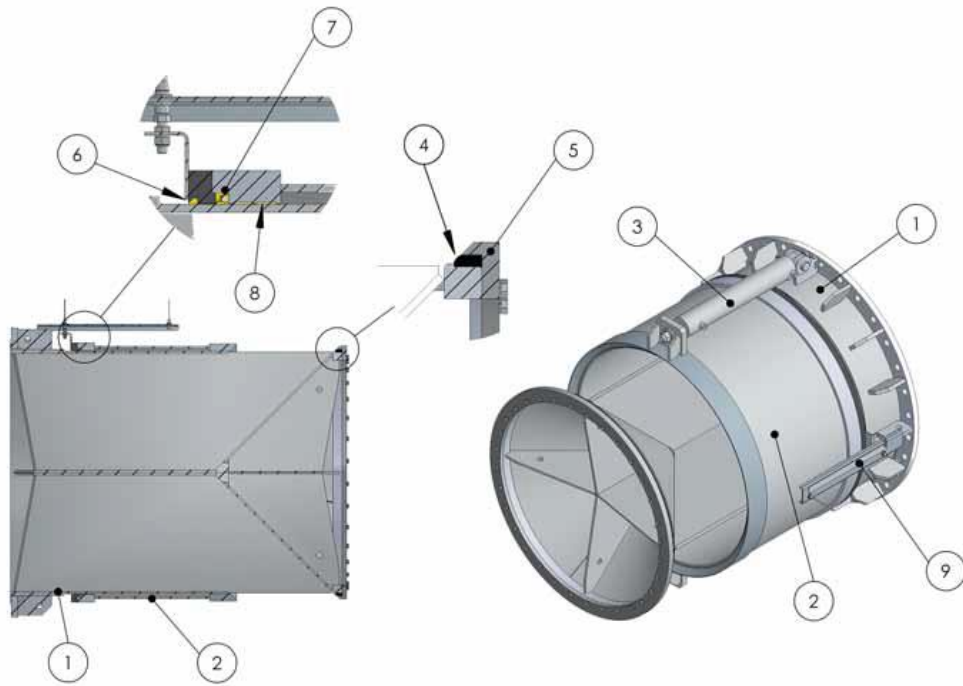


Figura No. 46 Elementos y detalle de la válvula de chorro hueco: 1. Cuerpo, 2. Camisa, 3. Cilindro hidráulico, 4. Junta, 5. Anillo sujeción junta, 6. Rascador, 7. Junta de labio + tórico, 8. Deslizaderas y 9. Regleta graduada (Orbinox, 2006).

ANEXO No. 2 ABREVIATURAS.

Abreviaturas	Significado
CNEGPC	Comité Nacional Español de Grandes Presas
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CNA	Comisión Nacional del Agua
P.H.	Proyecto Hidroeléctrico
NAME	Nivel de Aguas Máximo Extraordinario
NAMO	Nivel de Aguas Máximas Ordinarias o de Operación
NAMINO	Nivel de Aguas Mínimas de Operación
NAMIN	Nivel de Aguas Mínimas
ICOLD	Comisión Internacional de Grandes Presas
SE	Secretaría de Energía
MW	Megawatts
m	Metros
msnm	Metros sobre el nivel del mar
cd	Coeficiente
Hm³	Hectómetro cubico
D.F.	Distrito Federal

ANEXO No. 3 PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DEL DESAGÜE DE FONDO DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO “LA YESCA”.

El desagüe de fondo también conocido como descarga de fondo del P.H. “La Yesca”, se localiza sobre el margen izquierda entre la ataguía de aguas arriba y la cortina (plinton), teniendo como inicio una elevación de 431.00 msnm, de la losa de piso de protección y teniendo la longitud del km 0+000 aguas arriba al km 0+541.854 metros aguas abajo. Por estudios geológicos se encuentra en macizos rocosos.

A continuación un resumen del proceso constructivo, según Memoria Descriptiva, “La Yesca” (2012):

De acuerdo con los planos del proyecto inicio con **el talud del portal de entrada**, en la colocación de los tratamientos cuya finalidad es brindar un buen soporte y estabilidad de la roca. Los tratamientos que se colocaron son los siguientes: amacice y perfilado, limpieza del talud, aplicación de concreto lanzado reforzado con doble malla electro soldada, barrenación y colocación e inyección de anclaje de fricción, y la barrenación de drenaje para eliminar la presión hidrostática en la roca, y luego se colocaron los marcos metálicos en el portal de entrada. No olvidemos que fue primera la marcación topográfica para iniciar el trabajo.

En la excavación del **túnel de la conducción de entrada que corresponde del Km 0+002.5 al 0+278.076**. El ciclo de excavación trató con la marcación topográfica, barrenación de la plantilla para voladura, limpieza y sopleteo de los barrenos, carga de explosivos, disparo de la voladura, ventilación, retiro de rezaga de material, amacice y perfilado, y la excavación quedo integrada con la colocación de los tratamientos de soporte de la roca, los avances de excavación fueron a cada 3 metros.

La colocación de los tratamientos de estabilización y soporte de la roca **del túnel de la conducción de entrada desde el Km 0+002.5 al 0+278.076**. Antes para dar inicio este ciclo fue necesario el amacice, perfilado, y limpieza con agua a presión en muros y bóveda. El ciclo para la colocación de tratamientos correspondió en colocación de concreto lanzado, trazo topográfico, barrenación para la colocación de anclaje de fricción, colocación de anclaje de fricción, inyección de anclaje de fricción, colocación de malla electro soldada, colocación de placas metálicas de 20x20 cm en anclaje, perforación de barrenos para drenaje, los tratamientos quedaron integrados con el ciclo de excavación.

La excavación de la parte de la **bifurcación, zona de válvulas, zona de la caseta de control de válvulas, cámara disipadora, y la transición, que corresponde del Km 0+278.076 al 0+376.384**. Su ciclo de excavación comprendió el siguiente procedimiento constructivo marcación topográfica, barrenación de la plantilla para voladura y voladuras por medio de banqueos, limpieza y sopleteo de los barrenos, carga de explosivos, disparo de la voladura, ventilación, retiro de rezaga de material, amacice y perfilado, la excavación

quedo integrada con la colocación de los tratamientos de soporte de la roca, los avances de excavación se realizaron a cada 3 metros.

El ciclo para la colocación de los tratamientos de estabilización y soporte de la roca, en la **bifurcación, zona de válvulas, zona de la caseta de control de válvulas, cámara disipadora, y la transición, ubicado en el Km 0+278.076 al 0+376.384**. Antes para dar inicio este ciclo fue necesario el amacice, perfilado, y limpieza con agua a presión en muros y bóveda. El procedimiento consistió en la colocación de concreto lanzado, trazo topográfico, barrenación para la colocación de anclaje de fricción, colocación de anclaje de fricción, colocación de malla electro soldada, colocación de placas metálicas de 20 x 20 cm en anclaje, perforación de barrenos para drenaje, los tratamientos quedaron integrados con el ciclo de excavación.

El ciclo de excavación del **túnel de la conducción de salida, del Km 0+376.384 al 0+541.854**. Comprendió las siguientes actividades, marcación topográfica, barrenación de la plantilla para voladura, limpieza y sopleteo de los barrenos, carga de explosivos, disparo de la voladura, ventilación, retiro de rezaga de material, amacice y perfilado, la excavación quedo integrada con la colocación de los tratamientos de soporte de la roca, los avances de excavación se realizaron a cada 3 metros.

La colocación de los tratamientos de estabilización y soporte de la roca, del **túnel de la conducción de salida, que corresponde del Km 0+376.384 al 0+541.854**. Antes para dar inicio este ciclo fue necesario el amacizado, perfilado, y limpieza con agua a presión en muros y bóveda de la excavación. El proceso constructivo corresponde en la colocación de concreto lanzado, trazo topográfico, barrenación para la colocación de anclaje de fricción, inyección de anclaje de fricción, colocación de malla electro soldada, colocación de placas metálicas de 20 x 20 cm en anclaje, perforación de barrenos para drenaje, los tratamientos quedaron integrados con el ciclo de excavación.

El talud del portal de salida, en el km 0+541.854 aguas abajo con una elevación de 425.70 msnm. Para la colocación de los tratamientos de estabilización y soporte de la roca estuvo presente primero la marcación topográfica. Después los tratamientos que inicio con el amacice y perfilado, limpieza del talud, aplicación de concreto lanzado reforzado con una capa de malla electro soldada, barrenación y colocación e inyección de anclaje de fricción, y la barrenación de drenaje para eliminar la presión hidrostática en la roca, y luego se colocaron los marcos metálicos en el portal de salida.

A continuación se presenta una línea de tiempo de inicio a fin del proceso constructivo, hasta la prueba del desagüe de fondo, en forma ilustrativa:



Localización del desagüe de fondo (CFE La Yesca, 2013). **1 de febrero de 2010**



Termino de la colocación de marcos metálicos en el túnel de entrada en aguas arriba (CFE La Yesca, 2013). **15 de marzo de 2010**



Tratamiento para el soporte y estabilización del talud de entrada (CFE La Yesca, 2013). **3 de febrero de 2010**



Anclajes en muros y bóveda en la zona de bifurcación; colocación de marcos metálicos en zona de válvulas, caseta de control y zona de transición (CFE La Yesca, 2013). **30 de abril de 2011**



Preparativos para la colocación de marcos metálicos del túnel de entrada del desagüe aguas arriba (CFE La Yesca, 2013). **27 de febrero de 2010**



Preparación para la zona de la bifurcación y acabados de detalles de los marcos metálicos (CFE La Yesca, 2013). **31 de mayo de 2011**



Colocación de marcos metálicos y malla electro soldada; y recubrimiento de concreto en zona de transición (CFE La Yesca, 2013). **30 de julio de 2011**



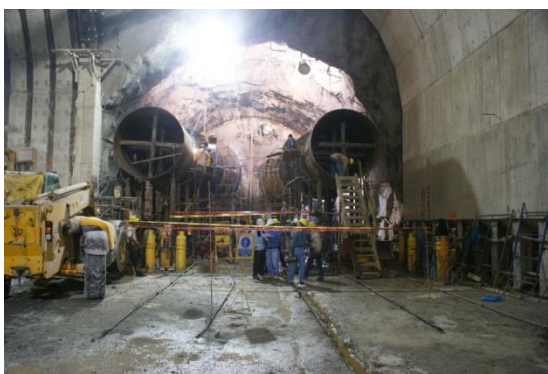
Recubrimiento de concreto de los marcos de metálicos de la zona de transición y túnel de salida (CFE La Yesca, 2013). **30 de septiembre de 2011**



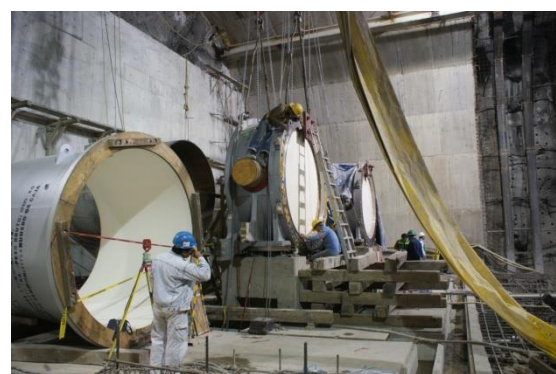
Ensamble de la bifurcación (CFE La Yesca, 2013). **20 de agosto de 2011**



Bifurcación con su armado de refuerzo en el exterior y bóveda (CFE La Yesca, 2013). **15 de octubre de 2011**



Término de la bifurcación y armado de refuerzo para el relleno de concreto (CFE La Yesca, 2013). **30 de septiembre de 2011**



Colocación de la válvula mariposa (CFE La Yesca, 2013). **29 de noviembre de 2011**



Construcción de la caseta de control (CFE La Yesca, 2013). **10 de diciembre de 2011**



Armado de refuerzo en la bocatoma (CFE La Yesca, 2013). **29 de febrero de 2012**



Colocación de la cimbra entre la separación de la conducción con blindaje, del túnel de conducción aguas arriba, (CFE La Yesca, 2013). **10 de diciembre de 2012**



Colocación del dissipador de energía del margen izquierda (CFE La Yesca, 2013). **3 de marzo de 2012**



Colocación y ajustes de los controles de desagüe de fondo (CFE La Yesca, 2013). **15 de febrero de 2012**



Término de los dissipadores de energía, haciendo los últimos acabos (CFE La Yesca, 2013). **13 de marzo de 2012**



Armado de la rejilla de la bocatoma (CFE La Yesca, 2013). **12 de abril de 2012**



Termino de los disipadores de energía y en el interior se observa las válvulas de chorro (CFE La Yesca, 2013). **31 de mayo de 2012**



Armado de refuerzo en el exterior de los disipadores de energía, empotrado hacia ambos lados (CFE La Yesca, 2013). **5 de mayo de 2012**



Aplicación de recubrimiento a la rejilla de la bocatoma (CFE La Yesca, 2013). **31 de mayo de 2012**



Últimos detalles de la construcción de la rejilla de la bocatoma (CFE La Yesca, 2013). **5 de mayo de 2012**



Llenado del embalse, cubriendo los túneles de desvió (CFE La Yesca, 2013). **15 de junio de 2012**



Llenado del embalse, a punto de cubrir la rejilla de la bocatoma (CFE La Yesca, 2013). **30 de junio de 2012**



Construcción del camino de rodamiento al final de la estructura terminal, aguas abajo (CFE La Yesca, 2013). **23 de enero de 2013**



Acabado de los disipadores de energía y zona de transición (CFE La Yesca, 2013). **2 de enero de 2013**



Plantilla del canal de la estructura terminal (CFE La Yesca, 2013). **31 de enero de 2013**



Acabado de la zona de retorno del agua entre las cámaras y muro separador (CFE La Yesca, 2013). **2 de enero de 2013**



Armado de acero para la estructura terminal del desagüe de fondo con sus respectivos reflectores plantilla y laterales (CFE La Yesca, 2013). **5 de febrero de 2013**



Construcción de la platilla de la ladera (CFE La Yesca, 2013). **15 de febrero de 2013**



Prueba del desagüe de fondo (CFE La Yesca, 2013). **08 de marzo de 2013**



Prueba del desagüe de fondo (CFE La Yesca, 2013). **08 de marzo de 2013**



Prueba del desagüe de fondo (CFE La Yesca, 2013). **08 de marzo de 2013**



Prueba del desagüe de fondo (CFE La Yesca, 2013). **08 de marzo de 2013**



Cortina, túneles 1 y 2, y desagüe de fondo (CFE La Yesca, 2013). **08 de marzo de 2013**