



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ANÁLISIS DE FENÓMENOS HIDRÁULICOS
TRANSITORIOS EN LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN
QUE UNE AL POZO III DE CIUDAD UNIVERSITARIA
CON LOS TANQUES DE REGULARIZACIÓN DEL
VIVERO ALTO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A:
JOSÉ ALBERTO VELA BARRERA

DIRECTOR DE TESIS:
M. I. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES



Ciudad Universitaria, México, D.F., 2015.



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Señor
JOSÉ ALBERTO VELA BARRERA
Presente

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/020/15

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. CRISTIAN EMMANUEL GONZÁLEZ REYES, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

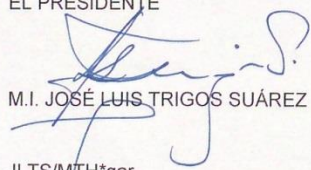
"ANÁLISIS DE FENÓMENOS HIDRÁULICOS TRANSITORIOS EN LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN QUE UNE AL POZO III DE CIUDAD UNIVERSITARIA CON LOS TANQUES DE REGULARIZACIÓN DEL VIVERO ALTO"

- INTRODUCCIÓN
- I. FUNDAMENTOS TEÓRICOS
- II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE CIUDAD UNIVERSITARIA
- III. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN POZO III-TANQUES DE REGULARIZACIÓN
- IV. ANÁLISIS DE TRANSITORIOS
- V. USO DE PROGRAMA TRANS PARA EL ANÁLISIS DE TRANSITORIOS
- VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS
- VII. CONCLUSIONES

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 23 de marzo del 2015.
EL PRESIDENTE


M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH*gar.

Mirando hacia atrás en silencio.

“En cualquier lugar en que estuvieran recordaran siempre que el pasado era mentira, que la memoria no tenía caminos de regreso, que toda primavera antigua era irrecuperable, y que el amor más desatinado y tenaz era de todos modos una verdad efímera.”

(Cien años de soledad, Gabriel García Márquez)

Índice de contenido

Índice de Figuras	7
Índice de tablas	10
Agradecimientos	11
Capítulo I Introducción	13
1.1 Antecedentes	15
1.2 Objetivos	16
1.3 Alcances.....	16
1.4 Limitaciones	17
Capítulo II Fundamentos teóricos	18
2.1 Línea de conducción.....	18
2.1.1 Línea de conducción a gravedad	18
2.1.2 Línea de conducción a bombeo.....	20
2.1.3 Tuberías.....	21
2.1.4 Dispositivos de control	22
2.1.5 Almacenamiento para distribución.....	23
2.1.6 Distribución del agua.....	24
2.2 Transitorios hidráulicos.....	24
2.3 Velocidad de propagación de la onda de presión	26
2.4 Fórmula de Joukowsky	27
2.4.1 Coeficientes de transmisión y reflexión de las ondas de presión	29
2.5 Efectos físicos provocados por fenómenos transitorios	32

2.5.1	Sobrepresión y depresión	32
2.6	Recomendaciones para la protección de la conducción.....	33
2.7	Dispositivos para el control de transitorios	34
2.8	Condiciones en las cuales se puede presentar un fenómeno hidráulico transitorio.....	42
Capítulo III Descripción del sistema de agua potable de Ciudad Universitaria.....		46
3.1	Sistema de agua potable de Ciudad Universitaria	46
3.2	Suministro de agua.....	46
3.2.1	Extracción y operación de los pozos	48
3.2.1.1	Localización de los pozos.....	51
3.2.2	Regularización	52
3.2.2.1	Localización de tanques de regularización.....	54
3.2.3	Distribución	55
3.2.3.1	Tuberías de Ciudad Universitaria	56
Capítulo IV Descripción del sistema de conducción pozo III - tanques de regularización		59
4.1	Obra de captación pozo III	59
4.1.1	Desinfección	61
4.2	Equipo de bombeo	62
4.3	Tubería de la línea de conducción.....	66
4.3.1	Trayectorias.....	67
4.3.1.1	Topografía y cruzamientos.....	68
4.4	Dispositivos de control existentes en la línea de conducción.....	72
4.5	Tanques de regularización	79
4.6	Operación.....	82

Capítulo V Análisis de transitorios.....	85
5.1 Análisis de transitorios generados por cierre total y parcial de una válvula de control...	86
5.2 Análisis del transitorio que se produce en la línea de conducción pozo III – tanques de regularización con la ecuación de Joukowsky.....	96
Capítulo VI Uso de programa Trans para el análisis de transitorios	101
6.1 Análisis del transitorio durante el disparo de una bomba con el programa Trans.....	103
Capítulo VII Análisis de resultados	109
7.1 Resultados con el uso de las ecuaciones diferenciales del golpe de ariete y las ecuaciones de Allievi.....	109
7.2 Resultados del programa Trans.....	112
7.3 Comparativa con la resistencia de los elementos que integran a la línea de conducción	114
Capítulo VIII Conclusiones.....	116
Bibliografía	117

Índice de Figuras

Figura 1 Componentes que integran un trazo altimétrico. FUENTE: Manual de prácticas, Taller de abastecimiento de agua potable y alcantarillado, 2014-2.	20
Figura 2 Sobrepresión y presión que genera el cierre de una válvula en un punto intermedio de una tubería. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	29
Figura 3 Arribo de una onda de presión a una unión de dos tubos. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	30
Figura 4 Reflejo de una onda de sobrepresión de un tanque. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	31
Figura 5 Reflejo de una onda de sobrepresión de un extremo cerrado. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA. .	32
Figura 6 Funcionamiento de una válvula de alivio de resorte. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	34
Figura 7 Diferentes combinaciones de una válvula de no retorno intermedia con otros medios de control. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	35
Figura 8 Torre de oscilación. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	37
Figura 9 Tanque unidireccional con dispositivo de llenado. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	38
Figura 10 Esquema de funcionamiento de tanque unidireccional cerrado. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	38
Figura 11 Tanque bidireccional. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	39
Figura 12 Formas de mantener el aire en cámaras de aire:	40
Figura 13 Membrana destructible. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.....	41
Figura 14 Onda de presión positiva generada por el arranque de una bomba. Cafaggi Félix, Amalia Adriana. (2011). Sistemas de bombeo.....	43
Figura 15 Onda de presión negativa por el paro programado de una bomba. Cafaggi Félix, Amalia Adriana. (2011). Sistemas de bombeo.....	44
Figura 16 Bomba de cada pozo de extracción en Ciudad Universitaria.	47
Figura 17 Porcentaje de extracción de agua de pozos. FUENTE: DGOyC. UNAM.	48
Figura 18 Cono de abatimiento en un pozo ordinario o libre. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.	49
Figura 19 Ubicación de pozos en Ciudad Universitaria. FUENTE. DGOyC. UNAM.....	51
Figura 20 Tanque Vivero Alto, Tanque Alto y Tanque Bajo.	53

Figura 21 Ubicación de tanques de almacenamiento en Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM.	54
Figura 22 Red de tuberías de Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM.	57
Figura 23 Caseta de vigilancia pozo III.	59
Figura 24 Corte transversal del pozo.	60
Figura 25 Equipo de desinfección del agua extraída del pozo.	61
Figura 26 Equipo electrónico para dosificación del hipoclorito.	62
Figura 27 Bomba sumergible.	63
Figura 28 Subestación eléctrica.	64
Figura 29 Cabezal de descarga.	64
Figura 30 Equipo de bombeo.	65
Figura 31 Manómetro y caudalímetro colocados en la obra de captación.	66
Figura 32 Calibración y uso de equipo ultrasónico.	67
Figura 33 Vista en planta de la línea de conducción (pozo III – tanques de regularización). FUENTE: DGOyC. UNAM.	68
Figura 34 GPS y cinta de 50 m.	69
Figura 35 Información extraída del GPS con el programa MapSource.	69
Figura 36 Perfil de la línea de conducción generado en Excel.	70
Figura 37 Perfil topográfico de la línea de conducción.	71
Figura 38 Comparación del levantamiento hecho con GPS y el levantamiento topográfico.	72
Figura 39 Equipo de bombeo, accesorios y válvulas.	73
Figura 40 Crucero (31), válvulas.	74
Figura 41 Crucero (30-A), arreglo de válvulas.	74
Figura 42 Arreglo de válvulas crucero (30-A)	75
Figura 43 Crucero (30-B).	75
Figura 44 Crucero (30), (30-A), (30-B) Y (31).	76
Figura 45 Caja de válvulas entrada a los tanques de regularización.	76

Figura 46 Válvulas y accesorios crucero (28).....	77
Figura 47 By-pass, arreglo de válvulas y tees de paso con reducción.	77
Figura 48 Reducción hacia tanques de regularización.	78
Figura 49 Tees de paso hacia los demás tanques.....	78
Figura 50 Crucero (29), llegada de la tubería para descarga de agua.	79
Figura 51 Tanques de regularización, Vivero Alto.	80
Figura 52 Registro de control y tubería de ventilación de los tanques.	80
Figura 53 Descarga libre.	81
Figura 54 Registro de observación principal.	81
Figura 55 Vista de tubería y descarga libre.	82
Figura 56 Crucero (30-A) lugar donde se ejecuta la maniobra de cierre de válvula.....	85
Figura 57 Tramo de la conducción para análisis de transitorios al cierre de una valvula.	86
Figura 58 Variación de la carga de presión en un tiempo de cierre de 30 s.....	91
Figura 59 Variación de la carga de presión en un tiempo de cierre de 10 s.....	92
Figura 60 Variación de la carga de presión en un cierre parcial de válvula.....	95
Figura 61 Variación de la carga en cierre de válvula a 30 s, 10 y cierre parcial.....	96
Figura 62 Menú principal para captura de datos del programa Trans.	103
Figura 63 Arreglo de tuberías y dispositivos de control.	104
Figura 64 Recopilación de datos de la bomba.....	105
Figura 65 Captura del archivo de datos para su posterior simulación.	106
Figura 66 Envolvente de cargas máximas y mínimas después del disparo de la bomba.	107
Figura 67 Envolvente de carga máxima, mínima, piezométrica en operación y perfil topográfico.	108
Figura 68 Cierre de válvula en 30 y 10 segundos.	109
Figura 69 Cierre parcial y total.	110
Figura 70 Envolventes de las cargas involucradas para el análisis de transitorios generado por el disparo de la bomba.	113

Índice de tablas

Tabla 1 Módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson μ para materiales de tuberías.	27
Tabla 2 Características generales de los pozos en Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM.	47
Tabla 3 Características generales de los tanques de Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM.....	52
Tabla 4 Porcentaje y longitud de los diferentes materiales de la red de distribución.	56
Tabla 5 Datos de GPS para perfil de topográfico.....	70
Tabla 6 Datos perfil topográfico.	71
Tabla 7 Modelo para analizar el transitorio generado por cierre o apertura de válvula.	88
Tabla 8 Análisis para un tiempo de cierre de 30 s.	90
Tabla 9 Análisis para un tiempo de cierre de 10 s.	92
Tabla 10 Análisis para un cierre parcial de válvula.	94

Agradecimientos

La realización de este trabajo es el resultado de todo el esfuerzo y dedicación durante muchos años, por esta razón me permito dirigir estas palabras a mis seres queridos y a todas las personas que he conocido a lo largo de mi vida y que algún día convivieron conmigo.

De manera muy especial y con mucho cariño agradezco mucho a mis padres, Zenaida Barrera Lujano y Javier Vela Domínguez por apoyarme a lo largo de mi carrera, por estar a cada momento junto a mí, por enseñarme a ser un hombre responsable, honesto y humilde, a mis hermanos David y Ulises ya que son parte de mi vida y me hacen reír a todo momento, así como el apoyo de toda mi familia, a Diana una persona muy especial que me mostro cosas interesantes a lo largo de esta corta vida.

A mis amigos que durante el transcurso de la carrera estuvieron conmigo, teniendo momentos memorables, de los cuales he aprendido mucho a Denis Rico Pérez, Abigail Marisol Rivera Martínez, Ariadna Alejandra Tenorio Roque, Erika Martínez de la Cruz, Yesica Martínez Cirilo, Alejandra Concepción Peralta Blanco, Janis Marlene Gutiérrez Torres, Mejía García Brenda Iranny, Viridiana Luna Herrera, Miguel Ángel Carrasco Carrillo, Alfredo García Zamudio, Israel Olvera Gracia, José Eduardo Hernández Crisóstomo, Francisco Javier Chávez García, Erick Rodrigo Hernández Tello, Jonathan Omar Tornero Gómez, Germán Adrián Aguilar Martínez, Daniel Ramírez Bretón, Oscar Allan Valle Oviedo, Gabriel Isaid Paz Martínez, Martín Angeles Valdez Diego Cruz Merino, Leopoldo Isaac Alaniz Ceja, muchas gracias por brindarme su amistad.

Quizás la emoción de escribir estas palabras de agradecimiento para ustedes haga que muchas personas que tienen que estar aquí no lo estén, ya que la memoria falla cuando tienes una emoción tan grande, a todos aquellos que conozco quisiera que estuvieran en estas líneas, aunque no los mencione siempre estarán en mis recuerdos.

A mis compañeros de trabajo ya que me han enseñado una manera diferente de vivir la vida, así como la responsabilidad en el trabajo y vivir día a día de forma alegre, Josué Pablo Hidalgo Jiménez y Saúl Morales Rivera, gracias.

A la UNAM por mostrarme cosas interesantes a lo largo de mi carrera y enseñarme a ser una mejor persona, pertenecer a ella ha marcado una etapa importante en mi vida.

Al Instituto de Ingeniería ya que fue el lugar donde comencé a formarme como profesional en el ámbito de la Ingeniería Civil, específicamente en el área de Hidráulica, mostrándome la importante labor que tiene un Ingeniero para la sociedad, al programa PUMAGUA y PADHPOT.

A la Facultad de Ingeniería ese lugar donde forje un carácter profesional y responsable, donde conocí muchas cosas y personas interesantes, en cada aula donde tome clase aprendí demasiado gracias a los maestros que tuve.

A mi director de tesis el M. en I. Cristian Emmanuel González Reyes, por el apoyo que me brindó a la realización de este trabajo, por los buenos consejos y por ser una gran persona.

A mis sinodales, el Dr. Enrique César Valdez, al M. en I. Guillermo Mancilla Urrea, al M. en I. Alexis López Montes, y al Ing. Heriberto Esquivel Castellanos, por los consejos dentro y fuera del salón de clases.

Hice mi mejor esfuerzo en esta etapa de la vida, deséenme que todo me vaya bien.

Muchas gracias a todos...

Ciudad Universitaria. Abril de 2015.

José Alberto Vela Barrera

Capítulo I Introducción

El crecimiento poblacional y económico ha ejercido presión sobre las reservas de agua en México, al punto que en algunas zonas del país, el volumen demandado de agua es mayor que el volumen suministrado.

Pese a que México es un país rico en recursos naturales, no lo es en términos de precipitación pluvial, ya que el 90% del agua de lluvia cae en cuatro meses (junio a septiembre), hecho que propicia una escasa infiltración. Aunado a esto, del total de agua pluvial, una gran parte se evapora. La corta temporada de lluvias aunada a la desproporción que existe entre la cantidad de agua que se capta por escurrimiento y las extensiones territoriales, hace que la disponibilidad del agua sea cada vez menor.

La configuración de los sistemas de abastecimiento de agua en México varía de una localidad a otra, reflejo, en gran medida, de los diferentes niveles de desarrollo en el país. En algunas localidades se tienen sistemas de abastecimiento muy eficientes, mientras que en localidades menos desarrolladas se tienen sistemas de abastecimiento deficientes.

Un sistema eficiente se define como la relación entre la capacidad de captación, conducción y distribución del agua con la que cuenta un sistema hidráulico de abastecimiento urbano, y la capacidad real con la que funciona dicho sistema.

El análisis de transitorios hidráulicos es de gran importancia ya que en el país existen desde líneas de conducción muy cortas, hasta conducciones como las que tiene el sistema Cutzamala de más de 150 km. Saber las presiones que se pueden presentar dentro de la línea de conducción, es de mucha importancia, ya que de esta manera se harán mejores diseños para soportar fenómenos transitorios.

A continuación se resume lo que se verá en cada capítulo, describiendo de manera general el contenido de cada uno.

En el Capítulo 1 se incluye una introducción acerca del tema de tesis, el objetivo principal del mismo, los objetivos particulares, los alcances a los que se quiere llegar y las limitaciones que se tuvieron al hacer el análisis de los fenómenos hidráulicos transitorios.

En el Capítulo 2 se abordan los fundamentos teóricos para el análisis de transitorios, describiendo los elementos principales de una línea de conducción y abarcando un poco acerca de sistemas de abastecimiento de agua potable, considerando de manera general los transitorios que pueden ocurrir en una línea de conducción, y los casos en que ocurren fenómenos transitorios en conducciones a bombeo, asimismo la teoría necesaria para el análisis de los mismos, determinando los efectos físicos que pueden ocasionar las presiones dentro de una tubería, dando recomendaciones para la protección de la tubería en presencia de un transitorio.

En el Capítulo 3 se describe de manera global el abastecimiento de agua potable al campus de Ciudad Universitaria, abordando el suministro de agua potable a las dependencias de la UNAM, incluyendo la extracción del agua de los pozos, conducción hacia los tanques de regularización, así como su localización, se describe de manera general la red de agua potable y los materiales y diámetros comúnmente utilizados, para dar paso a la descripción del sistema, objeto de la presente tesis, el cual es la línea de conducción que une al pozo III ubicado en el Jardín Botánico con los tanques de regularización de Vivero Alto.

El Capítulo 4 describe de manera detallada cada elemento que integra a la conducción. Es de suma importancia la descripción de cada elemento especificando las características de la obra de captación, el proceso de desinfección que se le da al agua, el equipo de bombeo con el que se cuenta, el material de la conducción y la trayectoria que maneja, tomando en cuenta la topografía, mencionando los dispositivos de control que existen en toda la línea, hasta la descarga a los tanques de regularización, proporcionando información acerca de la operación del sistema.

En el Capítulo 5 se presenta el resultado de una simulación con las ecuaciones fundamentales del golpe de ariete y las ecuaciones de Allievi, se efectuó la simulación para un cierre total y parcial de una válvula de control de flujo mostrando así la variación de la carga de presión dentro de la tubería para cada caso, también se usó la ecuación de Joukowsky para determinar las cargas de presión máximas y mínimas que ocurren durante el cierre instantáneo de una válvula, este caso será para la válvula check ya que no deja que el flujo regrese. Con base en los resultados obtenidos de los cálculos realizados con dicha ecuación, se realizó para el análisis del fenómeno hidráulico transitorio, generado por el disparo de una bomba.

En el Capítulo 6 emplearon los resultados obtenidos en el subcapítulo 5.2, como insumo de un programa especial para la determinación de las condiciones más desfavorables en la línea de

conducción. El programa empleado se llama Trans¹, el cual muestra las envolventes de cargas máximas y mínimas que se producen cuando existe un fenómeno transitorio; cabe destacar que dichas cargas de presión son aquellas que se presentan para el caso más desfavorable en la conducción, que es el paro repentino del equipo de bombeo, también llamado disparo de la bomba, con base en la teoría se determinó si el transitorio generado por este motivo puede dañar a la tubería.

En el Capítulo 7 se muestran los resultados obtenidos en los últimos dos capítulos, haciendo un análisis de la información obtenida con la teoría y con el uso del programa Trans, determinando si la conducción puede o no soportar un fenómeno transitorio en el momento en que el equipo de bombeo falle.

Las principales conclusiones a las que se llegó, son las siguientes:

El sistema de conducción que une al pozo III con los tanques de regularización funciona y opera adecuadamente, el transitorio generado por el paro accidental del equipo de bombeo no causara efectos físicos graves a la conducción.

Los dispositivos antiarriete funcionarán adecuadamente frente a un fenómeno hidráulico transitorio.

El uso del programa Trans fue de gran ayuda para determinar las condiciones más desfavorables en el sistema, asimismo se determinó la respuesta que tendrá la conducción ante presiones altas y bajas dentro de la tubería.

1.1 Antecedentes

En la Ciudad de México, la mayor parte del agua para suministro (54.0%) se extrae de 607 pozos y de los ramales del Río Magdalena, el resto proviene del Sistema Cutzamala (30.0%), del Sistema Lerma (12.0%) y del Risco (4.0%). Se calcula que más de la tercera parte del agua suministrada se pierde en fugas en la red y que el uso más importante es el doméstico (42.0%) sobre del agua extraída). *Repensar la cuenca, La gestión de ciclos del agua en el Valle de México, México D. F., 2010.*

¹ Trans es un software, hecho por el Dr. Rafael B. Carmona Paredes y la M. C. Libia G. Carmona Paredes.

Los pozos de extracción se concentran en las orillas del antiguo lecho lacustre, en donde las arcillas tienen menos espesor y es la zona por donde entran las aguas de recarga. Los pozos se encuentran fuertemente concentrados en el poniente de la ciudad, en la base de la Sierra de Las Cruces, y otra fuerte concentración en la orilla oriente, en el Acuífero de Texcoco.

La mayor parte del agua se extrae de pozos así que el agua extraída tiene que ser bombeada a tanques elevados, por ello se usan muchas líneas de conducción a bombeo y es donde ocurren también fenómenos transitorios. El propósito de esta tesis fue realizar un estudio de transitorios, llevando a cabo una serie de pasos para la determinación de los mismos, esperando que este documento sea de ayuda para cualquier persona que le interese cómo analizar un transitorio en una línea de conducción a bombeo.

1.2 Objetivos

Objetivo principal

Analizar los fenómenos transitorios de la línea de conducción que parte del pozo III a los tanques de regularización, en Ciudad Universitaria, mediante el análisis del trazo de la trayectoria, dimensiones, materiales y política de operación.

Objetivos particulares

- Explicar los conceptos teóricos y la metodología para el análisis de transitorios hidráulicos en conductos a presión.
- Describir de forma detallada los elementos que integran la conducción del pozo III a los tanques de regularización en Ciudad Universitaria.
- Revisar la concordancia entre la resistencia que ofrecen los materiales de la conducción con los efectos físicos generados en la tubería, debido a los fenómenos hidráulicos transitorios.
- Analizar los efectos físicos generados por el paro repentino de la bomba, que es el proceso de operación que genera la mayor sobrepresión.

1.3 Alcances

- Se realizó el análisis de los fenómenos transitorios que ocurren en la línea de conducción, tomando en cuenta las distintas circunstancias en las cuales se pueden presentar, la

prioridad fue analizar el caso más desfavorable, el cual se presenta en el disparo de la bomba o paro repentino del equipo de bombeo.

- Se analizaron los fenómenos transitorios mediante el uso de un programa de computadora llamado Trans. Solo se determinaron las presiones máximas y mínimas que dicho fenómeno pueda llegar a ocasionar, ya que estas son las condiciones que pueden poner en riesgo al sistema.
- Se determinó si el sistema es capaz de soportar los efectos físicos generados por un fenómeno transitorio de gran magnitud.

1.4 Limitaciones

- No se realizó un análisis detallado de las ecuaciones involucradas en la descripción de los fenómenos transitorios, solo se efectuó un resumen de aquellas fórmulas que son de utilidad para el cálculo de los mismos.
- Solo se empleó el programa Trans, para hacer el análisis de transitorios para el caso más desfavorable, el cual es el disparo de la bomba.
- El programa Trans, genera diversos archivos, solo se consideró aquel que muestra la variación de la carga, donde se establecen las presiones máximas y mínimas, durante el disparo de la bomba.

Capítulo II Fundamentos teóricos

2.1 Línea de conducción

En el contexto de un sistema de abastecimiento de agua potable se denomina línea de conducción al conjunto de tuberías, soportes, uniones, válvulas, estaciones de bombeo y dispositivos de control, que transportan agua de un elemento del sistema hidráulico urbano hasta otro. Por ejemplo desde la captación hasta la planta potabilizadora, o bien desde esta última hasta el tanque de regularización, desde donde será distribuida iniciando con otra línea de conducción llamada línea de alimentación en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión.

Una línea de conducción debe tener una trayectoria acorde al perfil del terreno y ubicarse de manera que pueda inspeccionarse fácilmente. Un aspecto que determina si la línea será externa o enterrada es el material del tubo y los costos que involucra la excavación. Con base en las características topográficas del origen con respecto al destino, la línea de conducción puede funcionar por gravedad o a bombeo.

Las líneas de conducción de agua se calculan mediante procedimientos establecidos. En general su diseño consiste en definir la trayectoria, soportes, diámetro, espesor y el material de la tubería. Lo anterior considerando los datos básicos de diseño, tales como la temperatura y caudal.

2.1.1 Línea de conducción a gravedad

Se dice que una línea de conducción es a gravedad cuando se emplea energía potencial, esto es, la energía que se utiliza para la conducción proviene del desnivel entre el origen y el destino, por ejemplo, cuando se cuenta con una fuente de abastecimiento situada en algún punto elevado respecto al destino, que puede ser la planta potabilizadora.

Para el diseño de una línea de conducción a gravedad, se tiene una secuencia de cálculo que considera las condiciones más desfavorables de operación, lo que definirá la energía disponible. Con base en ésta, se determina el diámetro teórico, mismo que consumirá mediante pérdidas debidas a la fricción y accesorios la energía con la que se cuenta. Quizás sea necesaria una configuración que consista en dos diámetros comerciales diferentes, esto cuando el diámetro obtenido en el cálculo no exista en los catálogos comerciales, utilizando entonces el inmediato

superior y el inmediato inferior al teórico. Posteriormente se realiza el trazo altimétrico y el análisis del mismo, entre otras cosas para corroborar que no existan cargas de presión con alturas por debajo del perfil de la conducción, hecho que podría involucrar peligro de cavitación o de rompimiento de columna, ver Figura 1.

Trazo altimétrico

En el diseño de líneas de conducción a gravedad es práctico expresar la variación vertical del eje de la tubería a lo largo de su trayectoria. A este trazo se le llama perfil del terreno. Este trazo permite representar las componentes de la energía a lo largo de la conducción. Las cuales son:

- Energía estática

Es la representación de la energía que el sistema tiene en condiciones estáticas. Se representa con un trazo horizontal que coincide con el nivel de agua en el origen.

$$H_{est} = Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + h_f + h_a \quad \text{Ecuación 1}$$

- Energía total

Es la energía que el sistema tiene en condiciones de operación a flujo establecido en cada punto. Para su trazo será necesario identificar, en distintos puntos a lo largo de la tubería, la pérdida de energía ($h_f + h_a$), que será restada de la energía estática. La energía utilizable es la diferencia entre la línea de energía total y el eje de la tubería, por lo que la integran la carga de presión y la carga de velocidad como se muestra a continuación.

$$H_{util} = \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Energía piezométrica

Es la representación de la altura piezométrica que posee el fluido a lo largo de la línea de energía. Se obtiene de restarle la carga de velocidad a la energía total. La energía piezométrica permite, en función de la carga de presión observada, definir el espesor de tubo.

A partir de definir un plano horizontal de referencia (PHR) se establece que la carga piezométrica está integrada por la diferencia entre el PHR y el eje de la tubería, llamada carga de posición sumada con la carga de presión, como se muestra a continuación.

$$H_{util} = Z + \frac{P}{\gamma} \quad \text{Ecuación 3}$$

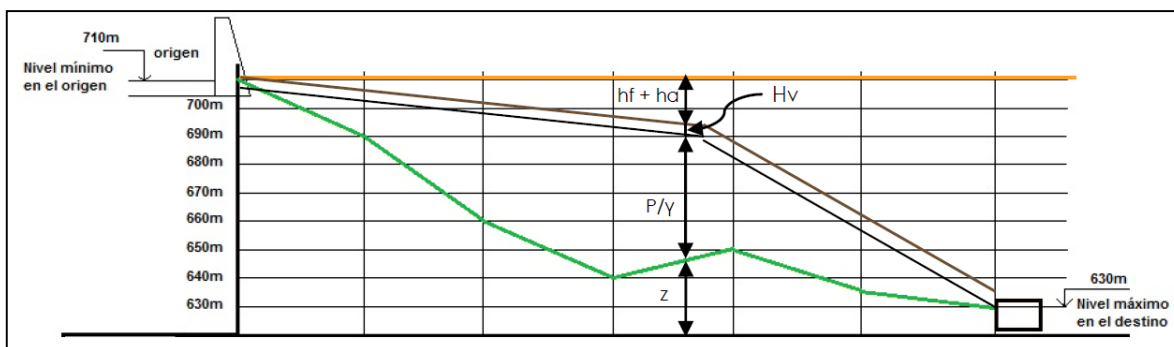


Figura 1 Componentes que integran un trazado altimétrico. FUENTE: Manual de prácticas, Taller de abastecimiento de agua potable y alcantarillado, 2014-2.

2.1.2 Línea de conducción a bombeo

Cuando las condiciones de terreno son desfavorables, o bien la energía disponible no es la suficiente para conducir el caudal requerido, se utiliza un sistema que involucre bombeo. Este se describe a continuación.

Se dice que es la obra electromecánica, hidráulica y civil, que proporciona las condiciones energéticas requeridas para que la conducción transporte de manera adecuada el agua, de un nivel topográfico menor a un nivel mayor.

En un sistema hidráulico urbano el bombeo involucra dos situaciones:

El primero es el envío de agua desde la planta potabilizadora mediante el uso de bombas hacia un almacenamiento, cuyo volumen incluye cierto volumen de regularización y volúmenes adicionales como reserva o para el combate de incendios. En general el exceso de agua proveniente del bombeo se almacena en el tanque elevado en los periodos de bajo consumo, durante los periodos de alto consumo se utiliza el agua almacenada para abastecer la demanda que se tenga.

La segunda situación es el envío de agua desde la planta potabilizadora mediante el uso de bombas sin considerar tanques de almacenamiento, en este caso las bombas introducen el agua

directamente a la red de distribución. Este sistema no es conveniente ya que no hay buen control en el sistema de bombeo y conlleva déficit de agua en periodos de alto consumo.

El diseño de este tipo de conducción es común cuando las condiciones del terreno no son favorables o se tiene que vencer un nivel desde la fuente de abastecimiento y el lugar donde se encuentra el tanque de regularización.

2.1.3 Tuberías

Se entiende por tubería al conjunto integrado por los tubos y su sistema de unión, para formar una línea principal, integrada por una variedad de diámetros y materiales. Es común que se construya de un solo material, sin embargo, en conducciones a gravedad se puede usar más de un diámetro, aprovechando la energía disponible.

En Ciudad Universitaria existen diámetros de 1 a 2 ½ pulgadas para las derivaciones hacia los edificios, en ramales de alimentación se cuenta con diámetros de entre 3 y 6 pulgadas, en las líneas de alimentación primarias existen diámetros de 3 a 8 pulgadas y para las líneas de conducción se tienen de 10 a 12 pulgadas.

Los principales materiales de las tuberías en Ciudad Universitaria son:

- ✓ Acero
- ✓ Fibrocemento
- ✓ Fierro fundido
- ✓ PEAD
- ✓ PVC

Las tuberías que comúnmente se utilizan para la construcción de líneas de conducción son: acero, fierro galvanizado, fierro fundido, fibrocemento, concreto, PVC, polietileno de alta densidad y cobre.

Con base en el diseño hidráulico de la línea de conducción se buscará el diámetro adecuado y el material que cumpla los requerimientos del sistema.

Con el análisis de fenómenos hidráulicos transitorios se obtendrá el espesor adecuado para la línea de conducción.

Los criterios para seleccionar el material adecuado son:

- ✓ Factores hidráulicos (gastos, presiones y velocidades de diseño)
- ✓ Costo
- ✓ Diámetros disponibles
- ✓ Calidad del agua
- ✓ Tipo de suelo

2.1.4 Dispositivos de control

- Válvulas

Los dispositivos de control también llamados “válvulas” permiten el control del flujo en la conducción, atendiendo a situaciones de corte y control de flujo, acumulación de aire, por llenado y vaciado de la conducción, depresiones y sobrepresiones generadas por fenómenos transitorios y retroceso del agua por paro del equipo de bombeo.

Las válvulas más usadas en una línea de conducción son las siguientes:

- ✓ Eliminadora de aire
- ✓ De admisión y expulsión de aire
- ✓ De no retorno
- ✓ De seccionamiento

En el subcapítulo 2.7 se describirán a detalle las válvulas que se requiere instalar en una conducción.

- Piezas especiales

Son aquellos elementos de unión entre los componentes de una conducción de agua, se utilizan para efectuar intersecciones de conductos, variación de diámetros, cambios de dirección, conexiones con válvulas y equipos de bombeo, etc. Este grupo es constituido por juntas, carretes, extremidades, tees, cruces, codos y reducciones, coples, tapones tapas.

2.1.5 Almacenamiento para distribución

Es la parte del sistema que recibe un gasto desde la fuente de abastecimiento para satisfacer las demandas de una población. El agua se almacena con la finalidad de igualar el suministro y la demanda en periodos de consumo variable.

- Tanque de regularización

Permite almacenar un gran volumen de agua cuando la demanda en la población es menor que el gasto de llegada y el agua almacenada se utiliza cuando la demanda es mayor. Generalmente esta regulación se hace por periodos de 24 horas.

Además de la regulación se proporciona un volumen adicional para almacenar agua en el tanque, se dispone entonces de una cantidad como reserva.

El tanque de regularización tienen por objeto cambiar el régimen de aportaciones (de la conducción) que siempre es constante, a un régimen de consumos o demandas (de la red de distribución) que siempre es variable.

La selección del tipo de tanque depende del material disponible en la región, de las condiciones topográficas y de la disponibilidad de terreno.

- Tanques enterrados

Estos tanques se construyen bajo el nivel del suelo. Se emplean preferentemente cuando existe terreno con una cota adecuada para el funcionamiento de la red de distribución y de fácil excavación.

- Tanques semienterrados

Los tanques semienterrados tienen parte de su estructura bajo el nivel del terreno y parte sobre el nivel del terreno. Se emplean generalmente cuando la altura topográfica respecto al punto de alimentación es suficiente y el terreno presenta dificultad de excavación. Permite un fácil acceso a las instalaciones del propio tanque.

-
- Tanques superficiales

Los tanques superficiales están contruidos sobre la superficie del terreno. La construcción de este tipo de tanques es común cuando el terreno es "duro" o conviene no perder altura y se tiene la topografía adecuada.

- Tanques elevados

Los tanques elevados son aquellos cuya base está por encima del nivel del suelo, y se sustenta a partir de una estructura. Generalmente son contruidos en localidades con topografía plana donde no se dispone en su proximidad de elevaciones naturales con altimetría apropiada.

2.1.6 Distribución del agua

El sistema de distribución debe ofrecer un suministro de agua potable en cantidad suficiente y a una presión adecuada para usos domésticos y de protección contra incendios. Los sistemas de distribución suelen tener forma de red, con conexiones transversales a diversos intervalos.

La red de tuberías primarias o arterias principales, forma el esqueleto del sistema de distribución. Una red secundaria transporta agua desde arterias principales a las diferentes áreas para cubrir la demanda de agua.

Una red de distribución (que se denominará en lo sucesivo red) es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques del sistema de distribución hasta la toma domiciliaria. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial e industrial.

Los límites de calidad del agua, para que pueda ser considerada como potable se establecen en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 vigente.

2.2 Transitorios hidráulicos

Un acueducto se diseña y funciona en condiciones de flujo permanente. Sin embargo, durante la operación son inevitables regímenes de transición de un flujo permanente a otro. Dichos regímenes de transición son conocidos como transitorios.

-
- Flujo permanente y flujo no permanente

Se dice que un flujo es estacionario o permanente cuando sus parámetros característicos (presión y velocidad) no varían en el tiempo. Si las condiciones del flujo varían en el tiempo, éste es no estacionario, no permanente o también llamado transitorio.

- Tipos de transitorios hidráulicos

En las tuberías se pueden distinguir tres tipos de transitorios hidráulicos:

1.- Es el transitorio muy lento o cuasi-estático, donde las variables de flujo cambian de manera muy lenta en el tiempo, con periodos de tiempo desde varias horas e inclusive hasta varios días.

Ya que las variaciones en este tipo de transitorios son muy lentas no es necesario considerar en los métodos de inercia del flujo ni las propiedades elásticas del fluido y de las tuberías.

2.- Transitorio lento u oscilación de masa, es aquel que se relaciona con el movimiento de la masa de agua en la conducción, semejante a la oscilación en dos vasos comunicantes, dado que las variaciones en este tipo de transitorio son significativas pero no tanto como para tomar en consideración las propiedades elásticas del fluido y las tuberías.

Como el fenómeno transitorio ocurre normalmente en pocos minutos es suficiente usar un modelo que considere el movimiento y la inercia del volumen de agua que se encuentre en las tuberías.

3.- Transitorio rápido comúnmente llamado golpe de ariete es el choque violento que se produce sobre las paredes de un conducto a presión. Se da por cambios bruscos de la velocidad en la tubería debido a maniobras rápidas. En otras palabras, el golpe de ariete se puede presentar en una tubería que conduzca un líquido a presión cuando se tiene un frenado o una aceleración en el flujo; por ejemplo, el cambio de abertura en una válvula en la línea o el paro repentino de una bomba. Las variaciones de presión en un transitorio de este tipo son importantes, por lo que es necesario considerar los efectos elásticos de la tubería y del líquido.

Los transitorios hidráulicos rápidos pueden llegar a producir presiones muy altas o muy bajas (vacío), por lo cual es necesaria su consideración en el diseño de una conducción.

2.3 Velocidad de propagación de la onda de presión

Cualquier cambio repentino en las condiciones del flujo que se origina en un punto de una tubería a presión se trasmite (propaga) por la tubería con una velocidad que depende de la elasticidad del fluido y de la pared de la tubería. Esta velocidad de propagación de la onda de presión se señala con a y se denomina también celeridad, para distinguirla de la velocidad del flujo v .

Si la tubería fuera completamente indeformable, es decir completamente rígida, la celeridad a sería igual a la velocidad de propagación del sonido en el fluido. La deformabilidad de la tubería disminuye la velocidad de propagación, y es válida la siguiente ecuación:

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{agua}} D}{E_{\text{mat}} \delta}}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

- a_0 Velocidad del sonido en el agua.
- E_{agua} Módulo de elasticidad volumétrica del agua.
- E_{mat} Módulo de elasticidad (módulo de Young) del material del tubo.
- D Diámetro interior del tubo.
- δ Espesor de la pared del tubo.

La velocidad del sonido en el agua a_0 depende de la temperatura; para las temperaturas normales del agua en conducciones tiene valores de 1425 a 1440 m/s. El módulo de elasticidad del agua es igual a $2.074 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ($2.115 \times 10^4 \text{ Pa}$). El valor de E_{mat} se toma de la Tabla 1.

La ecuación 4 es válida para tubos de pared delgada. Para el cálculo de la velocidad de propagación a se considera que un tubo es de pared delgada si su relación D/δ es igual o mayor de 25. Para tubos de pared gruesa, es decir, cuando D/δ es menor de 25 se utiliza la siguiente ecuación:

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{E_{\text{agua}} D}{E_{\text{mat}} \delta} C}} \quad \text{Ecuación 5}$$

El coeficiente c se calcula de la siguiente forma:

$$C = \frac{2\delta}{D}(1 + \mu) + \frac{D(1 - \mu^2)}{D + \delta} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde μ es el coeficiente de Poisson que depende del material del tubo y se da en la Tabla 1.

Tabla 1 Módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson μ para materiales de tuberías.

Material	E_{mat} (N/m ² x 10 ⁹)	E_{mat} (Pa x 10 ⁶)	μ
Acero	200 – 212	2.03 – 2.16	0.30
Fibrocemento	24	0.245	0.30
Concreto pre esforzado	39	0.398	0.15
Hierro dúctil	166	1.69	0.28
Polietileno	1.4 – 2	0.0143 – 0.0204	0.45
PVC	2.4 – 2.75	0.0245 – 0.028	0.45

Usando los valores de E_{mat} y μ (Tabla 1), y las dimensiones D y δ de algunos de los tubos usados en líneas de conducción de agua potable, se desprenden las siguientes dos primeras conclusiones de los valores de esta tabla:

- a) Los cambios en el régimen de flujo a presión en una tubería se trasladan muy rápidamente de un punto a otro, es por esto que los transitorios son bruscos y tienen una duración bastante corta.
- b) En las tuberías de material flexible (PVC y PEAD) los transitorios son menos bruscos que en las tuberías de material rígido (acero, fibrocemento, concreto, hierro dúctil).

Cada material tiene un comportamiento diferente, dependiendo de la magnitud del fenómeno y del tiempo que dura.

2.4 Fórmula de Joukowsky

La fórmula de Joukowsky representa lo siguiente: si en algún punto de la tubería se produce un cambio momentáneo en la velocidad con ΔV , (cambio diferencial de velocidad), esto conduce a una variación en la carga ΔH (diferencial de carga), según la siguiente ecuación.

$$\Delta H = \frac{a}{g} \Delta V \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad) y a es la velocidad de propagación de la onda.

Una vez producida la perturbación, las variaciones de carga y velocidad ΔH y ΔV se transmiten por la tubería con una celeridad a , hasta que encuentren alguna singularidad.

Una disminución de la velocidad en la tubería genera un incremento de la presión (sobrepresión) aguas arriba y una disminución de la presión (depresión) aguas abajo, y viceversa. Esta situación se puede presentar para el cierre de una válvula que se encuentre entre el punto de la fuente de abastecimiento y los tanques de regularización por ejemplo. El cierre generará variaciones de presión, las cuales se propagan en ambos sentidos. En otras palabras, la disminución de la velocidad genera una retención del flujo aguas arriba de la válvula y con esto una sobrepresión, produciéndose aguas abajo una liberación del flujo y una depresión.

La ecuación 7 fue obtenida por el científico ruso Joukowsky, (Nicolái Yegórovich Zhukovski 17 de enero en el Calendario gregoriano de 1847 – 17 de marzo de 1921) por lo que dicha ecuación toma su nombre. La sobrepresión instantánea ΔH que se obtiene de aplicar la fórmula, se denomina pulso de Joukowsky.

Los cambios en la carga hidráulica y velocidad ΔH y ΔV se transmiten por la tubería como una onda de presión con una celeridad a , hasta que encuentren un punto de cambio ya sea de diámetro o de material, una unión con otras tuberías o un extremo de la tubería.

Una disminución de la velocidad del flujo en la tubería genera un incremento de la presión (sobrepresión) aguas arriba y una disminución de la presión (depresión) aguas abajo, y viceversa. Esta situación se ilustra en la Figura 2 para el cierre de una válvula intermedia en una tubería. El cierre reduce la velocidad generando variaciones de presión, las cuales se propagan en ambos sentidos. En otras palabras, la disminución repentina de la velocidad en un punto de la tubería genera una retención del flujo aguas arriba y con esto una sobrepresión repentina, y una liberación del flujo y una depresión repentina aguas abajo.

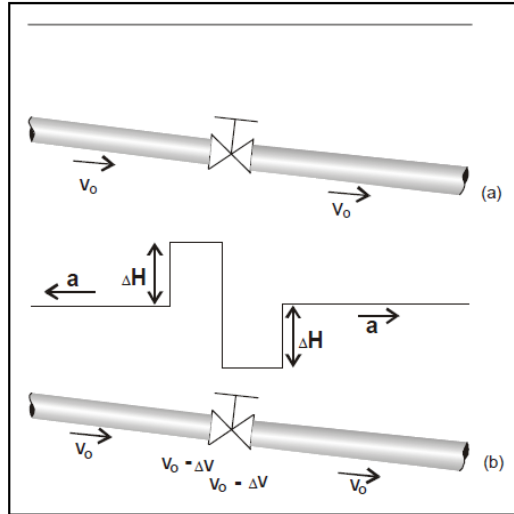


Figura 2 Sobrepresión y presión que genera el cierre de una válvula en un punto intermedio de una tubería. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

2.4.1 Coeficientes de transmisión y reflexión de las ondas de presión

Las ondas de sobrepresión o depresión cambian su magnitud ΔH cuando encuentran un cambio del diámetro de la tubería. Una parte de la sobrepresión o depresión continúa después del cambio de diámetro, y otra parte se regresa (se refleja).

Se define como coeficiente de transmisión s a la relación de la sobrepresión (depresión) que continúa propagándose después del cambio de diámetro, con respecto a la que llega. Si el área de la tubería antes del cambio de diámetro es A_1 y después del cambio A_2 se puede demostrar que el coeficiente s se especifica por la siguiente ecuación:

$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} \quad \text{Ecuación 8}$$

De modo análogo se define el coeficiente de reflexión r que expresa la relación de la sobrepresión reflejada con respecto a la que llega:

$$r = 1 - s \quad \text{Ecuación 9}$$

Para el caso general de una unión de más de dos tuberías se tiene:

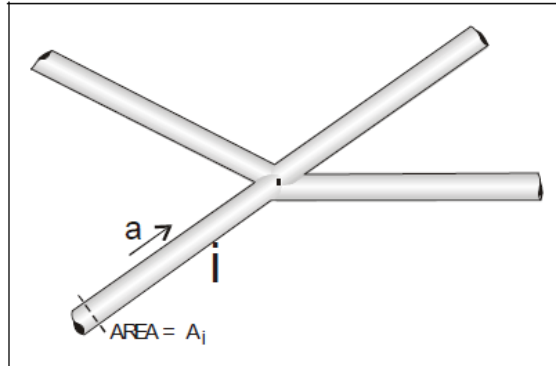


Figura 3 Arribo de una onda de presión a una unión de dos tubos. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

$$s = \frac{2A_i}{\sum A} \quad \text{Ecuación 10}$$

Con i se designa la tubería desde la cual llega la sobrepresión (depresión); el coeficiente r se define sólo para ésta, y el coeficiente s se refiere a cada una de las restantes tuberías.

Para un número de n tuberías de igual diámetro:

$$s = \frac{2}{n} \quad \text{Ecuación 11}$$

Para el caso de una unión de dos tuberías con áreas A_1 y A_2 , y una sobrepresión (depresión) que llega por la tubería 1, la ecuación 10 se escribe como:

$$s = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} \quad \text{Ecuación 12}$$

De acuerdo con esta última ecuación, cuando una sobrepresión (depresión) pasa de una tubería de diámetro menor a otra de diámetro mayor, la mayor parte de ésta se refleja ($s < 1$). Cuando la tubería se une con un tanque, éste puede considerarse como una tubería de diámetro muy grande $A_2 = \infty$, ver Figura 3. Para $A_2 = \infty$ de las ecuaciones 8 y 9 se obtiene:

$$s = 0, r = 1 \quad \text{Ecuación 13}$$

Es decir, las sobrepresiones (depresiones) que llegan a un tanque no se transmiten y se reflejan por completo. Este hecho puede explicarse de la siguiente manera también: en el momento de llegar una sobrepresión al tanque en la tubería se tiene un nivel piezométrico instantáneo más alto que el

nivel de agua en el tanque, y el agua en la tubería se encuentra comprimida más de lo habitual debido a la sobrepresión. La diferencia en los niveles piezométricos genera un flujo de la tubería hacia el tanque, que va descomprimiendo el agua y tiende a establecer en la tubería un nivel piezométrico igual al nivel de agua existente en el tanque. La presión en la tubería va bajando desde el tanque, y eso representa exactamente una onda de depresión reflejada.

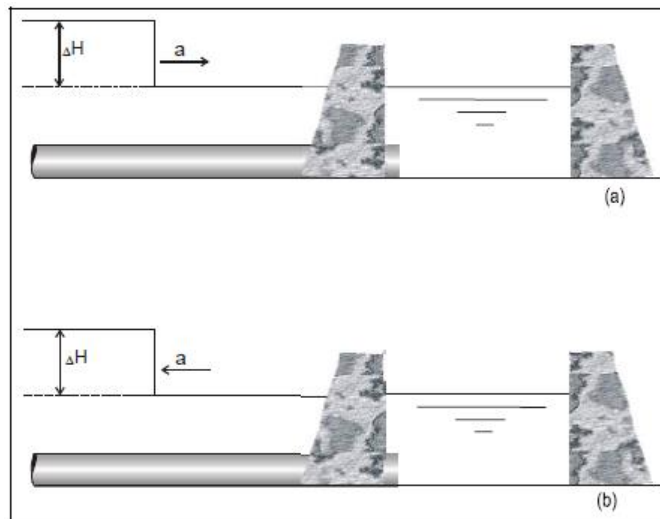


Figura 4 Reflejo de una onda de sobrepresión de un tanque. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

Inversamente, cuando una sobrepresión pasa de una tubería de diámetro mayor a otra de diámetro menor la sobrepresión incrementa su valor. El caso límite responde a un extremo cerrado, el cual puede considerarse como transición de cierto diámetro dado a otro diámetro igual a cero.

Por las ecuaciones 8 y 9 se obtiene:

$$s = 2, r = -1 \quad \text{Ecuación 14}$$

Es decir, en caso de encontrarse con un extremo cerrado la sobrepresión (depresión) duplica su valor, ver Figura 4. Este hecho puede explicarse de la siguiente manera: la onda de sobrepresión se genera por una disminución de la velocidad del flujo, que va propagándose por la tubería. Utilizando el principio de superposición, la velocidad resultante en la tubería puede considerarse como una superposición de dos velocidades: la del flujo original antes de la sobrepresión y otra de un flujo ficticio en sentido contrario con velocidad igual a la disminución de velocidad que genera la sobrepresión. Según la fórmula de Joukowsky, en el instante en que llega la sobrepresión a un extremo cerrado, el flujo ficticio en sentido contrario se detiene instantáneamente produciéndose

una nueva sobrepresión, que se suma con la sobrepresión original, duplicándose de esta manera la sobrepresión de llegada.

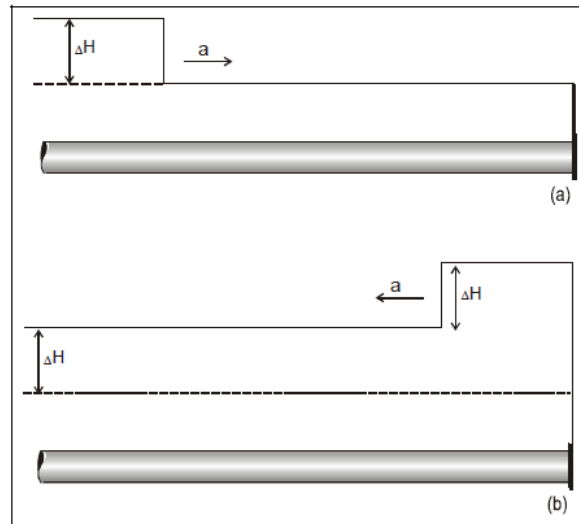


Figura 5 Reflejo de una onda de sobrepresión de un extremo cerrado. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

2.5 Efectos físicos provocados por fenómenos transitorios

2.5.1 Sobrepresión y depresión

Se les llama así a las cargas de presión en exceso y por abajo de la presión a flujo estacionario respectivamente, que existen después de presentarse los fenómenos transitorios.

Algunos de los efectos que pueden ocurrir ante un fenómeno transitorio son los que a continuación se presentan.

- Sobrepresiones

Las altas presiones que se producen cuando ocurre un golpe de ariete pueden superar la resistencia de los accesorios que se colocan en la conducción o de la propia tubería, hasta provocar el rompimiento o avería de los mismos.

- Depresiones (vacíos y separación de la columna líquida)

En una depresión se presenta un vacío (presión menor que la atmosférica), dentro de la tubería se generará una presión inferior a la que actúa fuera de esta, también existe el caso en que la tubería se encuentra enterrada, además de la presión atmosférica también actúa el empuje del terreno, si

la tubería no es suficientemente rígida en su sección transversal, la diferencia de presiones puede hacer que la sección pierda su estabilidad y colapse.

- Fatiga del material

Cuando un fenómeno de cargas dinámicas ocurre en un periodo de tiempo prolongado disminuye la resistencia del material del que está constituida la tubería y sus accesorios, es decir que el material puede fallar por fatiga, esto es una serie repetitiva del mismo evento.

- Sobre velocidad de las máquinas

Las piezas que se encuentran en rotación de las bombas y de los motores eléctricos acoplados están sometidas a fuerzas centrífugas, estas fuerzas son proporcionales al cuadrado de la velocidad de rotación y tienden a desprender las piezas en dirección radial.

Esto se da principalmente cuando no se tienen dispositivos para el control de un fenómeno transitorio.

2.6 Recomendaciones para la protección de la conducción

A continuación se describen algunas alternativas útiles para mitigar los efectos físicos provocados por fenómenos transitorios en las tuberías.

1.- El aumento en la sección transversal de la tubería, cambiando el diámetro a uno superior es una solución, pero como tal es costoso y generalmente se busca otra solución. Sin embargo, representa una solución que no siempre se descarta, sobre todo en tramos de pequeña longitud y pequeño diámetro, que son la causa de un aumento considerable de la presión cuando sucede un golpe de ariete.

3.- Aumento del tiempo de duración del proceso transitorio. En caso de un golpe de ariete causado por el cierre de válvulas, este aumento se efectúa mediante un retraso durante el cierre. El proceso de paro en los equipos de bombeo puede retardarse adicionándole volantes especiales que aumenten su inercia.

4.- Limitación de la longitud de la tubería en la que se desarrolla el golpe de ariete. Para una conducción que va a gravedad se puede lograr haciendo una división de la tubería separando mediante tanques o cajas rompedoras de presión. Para una conducción por bombeo, se lograría

realizando bombeo en varias etapas. En los dos casos los transitorios se desarrollan en cada etapa de manera independiente y son menos severos. Hay que tomar en cuenta que la operación en varias etapas es complicada.

5.- Reducción de la variación del gasto ΔQ en la tubería. En los períodos de depresión se suministran gastos complementarios desde afuera para reducir las depresiones. En los períodos de sobrepresión parte del gasto se expulsa al exterior o a un recipiente.

2.7 Dispositivos para el control de transitorios

- Válvula aliviadora de presión

Este dispositivo se coloca en las tuberías para disminuir las sobrepresiones causadas por un transitorio. Es un dispositivo que cuenta con un resorte calibrado que permite la apertura de una compuerta cuando la presión tiene un valor superior al establecido.

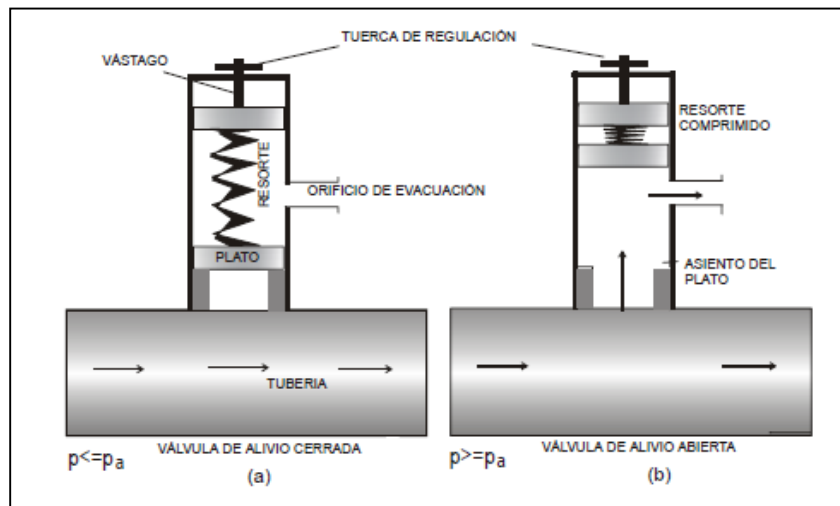


Figura 6 Funcionamiento de una válvula de alivio de resorte. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

Se recomienda usar este tipo de elemento en conducciones con diámetros pequeños, tomando en cuenta que las presiones negativas se tendrán que solucionar con algún otro dispositivo.

- Válvula anticipadora del golpe de ariete

Este dispositivo protege al equipo de bombeo de la onda de presión de celeridad que es causada por el paro de la bomba o una falla en el suministro de energía eléctrica. Este tipo de válvula opera con la presión de la línea de conducción, el nombre de anticipadora es porque entra en

funcionamiento antes de la llegada de la onda de presión. La válvula realiza la apertura cuando baja la presión hasta un valor preestablecido y evacua a la atmósfera el exceso de presión que existe en la conducción.

- Válvulas de no retorno también llamada “check”

Las válvulas check o válvulas de retención son utilizadas para no dejar regresar un fluido dentro de una línea, sirve para hacer posible el flujo en un solo sentido. Esto implica que cuando una bomba se apaga por algún motivo, la válvula check se cierra instantáneamente y no deja que el flujo regrese.

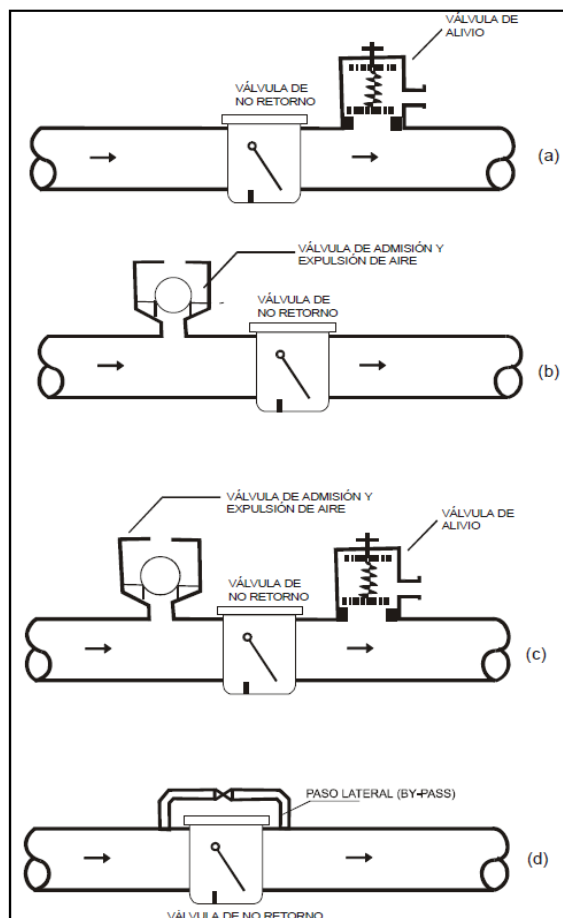


Figura 7 Diferentes combinaciones de una válvula de no retorno intermedia con otros medios de control. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

Para el caso a) se instala una válvula de alivio de sobrepresión para liberar presión en cuanto se apaga el equipo de bombeo y se cierra la válvula check.

Para el caso b) se instala una válvula de admisión y expulsión de aire, esto para permitir la entrada de aire cuando el equipo de bombeo se para.

Para el caso c) se instalan la válvula de admisión y expulsión de aire antes de la check y la válvula de alivio de sobrepresión después de la check, para cuando se presente el paro de la bomba.

Para el caso d) se instala un by-pass, este permite que el flujo de agua tome un camino diferente y pueda seguir fluyendo el agua en la tubería.

Su cierre puede generar sobrepresiones importantes en los transitorios.

En ciertas condiciones topográficas las válvulas de no retorno pueden colocarse en puntos intermedios de la tubería (aparte de las válvulas de no retorno que se tiene en las bombas), con el objetivo de detener el flujo inverso en el transitorio que se produce con el paro de las bombas y de esta forma reducir las sobrepresiones en el inicio de la conducción.

- Válvulas de admisión y expulsión de aire

Cuando la presión en la conducción tiende a situarse por debajo de la presión atmosférica, permiten la entrada de aire atmosférico a la conducción en el punto de la tubería en que se encuentran instaladas. Posteriormente, y si la presión aumenta hasta superar la presión exterior, el aire es expulsado, de manera que las columnas de líquido separadas por la interfase gas, vuelven a juntarse de nuevo.

De este modo la válvula de admisión y expulsión de aire ejecuta las siguientes funciones:

- ✓ Asegura el escape del aire durante el llenado de la tubería
- ✓ Asegura la entrada de aire al vaciar la tubería
- ✓ Evita el vacío (presiones negativas) en los transitorios
- ✓ Admisión y retención de aire

Se realiza por dispositivos especiales que admiten la entrada de aire cuando tiende a producirse un vacío en la tubería, pero no permiten que el aire escape cuando la presión sube. El aire atrapado actúa como un amortiguador y puede reducir en grado considerable las sobrepresiones del transitorio; mientras mayor sea el volumen de aire atrapado, tanto mayor será el efecto antiarriete. En cierto sentido puede considerarse que el funcionamiento en el período de sobrepresión es equivalente al funcionamiento de una cámara de aire en el mismo punto de la conducción.

En una conducción, la admisión y retención de aire tiene lugar solamente como medio de control de transitorios.

- Torre de oscilación

La torre de oscilación es un depósito de forma usualmente circular que se encuentra en contacto con la atmosfera por la parte superior, cuyo diámetro por lo general es relativamente grande con relación al diámetro de la conducción.

Este dispositivo cumple con la función de aliviar las sobrepresiones causadas por un fenómeno transitorio. Para evitar los derrames de agua cuando la conducción está en funcionamiento, la elevación de la corona de la torre debe ser mayor al nivel de agua del punto de descarga y para evitar los derrames cuando el gasto de la conducción es igual a cero, el nivel de la corona debe ser mayor a los niveles del agua de cualquier depósito conectado a la conducción.

La torre de oscilación es una de las estructuras más confiables para el control de transitorios en la conducción, sin riesgo de funcionamiento ya que no contiene dispositivos de control mecánico.

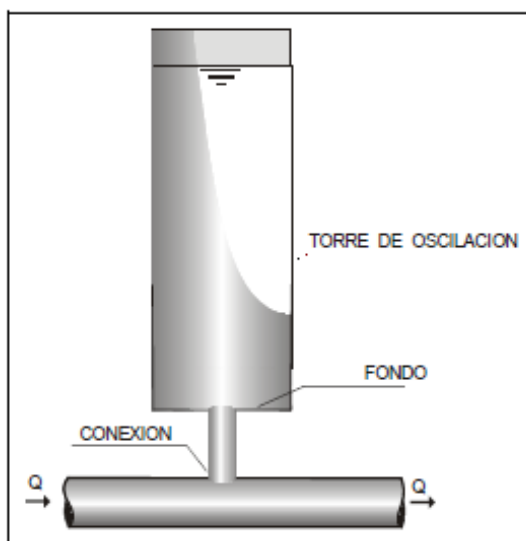


Figura 8 Torre de oscilación. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

- Tanque unidireccional

El tanque unidireccional es un dispositivo que va colocado generalmente a una elevación superior a la del terreno natural y este por lo general va en contacto con la atmósfera en la parte superior. La elevación de la corona es menor a la de la carga piezométrica del punto de conexión del tanque.

La función del tanque unidireccional es aliviar en primera estancia las depresiones causadas por un fenómeno transitorio provocado por un paro repentino de bombas.

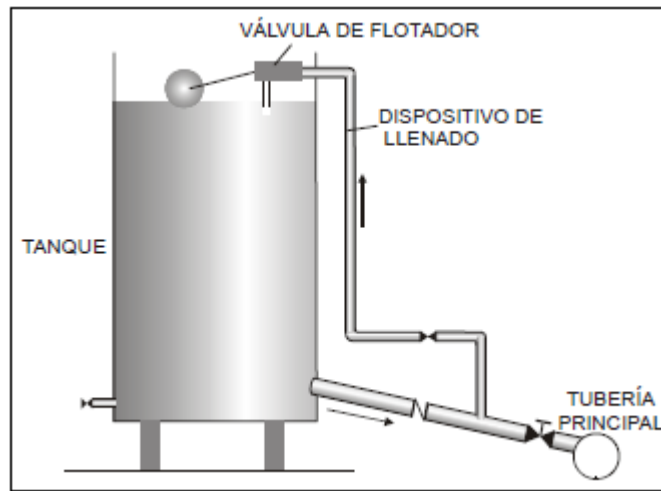


Figura 9 Tanque unidireccional con dispositivo de llenado. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

- Tanque bidireccional

El tanque bidireccional (llamado también tanque unidireccional cerrado) tiene la misma finalidad que el tanque unidireccional. Consiste de un depósito cerrado conectado a la tubería, en cuya parte superior se colocan válvulas de admisión rápida y expulsión lenta de aire.

Su esquema de funcionamiento viene dado en la Figura 10 y 11, En presencia de presiones en la tubería mayores a las de operación el tanque permanece lleno y las válvulas se mantienen cerradas, al descender la presión por debajo de la de operación el agua fluye del tanque a la tubería e ingresa aire a través de la válvulas.

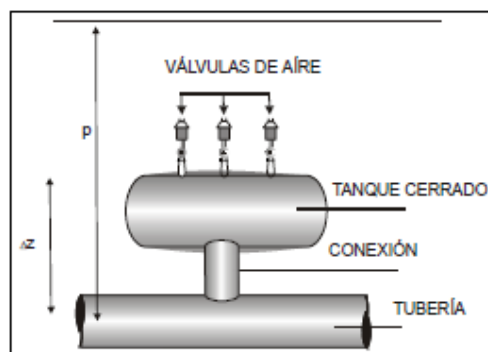


Figura 10 Esquema de funcionamiento de tanque unidireccional cerrado. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

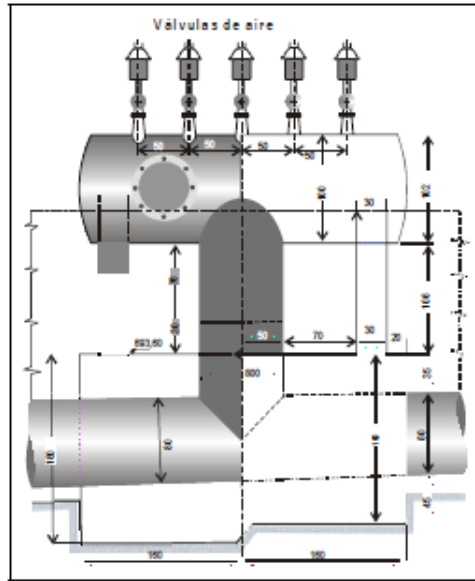


Figura 11 Tanque bidireccional. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

- Cámara de aire

Una cámara de aire es un dispositivo metálico cerrado, en su interior una parte contiene un volumen de agua y el resto un volumen de aire con el cual se proporciona la presión a la conducción de forma adecuada. Se colocan al nivel del terreno natural.

La función de la cámara de aire es aliviar las sobrepresiones y depresiones causadas por un fenómeno transitorio, se recomienda usar cuando se tiene un flujo establecido, las cargas piezométricas son muy grandes, evitando colocar una torre de oscilación demasiado alta o un tanque unidireccional muy elevado.

La cámara de aire contiene dos conductos, uno de llenado y otro de vaciado, el primer conducto contiene un dispositivo disipador de energía el cual puede ser un orificio cuya función es incrementar la presión cuando la cámara se está llenando, el segundo conducto contiene una válvula de no retorno para permitir la circulación del flujo únicamente del tanque hacia la conducción.

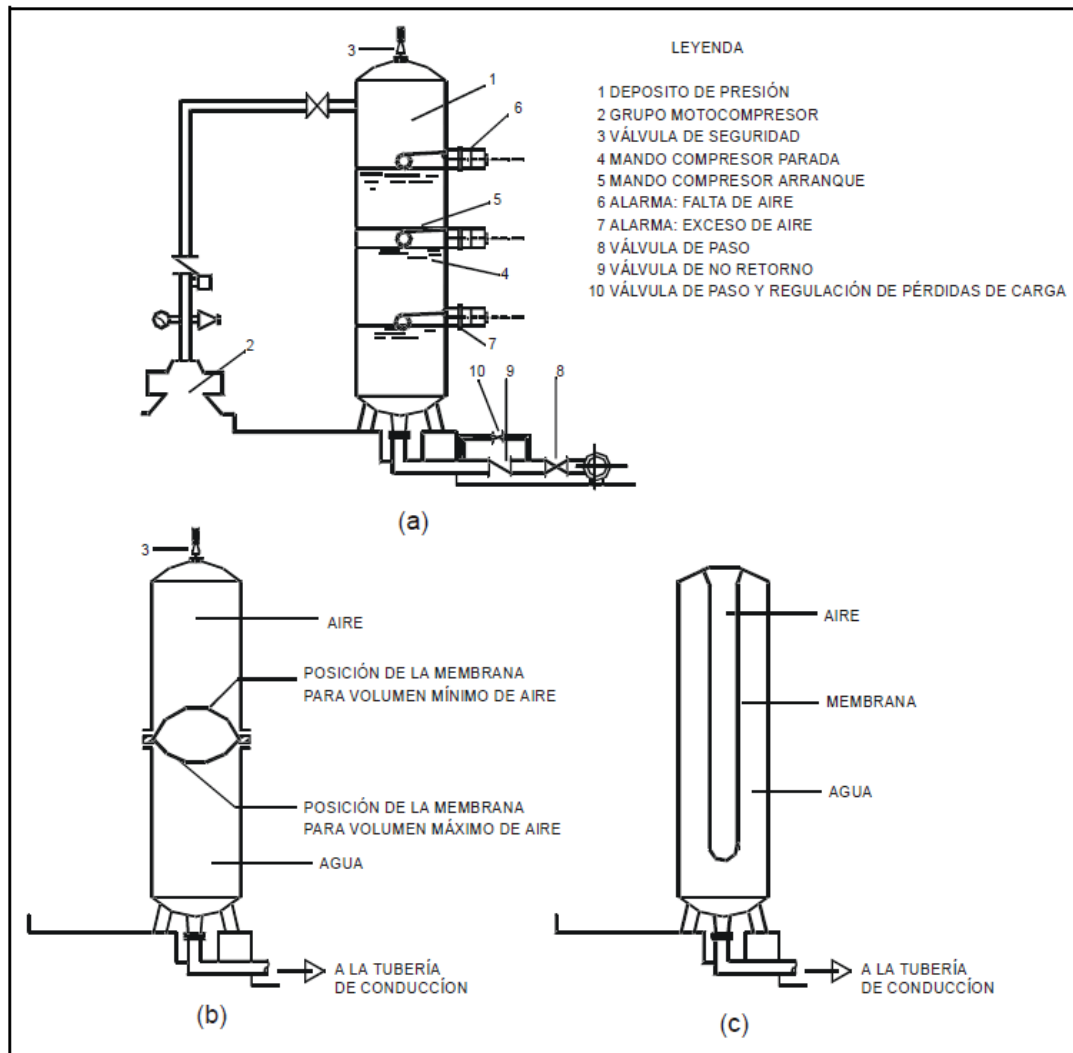


Figura 12 Formas de mantener el aire en cámaras de aire:
a) Con un compresor; b) y c) Con una membrana. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

- Membranas protectoras o fusibles hidráulicos

Consisten en discos finos de metal u otro material, que se destruyen en presencia de una determinada presión. Se sitúan en desviaciones de la tubería en sostenedores especiales después de una válvula de paso abierta constantemente.

Ante un peligro de sobrepresiones inadmisibles la membrana se rompe, parte del líquido se expulsa y la presión se reduce. Posteriormente la válvula se cierra hasta cambiar la membrana por una nueva.

Teniendo en cuenta su bajo costo y la posibilidad de fallas en el funcionamiento de los dispositivos antiarriete, se recomienda su uso aparte de los medios antiarriete normales como una protección adicional. Las membranas se colocan cerca de la planta de bombeo o en otros lugares que se quieran proteger especialmente. Se debe de asegurar la evacuación del agua descargada.

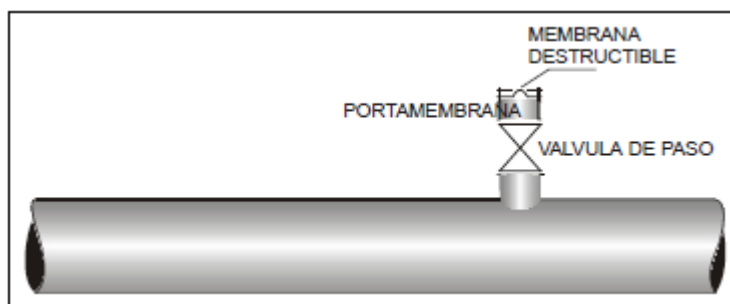


Figura 13 Membrana destructible. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

- By-pass o paso lateral
- ✓ Instalación de un paso lateral (by-pass) en la planta de bombeo

El paso lateral puede ser de utilidad en las plantas en que el grupo motor-bomba dispone de cierto nivel de presión en la succión. Al producirse el fallo de las bombas, la presión comienza a descender aguas abajo de la válvula de no retorno colocada a la salida de las bombas. Si la presión llega a caer por debajo del nivel de agua en el depósito del cual se alimentan las bombas, entonces a través del by-pass se produce un flujo desde el depósito de succión hacia la conducción principal sin pasar por las bombas. Este aporte de caudal realiza una función de control similar a la que haría un tanque unidireccional instalado en dicho punto. En definitiva, se consigue evitar que las depresiones en el tramo inicial aguas abajo de la planta lleguen a ser de importancia. Por otra parte, es importante la presencia de una válvula de no retorno en el by-pass, que impide la descarga de la bomba hacia el propio depósito, evitando pues que la máquina funcione en circuito cerrado.

- ✓ Instalación de un by-pass en la válvula de no retorno

Para tener una rotación inversa controlada en la bomba y evitar sobrepresiones que lleguen a causar problemas a la tubería, se puede colocar aguas abajo del equipo de bombeo una válvula de no retorno y un by-pass alrededor de la válvula, cuando la capacidad de conducción no permita una velocidad admisible en sentido inverso para que asegure la reducción necesaria de las sobrepresiones que acurran por un paro accidental de un equipo de bombeo.

-
- Instalación de un by-pass en la planta de bombeo

Se recomienda usar un by-pass en la planta de bombeo cuando la fuente de abastecimiento dispone de un buen nivel en la fuente de abastecimiento, es el caso de un depósito a superficie o bien de un tanque elevado, este tipo de by-pass sirve para contrarrestar las presiones negativas por un paro accidental en el equipo de bombeo.

2.8 Condiciones en las cuales se puede presentar un fenómeno hidráulico transitorio

- Transitorio hidráulico en el arranque de una bomba

Con base en la información recopilada y el análisis de la misma, el operador tiene que estar atento en el arranque de un equipo de bombeo ya que si no se tienen las consideraciones necesarias puede generar un fenómeno transitorio que llegue a dañar la línea de conducción.

El arranque de bomba es una maniobra programada que ha sido diseñada para realizarse de manera paulatina, así que jamás se producirá de manera brusca y/o accidental. Para sistemas de bombeo que sean muy grandes y cuenten con bombas en paralelo el arranque se realiza bomba por bomba, de forma escalonada.

Para sistemas de bombeo pequeños, por lo regular se utilizan conducciones comerciales que tienen resistencias al transitorio hidráulico relativamente altas y la mayoría de las veces no resulta necesario optimizarlas. En cambio en los sistemas de gran tamaño el costo de las tuberías capaces de soportar cualquier transitorio hidráulico puede ser significativo, por este motivo la resistencia de la tubería debe ser optimizada.

El arranque de una bomba produce incrementos graduales de velocidad de manera que si bien se generan ondas de presión transitoria positiva, su magnitud (ΔH) es normalmente pequeña. Esta onda positiva viajará en dirección del almacenamiento, ubicado en el extremo final de la conducción.

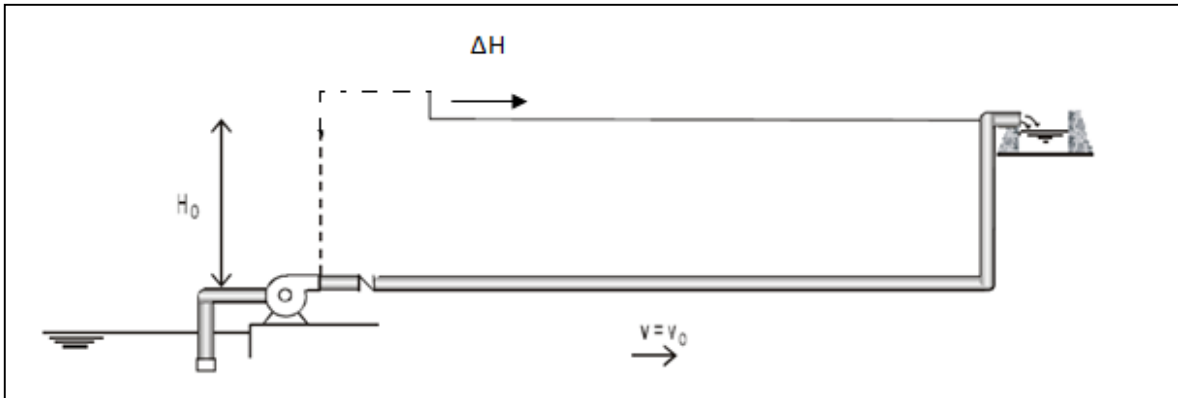


Figura 14 Onda de presión positiva generada por el arranque de una bomba. Cafaggi Félix, Amalia Adriana. (2011). Sistemas de bombeo.

Al incidir la onda de sobrepresión en el almacenamiento de carga constante, ésta será reflejada como onda negativa, restituyendo las condiciones de carga que impone el tanque (H_0). Así se producirán una secuencia de estados de incremento ($H_0 + \Delta H$) y decremento ($H_0 - \Delta H$) de la presión en la conducción, hasta que por efecto de la fricción se establecen las condiciones de flujo permanente impuestas por el bombeo.

- Transitorio hidráulico durante el paro programado de una bomba

Existen diferentes motivos por los cuales se puede llegar a parar una bomba, ya sea porque los tanques han llegado a los niveles máximos de almacenamiento o porque la obra de captación tiene que recuperar los niveles en los cuales puede operar la bomba sin problemas.

El paro programado de una bomba es una maniobra voluntaria que al igual que el arranque, no representa condiciones que pongan en riesgo al sistema de bombeo.

En los sistemas de bombeo que cuentan con válvulas de retención en la descarga, el paro programado consiste simplemente en apagar el equipo, por lo que el cierre de la válvula se produce necesariamente al disminuir la presión en la descarga de la bomba.

Algunos sistemas cuentan con válvulas de seccionamiento (tipo compuerta o tipo de mariposa) que se instalan aguas abajo de la válvula de retención para las maniobras de mantenimiento. En ocasiones los operadores realizan el cierre gradual de estas válvulas de seccionamiento antes de efectuar el paro de la bomba, maniobra que se asemeja a la de un sistema con válvula de control. Otros sistemas tienen válvulas de retención de cierre controlado o también válvulas de retención

amortiguadas, es decir, válvulas provistas de un dispositivo amortiguador (pistón) que permite que su cierre se realice de manera gradual. Vale la pena destacar que si el sistema cuenta varias bombas en paralelo, las maniobras de paro programado se realizan de forma escalonada.

En cualquier caso al producirse un paro programado de un equipo de bombeo, se genera ahora una onda de presión negativa, que viaja hacia el almacenamiento ubicado en el extremo final de la conducción.

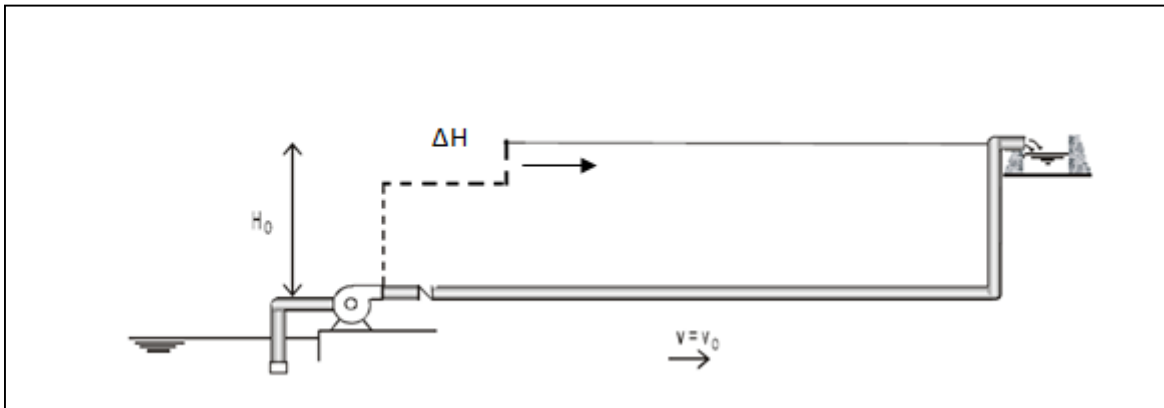


Figura 15 Onda de presión negativa por el paro programado de una bomba. Cafaggi Félix, Amalia Adriana. (2011). Sistemas de bombeo.

Cuando la onda negativa llega al almacenamiento de carga constante, esta será reflejada como onda de sobrepresión (positiva), restituyendo la carga que impone el tanque. Al igual que en el arranque, se producirá una secuencia de estados de decremento e incremento de la presión en la conducción hasta que la fricción se encarga de amortiguar el transitorio, dando paso a las condiciones de reposo, denominadas también condiciones de gasto nulo.

- Transitorio hidráulico debido al paro accidental del bombeo

Sin lugar a duda, la condición más desfavorable relativa a los transitorios hidráulicos en un sistema es el paro accidental o “disparo” de los equipos de bombeo. Evidentemente esta situación es particularmente crítica cuando se trata de la interrupción o corte accidental o de emergencia del suministro de energía eléctrica a una estación de bombeo ya que se encuentran operando, es decir para las condiciones de gasto máximo en la conducción.

Al igual que en el paro programado, el disparo de bombas genera una onda negativa que se propaga a lo largo de la tubería. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, toda vez que haya la interrupción

del flujo inesperado, puede ser brusca y llegar a producirse para el gasto total, por lo tanto, la magnitud extrema de la onda negativa sería determinada por la ecuación de Joukowsky.

- Transitorio generado al maniobrar una válvula

La generación de la onda de presión no es espontánea, sino que es generada por ciertos elementos inherentes al sistema (válvulas), existen otros dispositivos en el sistema que la absorben (dispositivos de alivio), otros que la reflejan (almacenamientos). La propagación se ve afectada por todas las condiciones en el entorno de la conducción, como son los cambios de sección, de material, de espesor, por el comportamiento de la bomba etc. Se usarán las ecuaciones diferenciales del golpe de ariete y la teoría de Allievi, estas ecuaciones permiten llevar a cabo un desarrollo en cadena mediante el cual se puede obtener la carga de presión en la sección adyacente del órgano de control para el instante i , si se conoce su valor en el instante $i - 1$ y la variación de velocidad entre dichos instantes, misma que estará determinada por la ley de cierre o apertura en el órgano de control (válvula).

El tiempo que tarda la onda de presión en salir del órgano de control, que sea reflejada desde el almacenamiento y regrese al órgano de control, es decir su periodo:

$$T = \frac{2L}{a} \quad \text{Ecuación 15}$$

Y su relación con el tiempo de cierre t_c o de apertura t_a de la válvula, está estrechamente ligado con la magnitud de variación de presión.

Se definen así:

- ✓ Cierre rápido o maniobra brusca, $t_c \leq T$
- ✓ Cierre lento, $t_c > T$
- ✓ Apertura rápida o maniobra brusca $t_a \leq T$
- ✓ Apertura lenta $t_a > T$

La constante de Allievi se calcula con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{aV_0}{2gH_0} \quad \text{Ecuación 16}$$

Capítulo III Descripción del sistema de agua potable de Ciudad Universitaria

3.1 Sistema de agua potable de Ciudad Universitaria

El suministro de agua potable en Ciudad Universitaria es responsabilidad de la Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC) a través del Taller de Agua Potable de la Coordinación de Conservación.

El funcionamiento adecuado de los sistemas de abastecimiento de agua potable es esencial para el bienestar de los núcleos sociales. Estos sistemas captan y conducen el agua desde las fuentes de abastecimiento para su posterior distribución sobre una zona ocupada por un conjunto de personas que requieren del servicio.

Un sistema de distribución de agua se compone de instalaciones para la captación, almacenamiento, conducción, bombeo, tratamiento y distribución. Las obras de captación y almacenamiento permiten reunir agua aprovechable de ríos, manantiales, agua subterránea, etc. La conducción trata de la construcción de canales y acueductos, así como de instalaciones complementarias de bombeo para transportar el agua desde la fuente hasta el centro de distribución. El tratamiento es la serie de procesos que le dan al agua la calidad requerida y finalmente, la distribución es dotar de agua al usuario para su consumo.

“Todo sistema de agua potable debe dotar de agua todo el tiempo, en cantidad suficiente y a una presión adecuada.” (MAPAS. CONAGUA. 2007).

3.2 Suministro de agua

El sistema de abastecimiento agua potable de Ciudad Universitaria está operado por la DGOyC, cabe destacar que no todo el caudal que se extrae de los pozos se aprovecha ya que un porcentaje se pierde en fugas.

El Campus Principal de la UNAM se abastece mediante tres pozos: ubicados en la Facultad de Química (pozo I), Multifamiliar (pozo II) y Vivero Alto (pozo III), los cuales son de uso exclusivo de Ciudad Universitaria. De los tres pozos se extrae un promedio de 100 L/s y un máximo de 170 L/s,

siendo los pozos Multifamiliar y Vivero Alto los que aportan 85% del agua extraída. Las características técnicas de los pozos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Características generales de los pozos en Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM.

Pozo	Gasto (L/s)	Profundidad (m)	Potencia Bomba (HP)
Química	31	132	125
Vivero Alto	45	170	125
Multifamiliar	91	193	250

En cada pozo se encuentra instalado un medidor de propela², (con número de inventario de la CONAGUA), a esta entidad se debe reportar mensualmente la extracción total por cada pozo; para lo cual se lleva un registro diario que consta de la toma de lectura en el medidor cada hora durante el tiempo que operan las bombas.



a) Pozo Química



b) Pozo Multifamiliar



c) Pozo Vivero Alto

Figura 16 Bomba de cada pozo de extracción en Ciudad Universitaria.

² Es un medidor de flujo y totalizador volumétrico.

3.2.1 Extracción y operación de los pozos

Existen tres turnos de operación de los pozos. Durante la recopilación de información se observó que cada turno tiene sus propias políticas de operación, que aunque no son excesivamente diferentes una de otra, no corresponden a una política común obtenida a través de la medición y análisis de la demanda de agua en el campus, sino que se mantienen en función de la experiencia y costumbre de cada operador.

En promedio se extraen 2, 783,185.44 m³ al año de los tres pozos con que cuenta el campus universitario, de ellos, el 85% se extrae de los Pozos Multifamiliar y Vivero Alto (pozo II y III), mientras que el 15% del agua extraída corresponde al Pozo de Química (pozo I).

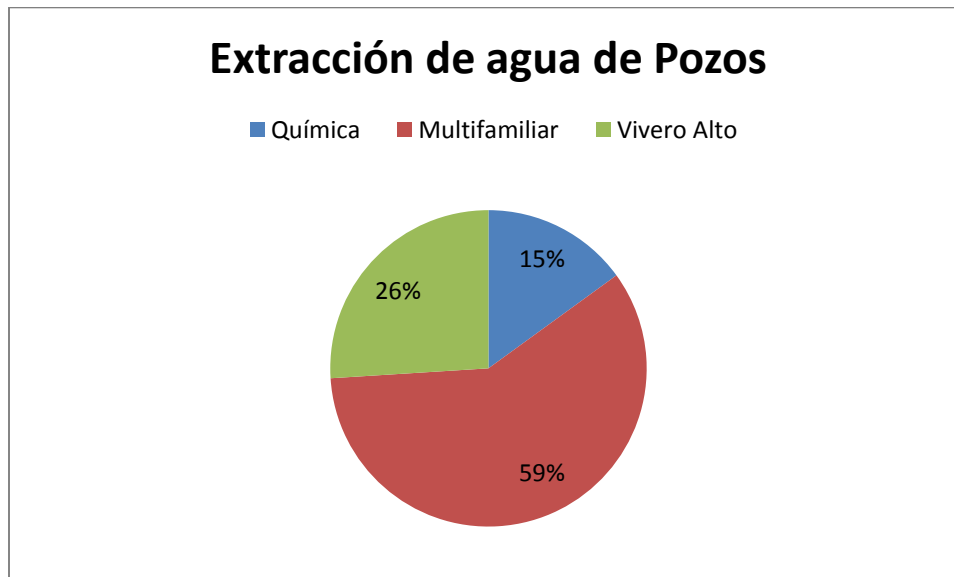


Figura 17 Porcentaje de extracción de agua de pozos. FUENTE: DGOyC. UNAM.

En un acuífero libre, como es el acuífero sobre el que se encuentra Ciudad Universitaria, la extracción de agua produce un abatimiento gradual, radial y creciente hacia la extracción llamado "cono de abatimiento" ver Figura 18. Una diferencia considerable entre los niveles estático y dinámico puede conducir a problemas en el funcionamiento del pozo, lo anterior obedece, por un lado, al aumento de la demanda ocasionada por el crecimiento de la población y por otra parte, por la disminución en el uso de los escurrimientos superficiales. La explotación intensiva de acuíferos provoca el abatimiento del nivel estático que se manifiesta algunas veces como un aumento de la salinidad.

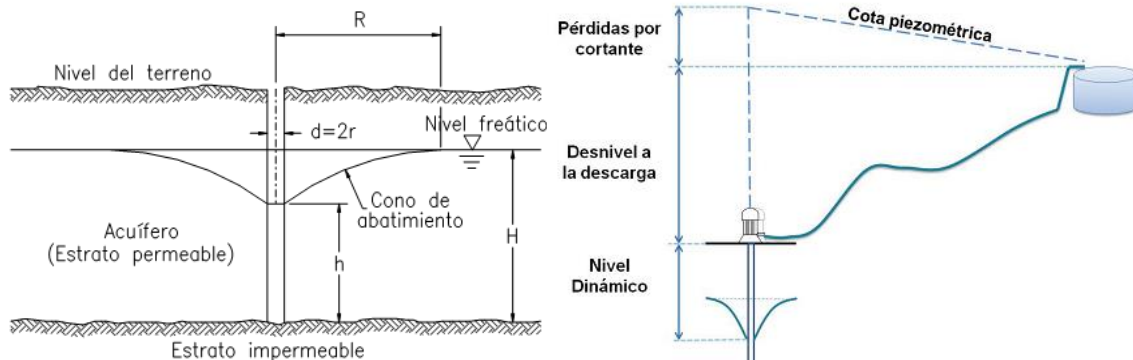


Figura 18 Cono de abatimiento en un pozo ordinario o libre. FUENTE: MAPAS 2007. CONAGUA.

La sobreexplotación regional de un acuífero implica descensos paulatinos del nivel freático. El impacto se manifiesta como una disminución del caudal explotable hasta llegar a la situación extrema en la que el pozo queda completamente seco. La única solución a este problema consiste en regular la explotación regional hasta permitir la recuperación parcial o total de los niveles. Otra solución consiste en profundizar el pozo, con lo que se prolonga su vida útil.

Un hecho que sugiere la sobreexplotación del acuífero ha sido la disminución del caudal extraído del pozo III, al pasar de 150 L/s al entrar en operación en la década de los ochenta, a 45 L/s extraídos actualmente, además, la profundidad de extracción también se ha incrementado de 90 a 170 m. Entre las consecuencias, según se ha mencionado, se encuentra el aumento de la salinidad del agua extraída, misma que provoca incrustación en tuberías.

El pozo III abastece la zona cultural del campus, en cuyas tuberías se ha observado dicha incrustación, hecho que puede explicarse con la disminución del caudal extraído del pozo.

En promedio, la extracción actual estimada de los pozos es de 100 L/s; el sistema de pozos opera generalmente de la siguiente manera:

- A) El suministro en la Zona Cultural se obtiene directamente del pozo Vivero Alto, el agua restante se bombea al Tanque Vivero Alto, a lo largo de la tubería que une estos dos componentes, se tienen algunas derivaciones directas hacia la red.
- B) La parte central o casco viejo se abastece del Tanque Bajo, el cual a su vez recibe el agua del pozo multifamiliar.

C) Algunos días del mes se utiliza el pozo de Química (para evitar su inactividad y posible contaminación), se envía agua al Tanque Bajo, ahí se encuentra un sistema de rebombeo el cual manda el agua hacia el Tanque Alto, de donde se abastece la zona del estadio, la Dirección de Obras, Actividades Recreativas, etc.

Existe además una línea de conducción entre el Tanque de Vivero Alto y el Tanque Alto, que es utilizada para suministrar agua al Tanque Alto en situaciones en que los niveles de éste último se abaten de manera muy rápida y el pozo queda fuera de operación.

El paro y arranque de los pozos se hace de manera manual y está en función de los niveles mínimos que se manejan en los tanques de almacenamiento, lo cual es a criterio del operador en turno, lo anterior implica que algunas veces existe una disminución constante en el nivel de los tanques.

3.2.1.1 Localización de los pozos

En la Figura 19 se presenta el plano de Ciudad Universitaria y la localización de los pozos, de los cuales es extraído el caudal para dotar a las entidades de la comunidad universitaria.

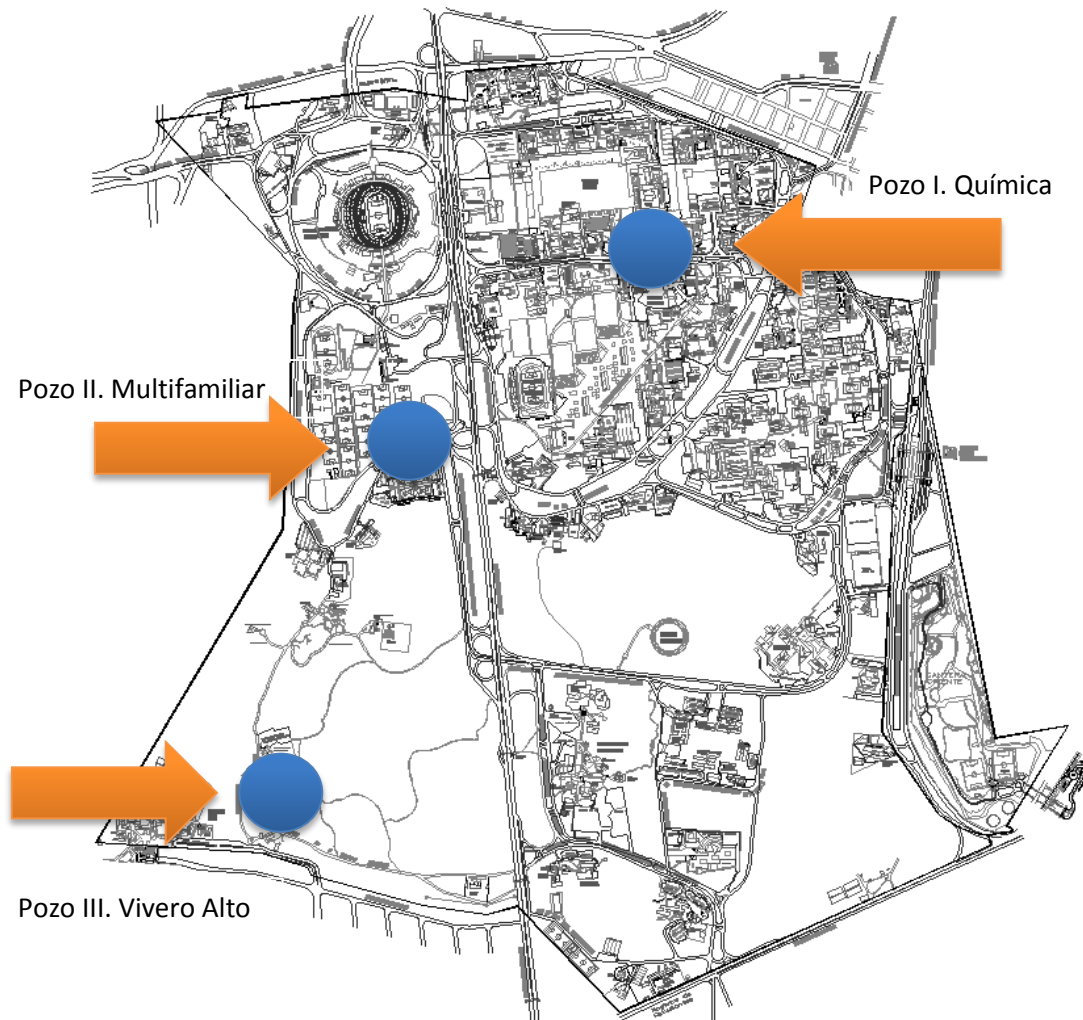


Figura 19 Ubicación de pozos en Ciudad Universitaria. FUENTE. DGOyC. UNAM.

3.2.2 Regularización

El tanque de regularización tiene por objeto cambiar el régimen de suministro (captación-conducción), que normalmente es constante, a un régimen de demandas (de la red de distribución), que siempre es variable. El tanque de regulación es la estructura destinada para cumplir esta función, y debe proporcionar un servicio eficiente, bajo normas estrictas de higiene y seguridad, procurando que su costo de inversión y mantenimiento sea mínimo.

Adicionalmente a la capacidad de regulación, se puede contar con un volumen extra y considerarlo para alimentar a la red de distribución en condiciones de emergencia (incendios, desperfectos en la captación o en la conducción, etc.). Este volumen debe justificarse plenamente en sus aspectos técnicos y financieros.

La capacidad del tanque está en función del gasto máximo diario y la ley de demandas de la localidad, calculándose ya sea por métodos analíticos o gráficos. (MAPAS. CONAGUA. 2007).

El sistema de regularización de Ciudad Universitaria cuenta con tres tanques reguladores: Tanque Alto, Tanque Bajo y Tanque de Vivero Alto. Los tres tanques que existen en Ciudad Universitaria son abastecidos por los tres pozos con que cuenta el campus. Son del tipo "superficial" y cuentan en conjunto con una capacidad de 12,000 m³. La Tabla 3 muestra las características de los tanques y la capacidad de cada uno de ellos.

Tabla 3 Características generales de los tanques de Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM.

Tanque	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Capacidad (m ³)
T. Alto	40	25	4	4,000
T. Bajo	29	23	3	2,000
T. Vivero Alto (4)	25	20	3	6,000
			TOTAL	12,000

El Tanque Bajo es abastecido por el pozo de Química y su función es apoyar al Tanque Alto (mediante un equipo de rebombeo); esto cuando el pozo Multifamiliar está en mantenimiento. El Tanque Alto es abastecido por el pozo Multifamiliar y cuando está en mantenimiento también lo puede apoyar

el Tanque Vivero Alto. El Tanque Vivero Alto se alimenta del pozo Vivero Alto; este tanque está formado por cuatro tanques que se comunican entre sí.

El mantenimiento de los tanques se realiza dos veces por año, en periodo vacacional, y consiste en lavarlos, pintarlos y monitorear la calidad del agua.

En general, las condiciones físicas de los tanques pueden considerarse aceptables, se recomienda una revisión que identifique fugas en su interior.



Figura 20 Tanque Vivero Alto, Tanque Alto y Tanque Bajo.

3.2.2.1 Localización de tanques de regularización

En la Figura 21 se presenta el plano de Ciudad Universitaria mostrando la localización de los tanques que se encargan de regular el agua de Ciudad Universitaria.

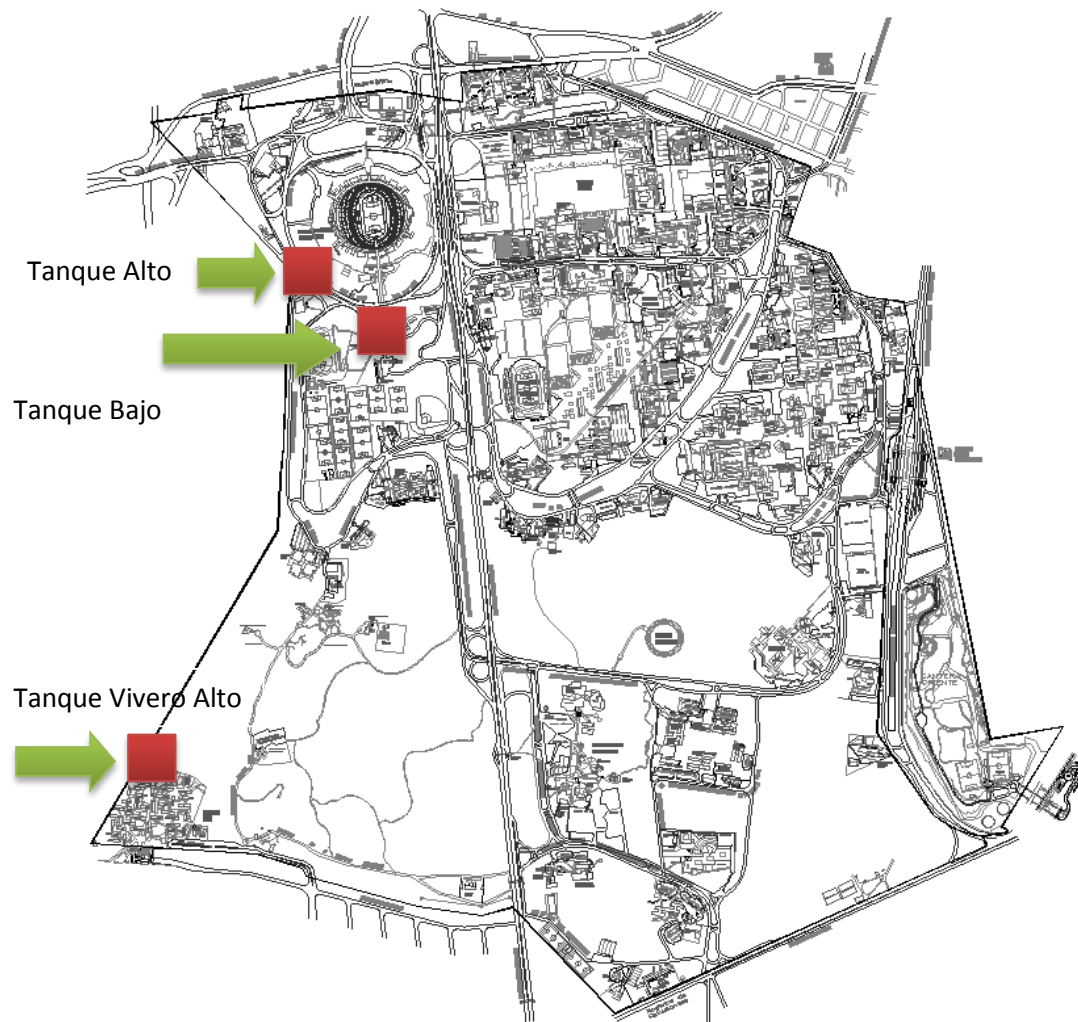


Figura 21 Ubicación de tanques de almacenamiento en Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM.

3.2.3 Distribución

Una red de distribución es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de regulación hasta la toma domiciliaria o hidrantes públicos. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para su consumo.

La red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria se compone de los siguientes elementos:

- ✓ Tuberías
- ✓ Piezas especiales
- ✓ Tomas de agua
- ✓ Hidrantes, etc.

Una red de distribución se divide en dos partes para determinar su funcionamiento hidráulico: la red primaria, que es la que rige el funcionamiento de la red, y la red secundaria que es la que se deriva de la red primaria.

La red primaria permite conducir el agua por medio de líneas troncales o principales y alimentar a las redes secundarias. El diámetro mínimo de las tuberías correspondientes a la red primaria en Ciudad Universitaria es de 100 milímetros (4 pulgadas) y en el caso de la red secundaria diámetros menores a este, los cuales constituyen los diámetros de las tomas.

La forma de distribución en Ciudad Universitaria es “mixta” debido a que se suministra agua por gravedad, así como por bombeo directo a la red. En la distribución por gravedad el agua de la fuente se conduce o bombea hasta un tanque, desde el cual fluye por gravedad hacia las entidades. Este es el método más confiable y se utilizó para el caso de Ciudad Universitaria, debido a que se dispone de cotas de terreno suficientemente altas para la ubicación de tanques de regularización, así como para asegurar las presiones requeridas en la red; sin embargo, en el caso de distribución por bombeo, son las bombas las que abastecen directamente a la red y la línea. Este es el sistema menos deseable pues al variar el consumo en la red, la presión en la misma cambia también. Así, al considerar esta variación, se requieren varias bombas para proporcionar el agua cuando sea necesario. Las variaciones de la presión suministrada por las bombas se transmiten directamente a la red, lo que puede aumentar el gasto perdido por las fugas. La experiencia de operación en México ha mostrado que esta forma de distribución no es adecuada.

3.2.3.1 Tuberías de Ciudad Universitaria

La red de distribución de agua potable de Ciudad Universitaria está integrada por cerca de 54 km de tubería de muy diversos diámetros y materiales, como lo son: acero, fibrocemento, fierro fundido, PVC y PEAD.

Los materiales más comunes de las tuberías que se pueden encontrar dentro de las instalaciones de la Universidad se muestran en la Tabla 4, asimismo el porcentaje de cada material.

Tabla 4 Porcentaje y longitud de los diferentes materiales de la red de distribución.

Material	Longitud (m)	Porcentaje (%)
Acero	25,610.00	47.81%
Fibrocemento	11,785.00	22.00%
Fierro fundido	9,623.00	17.96%
PEAD	750.00	1.40%
PVC	5,802.00	10.83%
Total	53,570.00	100.00%

La red está dividida en diámetros comerciales de 1, 1 ½, 2, 2 ½ pulgadas para algunas derivaciones hacia los edificios y tomas para riego. Se cuenta con diámetros de entre 3 y 6 pulgadas en ramales de alimentación de agua en la mayor parte de las dependencias. En las líneas de la red primaria se presentan diámetros de 3 a 8 pulgadas y para las líneas de conducción, que van de los pozos a los tanques, existen diámetros de 10 y 12 pulgadas; sólo hay una línea de 20 pulgadas que une el tanque Vivero Alto con la red de distribución de la Zona Cultural.

El operador del sistema hidráulico es la Dirección General de Obras y Conservación, por medio de la Coordinación de Conservación y el Taller de Agua Potable, cuya función es operar los pozos y tanques, dar mantenimiento a la red y reparar fugas en la red principal.



Figura 22 Red de tuberías de Ciudad Universitaria. FUENTE: DGOyC. UNAM.

- Acero (48%)
- Fibrocemento (22%)
- Fierro Fundido (18%)
- PVC (11%)
- PEAD (1%)

El esquema básico de la red de distribución de Ciudad Universitaria es de tipo combinado, ver Figura 22, ya que incluye configuraciones cerradas (o circuitos) y abiertas. Cabe destacar que la configuración de la red se refiere a la red primaria, ya que es la que rige el funcionamiento hidráulico

de la misma. Un circuito es un conjunto de tuberías conectadas en forma de polígono, donde el agua parte de un punto y puede volver al mismo después de fluir por las tuberías que lo componen. Cuando una red es cerrada (o tiene forma de malla), sus tuberías forman al menos un circuito.

La ventaja de las redes cerradas es que en caso de falla, el agua puede tomar trayectorias alternas para abastecer una zona en particular de la red. Una desventaja de las mismas es que no es fácil localizar las fugas.

La red abierta, por el contrario, se compone de tuberías que se ramifican sin formar circuitos (forma de árbol). Esta configuración de la red se utiliza cuando la planimetría y la topografía son irregulares dificultando la formación de circuitos. Este tipo de red tiene desventajas debido a que en los extremos muertos pueden existir proliferación de microorganismos y sedimentación; además, en caso de reparaciones, se interrumpe el servicio más allá del punto de reparación; y en caso de ampliaciones, la presión en los extremos es baja.

Capítulo IV Descripción del sistema de conducción pozo III - tanques de regularización

A continuación se presenta la descripción del sistema en estudio “pozo III - tanques de regularización” para el posterior análisis de fenómenos hidráulicos transitorios.

Las poblaciones que consumen agua subterránea disponen ordinariamente de pozos profundos, ya que tienen la ventaja de atravesar capas acuíferas profundas y extensas, circunstancias que evitan fluctuaciones súbitas en el nivel de la superficie y dan por resultado un rendimiento uniforme y considerable. El agua profunda es adecuada para obtener una buena calidad sanitaria, a menos que esté contaminada por infiltraciones en la capa acuífera, por cavernas o fisuras en las rocas que la recubren. Los inconvenientes son el gran costo de los pozos y el hecho de que el largo recorrido subterráneo del agua puede dar lugar a que se disuelvan minerales que pueden hacerla dura, corrosiva o inadecuada.

4.1 Obra de captación pozo III

La obra de captación se localiza en la zona de Vivero Alto, ubicado en el Jardín Botánico de Ciudad Universitaria, el agua que se capta es subterránea, ésta representa una fracción importante de la masa de agua y se aloja en los acuíferos bajo la superficie de la tierra, el agua del subsuelo es un recurso importante. Para obtener el agua subterránea de este lugar se utiliza un pozo, en la Figura 23 se presentan características de la obra de captación.



Figura 23 Caseta de vigilancia pozo III.

Datos técnicos del pozo:

Profundidad del pozo y diámetro del ademe³:

La profundidad total del pozo es de 170 m, de la profundidad (0 – 86) m se tiene un diámetro del ademe de 12", de la profundidad (86 – 170) m se tiene un diámetro del ademe de 10".

Se observa que se tiene un cambio de diámetro, en la parte inferior se encuentra el diámetro menor, por lo tanto hay un ancho variable en el pozo.

En la parte inferior del ademe se coloca grava que funciona como material de filtro para impedir el paso de sólidos y permitir el paso del agua.

- ✓ Columna 8" de diámetro
- ✓ Nivel estático: 94.07 m
- ✓ Nivel dinámico: 94.36 m

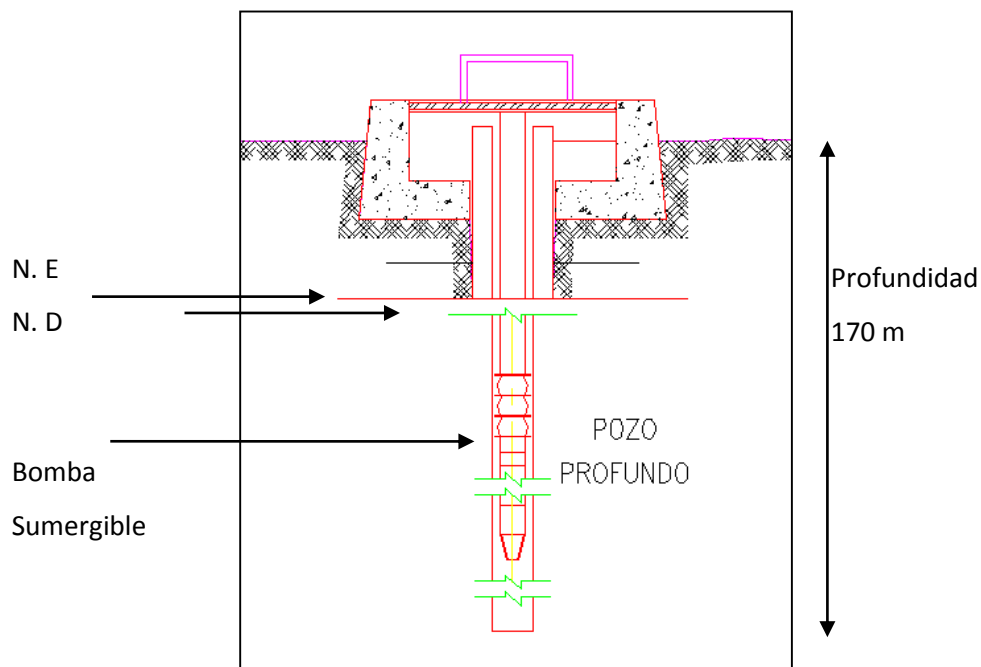


Figura 24 Corte transversal del pozo.

³ Es un tubo de acero que se introduce dentro del pozo para evitar que el suelo tenga una falla y taponee nuevamente la perforación. Es un elemento de carácter estructural que se ve sometido a diferentes esfuerzos del terreno.

4.1.1 Desinfección

La obra de captación cuenta con un sistema de desinfección, con base en el análisis que se hace para determinar las características del agua, se ha determinado una cantidad de cloro para que la comunidad universitaria cuente con agua de calidad.

El cloro es el desinfectante más usado en México para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos a ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser suministrado en muchas formas, como el uso del gas de cloro, soluciones de hipoclorito y otros compuestos.

La cloración es el procedimiento de desinfección de aguas mediante el empleo de cloro o compuestos clorados. Se puede emplear gas cloro, pero normalmente se emplea hipoclorito por su mayor facilidad de almacenamiento y dosificación.

El cloro es un desinfectante que tiene cierta limitante en términos de salubridad y seguridad, pero al mismo tiempo tiene un largo historial como un desinfectante efectivo.

En la Figura 25 se muestra que el pozo cuenta con un sistema de desinfección, lugar designado y controlado por el operador en turno.



Figura 25 Equipo de desinfección del agua extraída del pozo.

El pozo III ubicado en el Vivero Alto, en la zona del Jardín Botánico, tiene un gasto (Q) constante de 45 L/s; la desinfección se basa en la aplicación de 1.48 mg/L de hipoclorito de sodio durante el tiempo de bombeo hacia los tanques de regularización.

Cabe hacer mención que la NOM 127-SSA establece que el cloro residual libre debe estar presente en el agua potable con una concentración de entre (0,2-1,50) mg/L.

Se cuenta con un equipo electromecánico que dosifica el hipoclorito. Todo el proceso de desinfección se controla con un tablero. Acorde con la modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano.



Figura 26 Equipo electrónico para dosificación del hipoclorito.

En la estación de bombeo se cambió de gas cloro a hipoclorito, para tener una mejor dosificación, ya que se puede maniobrar de mejor manera.

4.2 Equipo de bombeo

La necesidad de colocar un equipo de bombeo es para conducir el agua desde el pozo III hasta los tanques de regularización.

La bomba opera alrededor de 12 horas al día, el bombeo es variable ya que se bombea o deja de bombear con base en el nivel en que se encuentren los tanques de regularización.

El equipo de bombeo cuenta con una bomba sumergible, esta bomba tiene un impulsor sellado en la carcasa, el conjunto se sumerge en el líquido a bombear, la ventaja de este tipo de bomba es que puede proporcionar una fuerza de elevación significativa pues al no requerir de un ramal de succión no depende de la presión atmosférica para hacer ascender el agua.

Datos técnicos de la bomba: Modelo: SUM 08 - 125

- ✓ Potencia: 125 HP
- ✓ Velocidad: 3500 RPM
- ✓ Diámetro exterior: 9.65"
- ✓ Largo: 1390 mm
- ✓ Peso: 294 Kg
- ✓ Voltaje de 440 V
- ✓ Amperaje de 164 A
- ✓ Eficiencia 87 %
- ✓ Gasto de bombeo de 45 l/s
- ✓ Motor: MSV 125/8
- ✓ Modelo:144/650/6

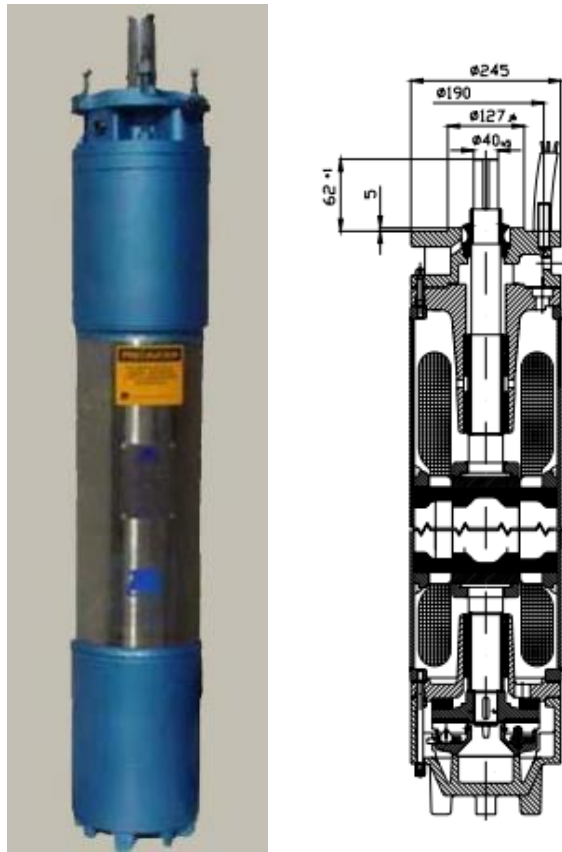


Figura 27 Bomba sumergible.

El equipo de bombeo se compone de obras electromecánicas y obras civiles, Se cuenta con una subestación eléctrica tipo superficial.

La camisa del equipo de bombeo, flecha, motor e impulsor son elementos que se encuentran sumergidos en el pozo.

La subestación eléctrica es una instalación destinada a modificar y establecer los niveles de tensión, para facilitar la distribución de la energía eléctrica.



Figura 28 Subestación eléctrica.

Entre las obras civiles se cuenta con un pararrayos que protege a la instalación de las descargas eléctricas, caseta de vigilancia, lugar donde se encuentra la subestación eléctrica, enrejados, cabezal de descarga, extremidades, junta o unión Gibault, manómetro, etc.

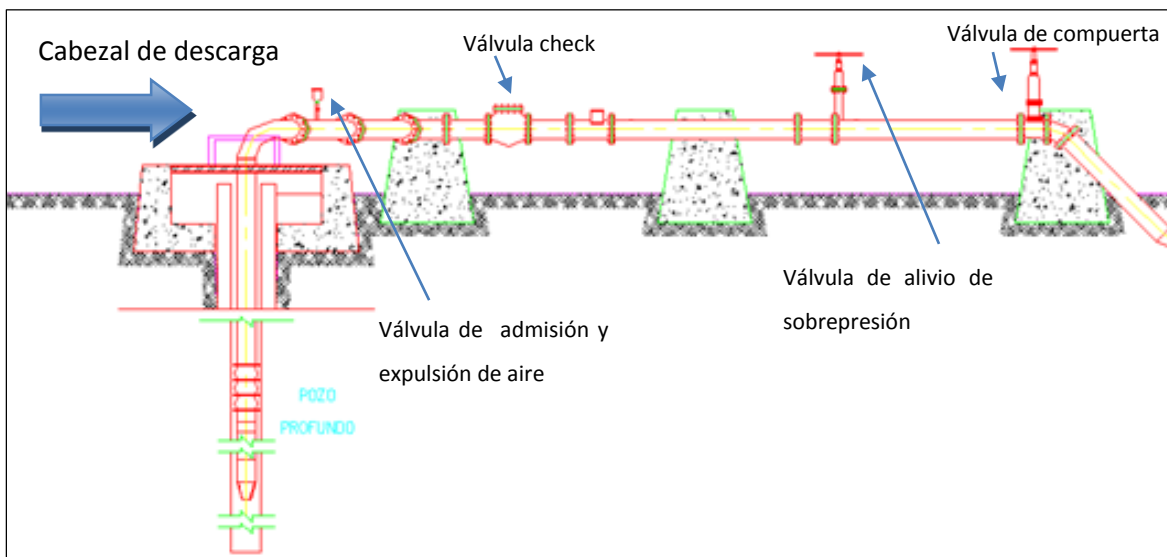


Figura 29 Cabezal de descarga.

El cabezal cargará y transmitirá esa carga como se muestra en la Figura 29.

En las bombas de pozo profundo el elemento que carga con todas las partes fijas de la bomba y la tubería, es el cabezal de descarga, pieza sumamente robusta que, además de ser por donde

descarga la bomba, tiene conexiones por arriba para el motor o cabezal y por abajo para toda la tubería de la columna.

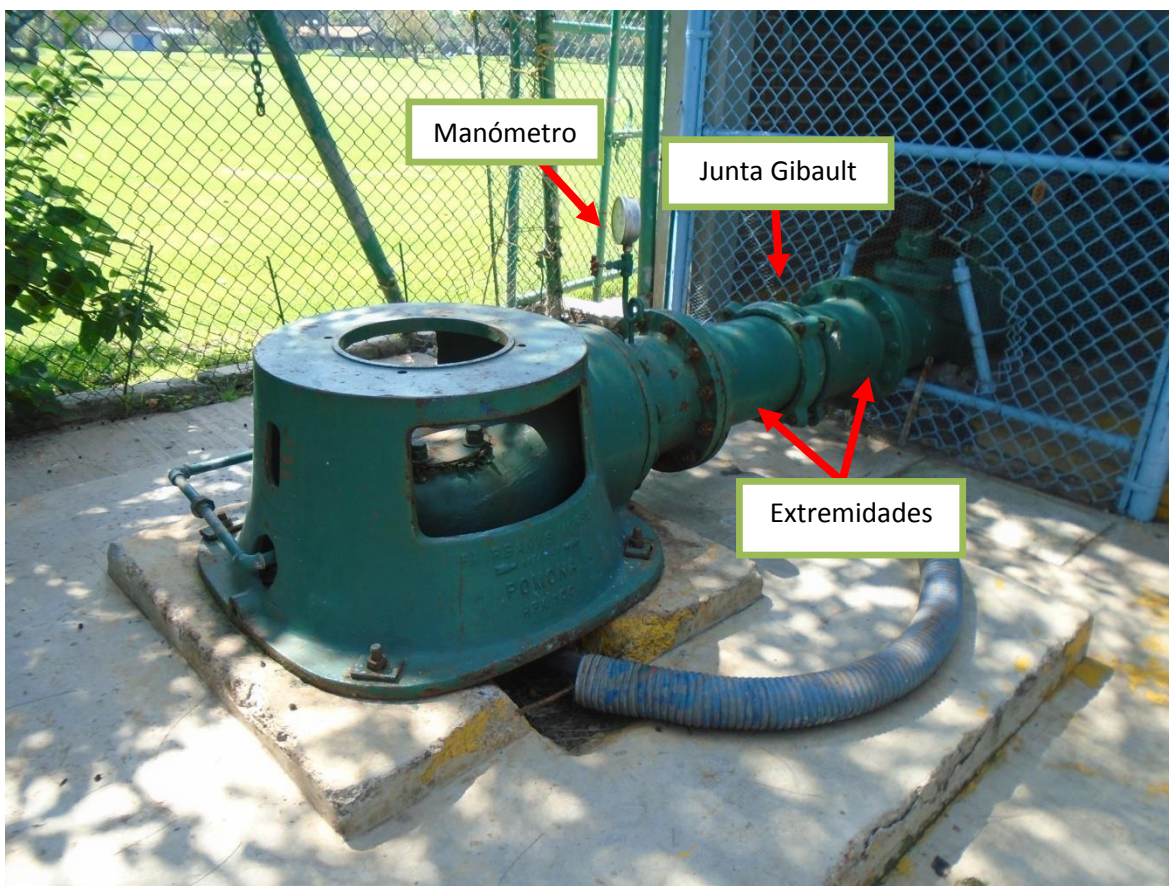


Figura 30 Equipo de bombeo.

El manómetro que se encuentra instalado en el cabezal de descarga muestra una presión que oscila alrededor de los 2.8 kg/cm^2 , también cuenta con un caudalímetro, hasta el día 1 de octubre del año 2014 muestra una medición de $3,081,648 \text{ m}^3$. Este volumen de agua es el que se ha extraído desde la instalación del medidor. En la parte superior de la pantalla se muestran los litros por segundo que se extraen, por lo general muestra un valor cercano a los 45 L/s.

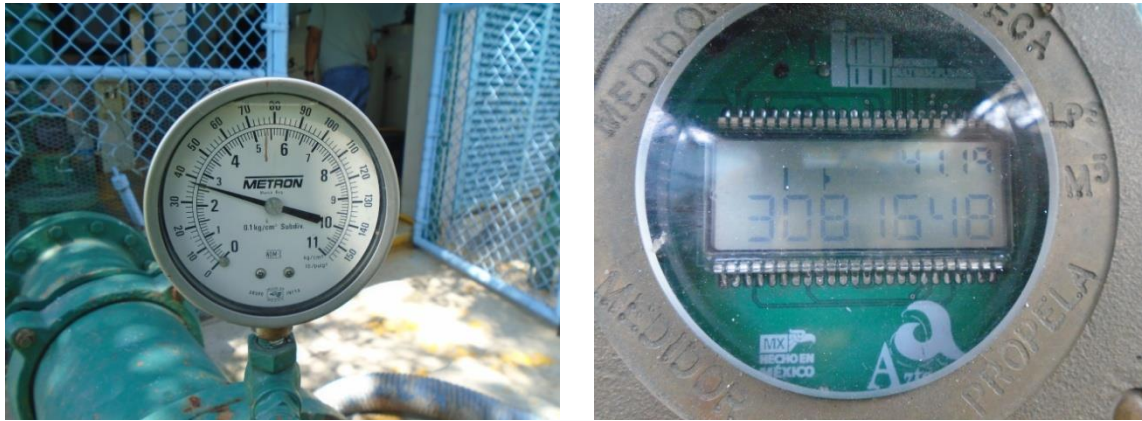


Figura 31 Manómetro y caudalímetro colocados en la obra de captación.

4.3 Tubería de la línea de conducción

Para la obtención del espesor se usó un equipo ultrasónico, el cual es de mucha utilidad cuando no se tiene conocimiento del espesor de la tubería de la línea de conducción. Este instrumento requiere de una calibración inicial para saber el rango de error que tiene dicho aparato, posteriormente se usa un transductor el cual hace un ultrasonido a la tubería y con ello identificar el espesor, el equipo ultrasónico puede determinar distintos parámetros, tales como el volumen que pasa, la velocidad del flujo, inclusive se puede usar como un lector de flujo, esto es que se puede dejar colocado y programado para ver cuál es el comportamiento del flujo en cualquier conducción, en este caso fue requerido este instrumento para saber cuál es el espesor de la línea de conducción, ya que en archivos de la DGOyC no se encontró.

El diámetro nominal de la línea de conducción es de 10 pulgadas, el espesor (δ) es de 12.70 mm ($\frac{1}{2}$ "), el material es acero al carbón.



Figura 32 Calibración y uso de equipo ultrasónico.

Con base en los resultados generados por el equipo ultrasónico, se determinó que la tubería tiene 13.38 mm de espesor. Al hacer la calibración se encontró que el aparato presenta un error de 0.7 mm adicionales a la lectura, por lo tanto el espesor real es de 12.70 mm ($\frac{1}{2}$ "). En la Figura 32 se muestra la calibración y medición del espesor.

Datos de la tubería:

- ✓ Material: acero al carbón
- ✓ Diámetro nominal: 250 mm = 10"
- ✓ Espesor δ : 12.70 mm = $\frac{1}{2}$ "

4.3.1 Trayectorias

La trayectoria de la tubería es el recorrido que describe el sistema, desde el punto inicial que es el pozo III hasta el crucero (30-A), en este punto de la trayectoria existen tres válvulas con diferentes funcionamientos que se abordarán con más detalle en el subcapítulo 4.4, el crucero antes mencionado es un punto de la trayectoria muy importante, ya que es donde se controla el paso del agua hacia los tanques de regularización. El agua almacenada en dichos tanques será entregada por gravedad a las instalaciones correspondientes, las cuales se encuentran en Zona Cultural y los campos de entrenamiento.

En la Figura 33 se muestra la trayectoria que tiene la conducción, esta comienza en el pozo III en el crucero (31) donde está la obra de captación, posteriormente con trayectoria recta llega al crucero

(30-A), después la línea de conducción se dirige hacia los tanques de regularización. En el subcapítulo 4.4 se describirá cómo operan las válvulas que se encuentran en este crucero.

La tubería de bombeo es de color rojo y es la línea de interés, la tubería de descarga se muestra de color morado que va de los tanques de regularización hasta el crucero (30).

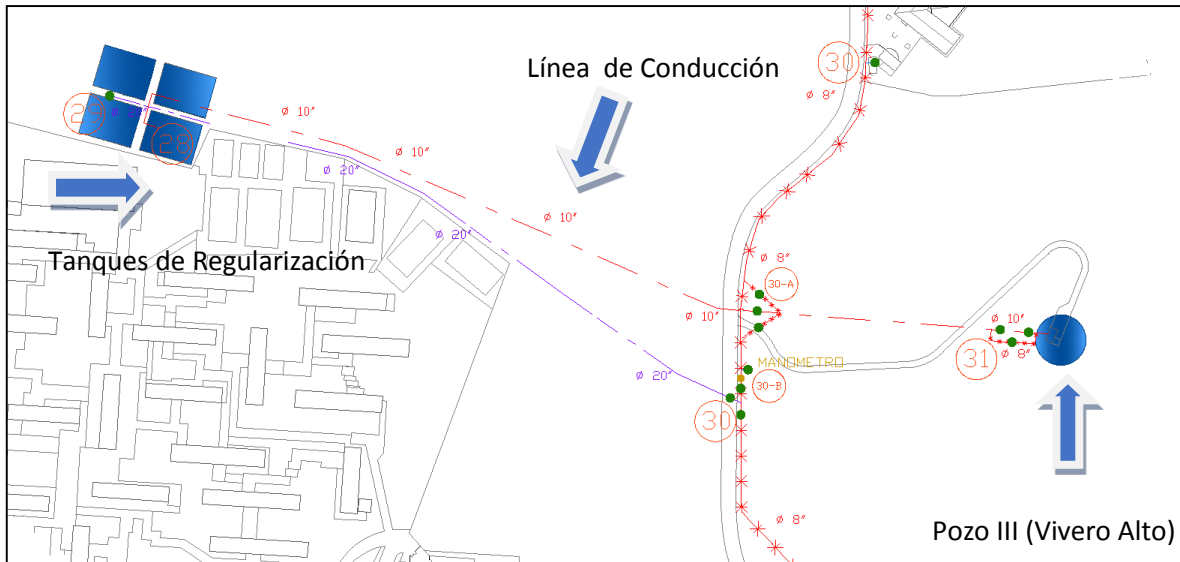


Figura 33 Vista en planta de la línea de conducción (pozo III – tanques de regularización). FUENTE: DGOyC. UNAM.

4.3.1.1 Topografía y cruzamientos

El perfil topográfico de la línea de conducción se realizó con la ayuda de un GPS y con una cinta de 50 m de largo, tomando puntos a cada 20 m para obtener pares de datos y posteriormente poder hacer el trazo del perfil topográfico representativo de la línea de conducción mediante el uso de programas computacionales de dibujo.



Figura 34 GPS y cinta de 50 m.

Considerando los datos obtenidos mediante el uso del GPS, se utilizó el programa MapSource, con el cual se extrajeron los datos. Posteriormente se pasaron los datos al programa Excel, corroborando con Google Maps que el perfil fuese el correcto.

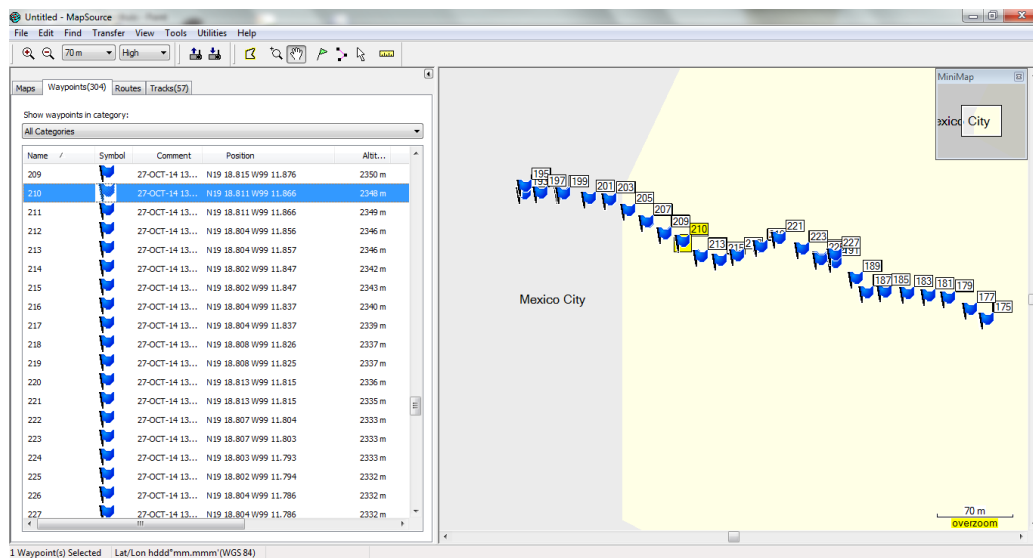


Figura 35 Información extraída del GPS con el programa MapSource.

En la Figura 35 se observa la información de los puntos incluidos para la obtención del perfil, así como la ruta elegida. MapSource permite copiar los datos a otro programa, en este caso Excel, en el cual se puede trabajar de manera más eficiente.

La Figura 36 muestra el perfil que genera Excel.

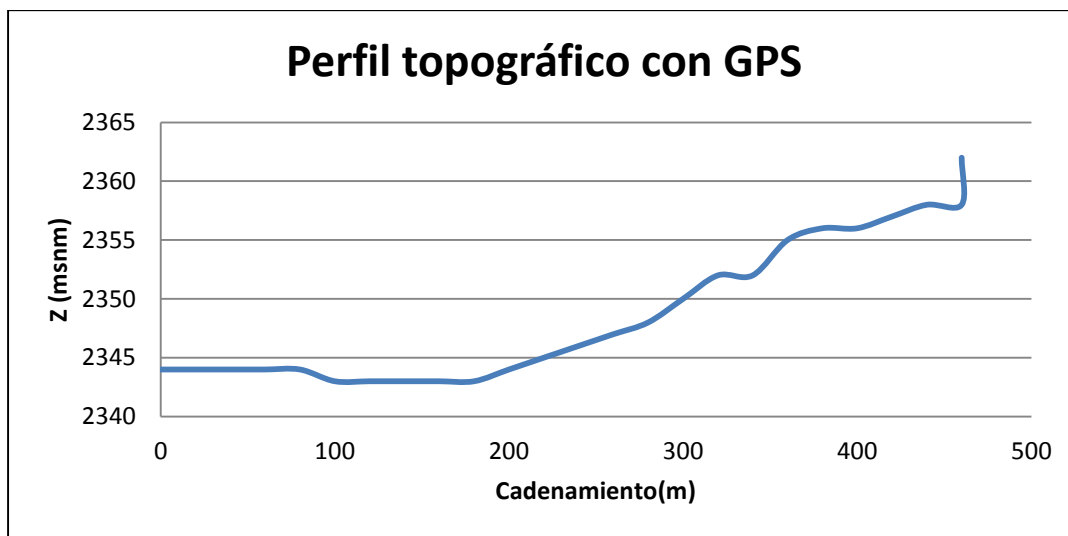


Figura 36 Perfil de la línea de conducción generado en Excel.

El perfil de la línea de conducción corresponde a los puntos obtenidos con el GPS.

No se está considerando la profundidad del pozo, es decir que el perfil solo corresponde con el terreno sobre la línea de conducción. La profundidad del pozo se tomará en cuenta en el análisis de transitorios, por lo que no se coloca en el perfil topográfico.

Los puntos extraídos del GPS son los que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5 Datos de GPS para perfil de topográfico.

Longitud (m)	Cota (msnm)	Longitud (m)	Cota (msnm)	Longitud (m)	Cota (msnm)	Longitud (m)	Cota (msnm)	Longitud (m)	Cota (msnm)
0	2344	100	2343	200	2344	300	2350	400	2356
20	2344	120	2343	220	2345	320	2352	420	2357
40	2344	140	2343	240	2346	340	2352	440	2358
60	2344	160	2343	260	2347	360	2355	460	2358
80	2344	180	2343	280	2348	380	2356	460	2362

El Dr. Enrique César Valdez, Jefe de Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, tuvo a bien proporcionar el perfil de la línea de conducción con un levantamiento topográfico que se hizo en el año 2009. Dado que este perfil fue realizado por un topógrafo y mediante el uso de equipo

especializado y que el GPS tiene un error de ± 3 m, se decidió que dicha información sería la base para los cálculos requeridos para identificar los fenómenos hidráulicos transitorios.

En la Figura 37 se muestra el perfil topográfico en Excel correspondiente a los datos proporcionados por la Jefatura del Departamento.

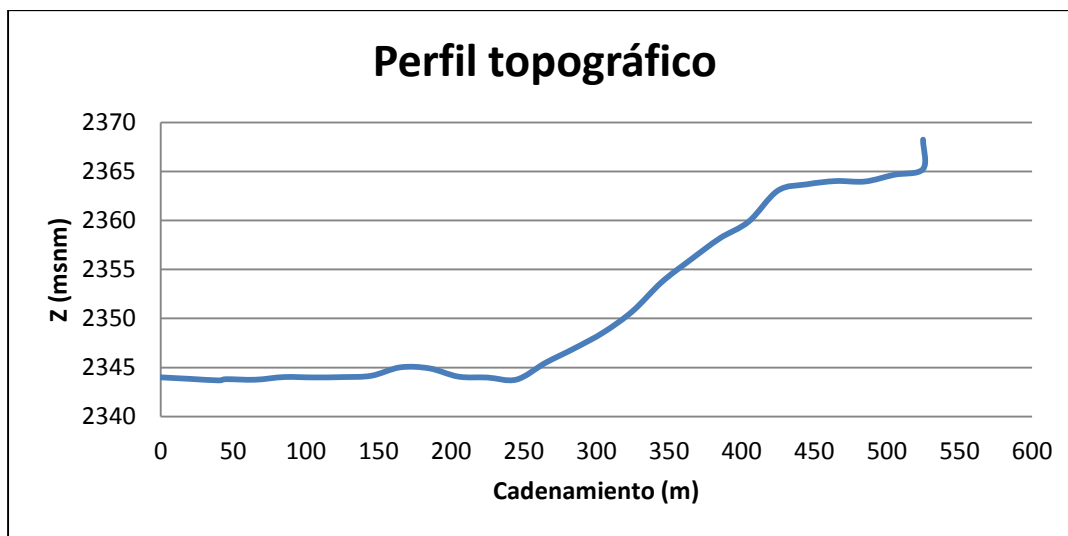


Figura 37 Perfil topográfico de la línea de conducción.

Los puntos del levantamiento topográfico se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6 Datos perfil topográfico.

Longitud (m)	Cota (msnm)	Longitud (m)	Cota (msnm)	Longitud (m)	Cota (msnm)	Longitud (m)	Cota (msnm)	Longitud (m)	Cota (msnm)
0	2344	105	2343.99	225	2343.98	345	2353.708	465	2364.018
20	2343.845	125	2344.025	245	2343.771	365	2356.003	485	2363.972
40	2343.686	145	2344.161	265	2345.483	385	2358.175	505	2364.655
45	2343.813	165	2345.019	285	2346.965	405	2359.892	525	2365.242
65	2343.758	185	2344.916	305	2348.592	425	2363.041	525	2368.242
85	2344.028	205	2344.074	325	2350.75	445	2363.686		

En la Figura 38 se muestra una comparativa de los levantamientos hechos con instrumentos de topografía y el uso de un GPS y una cinta, se observa que hay una ligera disparidad en ambos levantamientos.

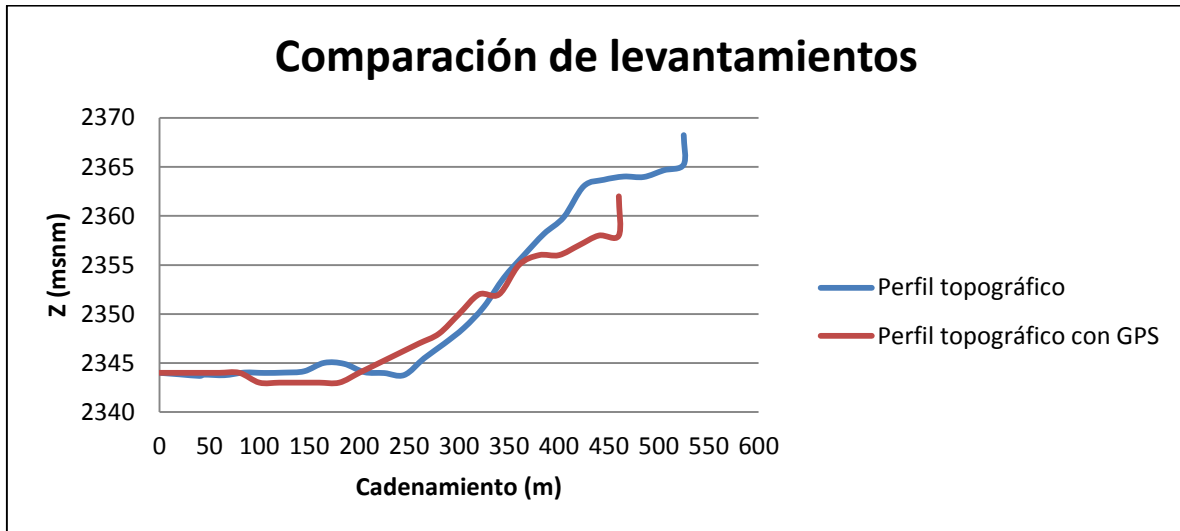


Figura 38 Comparación del levantamiento hecho con GPS y el levantamiento topográfico.

Como se puede concluir que hacer un levantamiento usando instrumentos no adecuados o con un rango de imprecisión dará como resultado un perfil lejano al real, este puede variar ya sea por el uso no adecuado o por errores que se pueden cometer al medir.

4.4 Dispositivos de control existentes en la línea de conducción

La línea de conducción que une al pozo III con los tanques de regularización incluye válvulas, para poder controlar los fenómenos transitorios que se puedan generar.

En este subcapítulo se abordan los dispositivos que se encuentran en la línea de conducción, después de la estación de bombeo y hasta los tanques de regularización. En la salida de la caseta de bombeo se encuentra el crucero (31), posteriormente se llegará al crucero (30-A), finalmente a los tanques de regularización donde se encuentra el crucero (28) y (29) en este hay otros dispositivos de control.

En la Figura 39 se muestran las piezas existentes, las cuales son: carrete, válvula de admisión y expulsión de aire, válvula check, válvula de compuerta y válvula de alivio de sobrepresión.



Figura 39 Equipo de bombeo, accesorios y válvulas.

Cada vez que se acciona la bomba y la línea de conducción se pone en funcionamiento, es necesario expulsar el aire que se encuentra en el interior de la tubería, y el tubo pueda llenarse de agua.

Para que se logre el llenado y el vaciado de la tubería, se colocan válvulas de admisión y expulsión de aire, las cuales hacen la doble función, expulsar el aire cuando la tubería se está llenando, o admitir aire a la tubería cuando ésta se está vaciando. En este caso la válvula de admisión y expulsión de aire que se observa permite el ingreso de aire cuando la bomba deja de operar.



Figura 40 Crucero (31), válvulas.

En el crucero (31) mostrado en la Figura 40 se encuentra un by-pass, que es un camino alternativo para el fluido, se utiliza mucho cuando se requiere el uso de válvulas automáticas. El by-pass se instala generalmente con válvulas de operación manual.

El crucero (30-A) se utiliza para realizar maniobras principalmente cuando se requiere hacer bombeo directo, ya sea porque a los tanques de regularización se les tiene que dar algún mantenimiento o existe algún problema aguas arriba de este crucero.



Figura 41 Crucero (30-A), arreglo de válvulas.

Cuando la operación es normal y solo se requiere bombear directamente a los tanques de regularización, se mantiene abierta solo la válvula que se encuentra en el centro, ver Figura 41, las otras dos son cerradas para que el agua solo siga un camino. Cuando se requiere hacer bombeo directo a la red de distribución se abre ya sea la válvula del lado derecho o del lado izquierdo, en función de a qué dependencias se les va abastecer de agua potable.

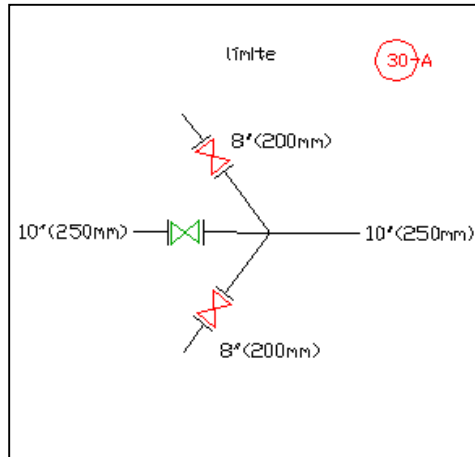


Figura 42 Arreglo de válvulas crucero (30-A)

Cuando se abre la válvula de la derecha se abastece la zona del Jardín Botánico, canchas de entrenamiento y algunas dependencias que se encuentran en la zona. Para que el agua solo vaya en dicha dirección se dispone de una válvula que al cerrarse impide el flujo en la dirección contraria, aparte de la que se encuentra en el arreglo, esta válvula se encuentra localizada en el crucero (30-B) en la margen izquierda.

Cabe mencionar que cada punto verde significa que hay válvula de control.

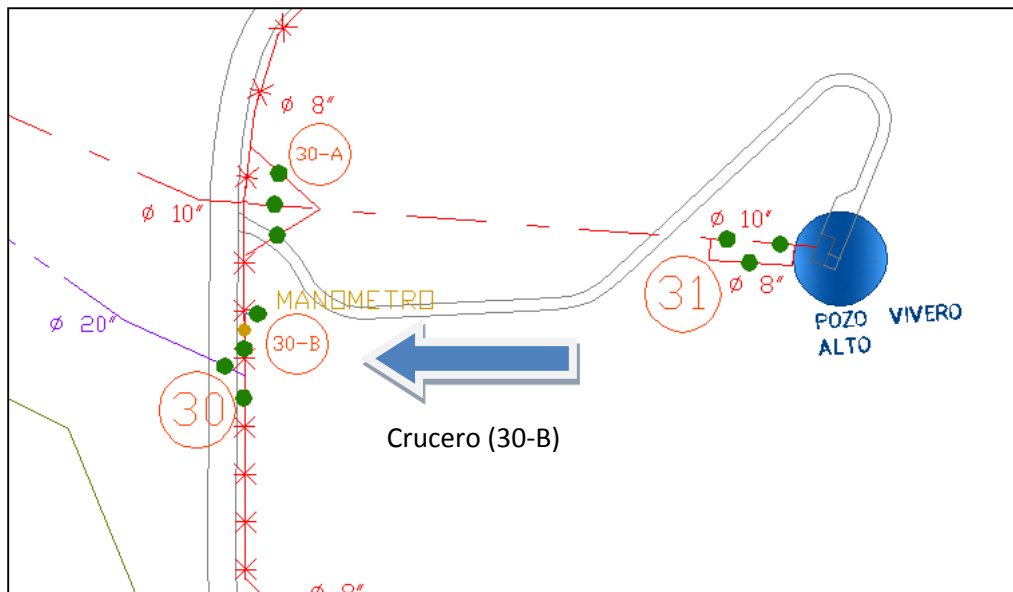


Figura 43 Crucero (30-B).

Para el caso contrario, es decir que se requiera abastecer a la Zona Cultural de Ciudad Universitaria, se hace la maniobra contraria, para esto se cierra la válvula que se encuentra en la margen derecha en el crucero (30), ver Figura 44.

Si se quiere abastecer a las dependencias en los dos sentidos simplemente se abren las válvulas derecha e izquierda y la del centro se cierra.

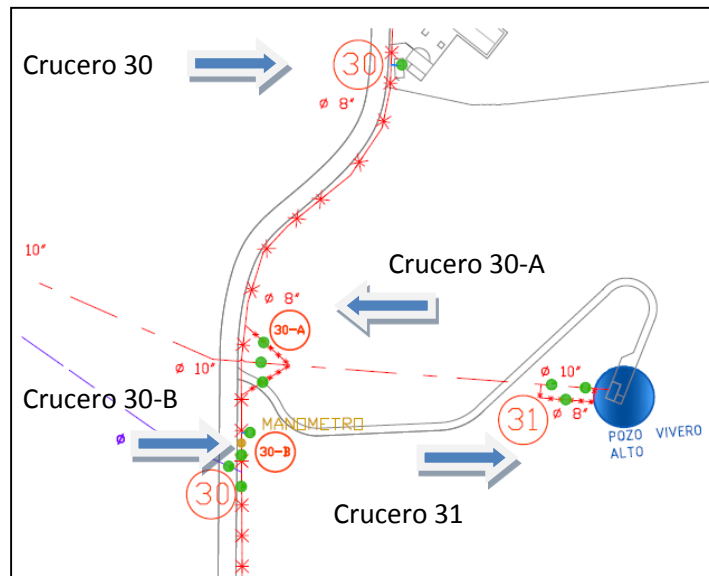


Figura 44 Crucero (30), (30-A), (30-B) Y (31).

Después de que pasa el cruce (30-A) continúa la línea de conducción hasta llegar a los tanques de regularización. Antes de llegar a los tanques de regularización la línea llega al cruce (28).



Figura 45 Caja de válvulas entrada a los tanques de regularización.

En la Figura 46 se puede observar la caja de válvulas y accesorios, esta es donde se encuentra el crucero (28) es muy amplia dado que en ella están instalados dispositivos los cuales se mencionaran a continuación.

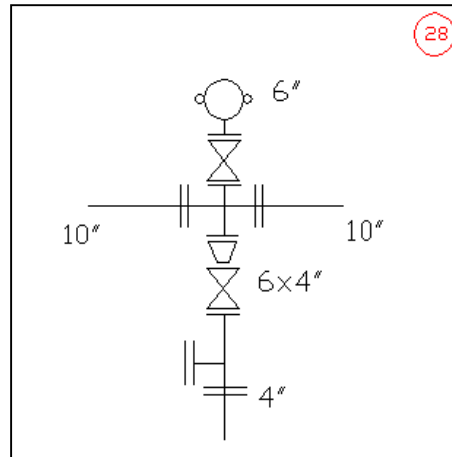


Figura 46 Válvulas y accesorios crucero (28).

A partir de la entrada de la línea de conducción, se tienen dispuestas las derivaciones hacia los tanques de regularización.



Figura 47 By-pass, arreglo de válvulas y tees de paso con reducción.

A la entrada de la tubería que viene del crucero (30-A) se encuentra un arreglo similar al que se encuentra en el crucero (31), consiste en válvulas y la instalación de un by-pass, también se cuenta con un dispositivo que sirve para medir el volumen de agua suministrado desde los tanques a la red de distribución.



Figura 48 Reducción hacia tanques de regularización.

Posterior al by-pass se encuentran algunas tees que conectan hacia los tanques de regularización, las tees tienen una reducción en el diámetro cuando se desvían a los tanques.



Figura 49 Tees de paso hacia los demás tanques.

Se puede observar otro registro que se encuentra aproximadamente a 20 m de la caja de válvulas y accesorios anterior, esta contiene solo tees que unen la tubería de la línea de conducción a los otros tanques, recordando que existen cuatro tanques y están unidos entre sí.



Figura 50 Crucero (29), llegada de la tubería para descarga de agua.

4.5 Tanques de regularización

Para el abastecimiento de agua hacia Jardín Botánico, Zona Cultural y campos de entrenamiento, se utilizan cuatro tanques de regularización que presentan las características descritas a continuación.

Las dimensiones de cada tanque son 25 m de largo, 20 m de ancho y 3 m de altura, estas dimensiones son internas, lo que representa un volumen de 1500 m³ por tanque, si se multiplica esta cantidad por el número de tanques se dispone de una capacidad total de 6000 m³.

Los tanques son de tipo superficial, esto es, están contruidos sobre la superficie del terreno.

El material del cual están hechas las paredes de los tanques es mampostería, recubiertas con mortero.

Las paredes internas están revestidas de material resistente a la oxidación y corrosión, por dentro los tanques se encuentran pintados en color azul, la pintura sirve como impermeabilizante.

Cuentan con losa de concreto, en ella se encuentran registros para el monitoreo de los tanques en su interior.

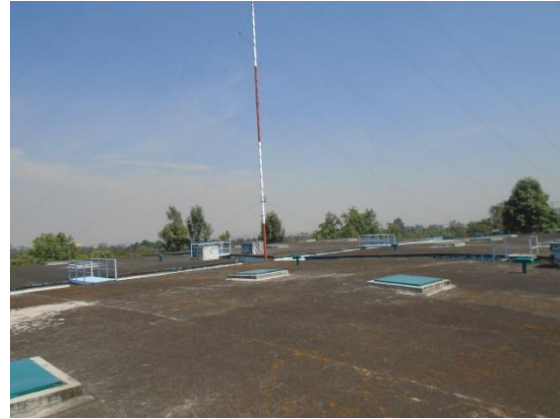


Figura 51 Tanques de regularización, Vivero Alto.

Conviene la construcción de este tipo de tanques cuando se tiene una topografía adecuada, dado que el suelo de Ciudad Universitaria se encuentra en la zona I, es un suelo firme formado por suelos de alta resistencia y poco compresibles. Los tanques se sitúan en una elevación natural en la proximidad de la zona por servir.

Los tanques de regularización tienen un sistema de ventilación, dotado de protección para evitar el ingreso de roedores y otros animales.



Figura 52 Registro de control y tubería de ventilación de los tanques.

Dentro de los tanques se encuentra pintada una escala, tomando en cuenta la profundidad del tanque, esto es de 0 m a 3 m, estas marcas sirven de referencia para identificar la altura del agua dentro del tanque.



Figura 53 Descarga libre.

El operador puede observar el nivel dentro del tanque, asimismo determinar si es necesario el paro del equipo de bombeo.



Figura 54 Registro de observación principal.

Los tanques de regularización se encuentran conectados entre sí. Solo existe un punto de descarga, este punto se encuentra en el tanque sur lado izquierdo, este se puede observar cuando se ingresa al sitio.

La línea de conducción que une a pozo III con los tanques de regularización es subterránea, cuando llega al primer tanque de regularización esta sale y se eleva 3.50 m hasta la descarga ver Figura 55.



Figura 55 Vista de tubería y descarga libre.

4.6 Operación

Operar un sistema de abastecimiento de agua es hacer funcionar correctamente los elementos que lo integran, asegurando que el agua sea de calidad, potable, en cantidad suficiente, con la presión adecuada para las necesidades de los usuarios y de forma continua.

Mantener un sistema de agua se refiere a las acciones que se deben realizar en las instalaciones y equipos para prevenir o reparar daños que pueden afectar el buen funcionamiento del mismo.

Las personas encargadas de operar y mantener en buenas condiciones los sistemas se llaman precisamente “operadores”. Estas personas deben tener vocación de servicio a su comunidad, en este caso a la Universidad Nacional Autónoma de México, estar en la caseta de operación y tener interés en capacitarse para desempeñar su papel con responsabilidad.

- Inspección y mantenimiento

No requiere bajo las condiciones de operación normal, el sistema funcionará prácticamente sin ningún mantenimiento específico. No obstante, se recomienda realizar inspecciones preventivas y de mantenimiento en forma periódica (al menos una vez al año).

-
- Procedimientos de operación del pozo III

La Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC) UNAM, fija las actividades que tiene que realizar el operador del pozo. El operador actual (febrero 2015) ha estado trabajando continuamente durante los últimos 35 años.

Con base en información proporcionada por el operador se describe el procedimiento que se lleva a cabo para que el sistema de agua del pozo III opere adecuadamente. Los siguientes pasos conforman el manual de procedimientos de operación con el que cuenta el operador.

1. Arranque y paro de motobombas de pozo profundo y equipos de rebombeo de agua potable, verificando que el voltaje sea correcto. Una vez funcionando, que el amperaje también sea el correcto.
2. Realizar la purga de aire al equipo de bombeo, para que opere correctamente y notificar cualquier anomalía al jefe inmediato.
3. Efectuar una vez por semana el sondeo en los pozos para verificar los niveles estático y dinámico. Se deberá de turnar por semana cada operador.
4. Llenar el reporte de horario, indicando el gasto en m^3/h , de cada uno de los pozos, notificar cualquier anomalía en los medidores de flujo al jefe inmediato.
5. Conocer el sistema de la red de distribución de agua potable y manipular (abrir o cerrar) válvulas de control.
6. Manipular y realizar las maniobras necesarias en el sistema de cloración para dar continuidad al cloro a fin de mantener el flujo continuo de este desinfectante en el agua potable, se deberán purgar y operar manualmente las bombas dosificadoras en caso necesario.
7. Verificar que la dosificación de cloro no sea inferior a 0.2 ni mayor a 1.5 partes por millón, mediante un comparador (realizar esta actividad diariamente), informar cualquier anomalía o desperfecto al jefe inmediato en el dosificador de cloro.

-
8. Revisar y mantener los niveles máximos indicados en cada uno de los tanques de almacenamiento y distribución de agua potable, informar de cualquier anomalía al jefe inmediato.
 9. Realizar la limpieza general del área de trabajo, notificando al operador del siguiente turno las condiciones en que se deja el área y los pormenores ocurridos durante la operación, el que sale del turno deberá firmar su reporte y notificar al que entra, el operador en turno no se puede ausentar hasta que entregue al siguiente operador su reporte firmado.
 10. Se deberá recibir el área de trabajo limpia, con el reporte de bitácora firmado, notificando al jefe inmediato de cualquier anomalía observada y en su defecto comentar los trabajos pendientes de realizar para la correcta operación de los equipos instalados.

Capítulo V Análisis de transitorios

En este capítulo se tratan los fenómenos transitorios hidráulicos que pueden ser generados en un sistema de bombeo, mencionando también los transitorios en sistemas a gravedad de forma general. Cabe mencionar que los transitorios hidráulicos que tienen relevancia en sistemas a gravedad son ocasionados por las maniobras de cierre o apertura de válvulas, generalmente operadas de forma brusca. Para poder realizar las maniobras sin problema de transitorios hidráulicos se recomienda hacer la apertura o cierre de la válvula con tiempos de realización largos. Cuando se generan de esta forma el efecto transitorio puede ser de poca importancia. En cambio en los sistemas de bombeo la causa principal de transitorio hidráulico es el arranque y paro de las bombas.

La maniobra de arranque se realiza siempre de manera programada. Cuando se tienen varias bombas en paralelo, las maniobras se realizan de forma secuencial o escalonada por lo que sus efectos no son críticos para el diseño de las tuberías, en cambio, el paro de los equipos de bombeo puede ser programado o bien producirse de forma accidental. Un paro programado, igual que un arranque, es una maniobra diseñada para no provocar condiciones críticas para la integridad del sistema, pero cuando el paro se produce de manera accidental, implica que el caudal total tiene que interrumpirse y por lo tanto la línea de conducción estará sometida a condiciones de flujo transitorio extremo, que son normalmente las que se utilizan para el diseño de la conducción.

A continuación se describen de manera general los transitorios hidráulicos que se pueden producir en un sistema de bombeo, en este caso en el cierre de la válvula del crucero (30-A).

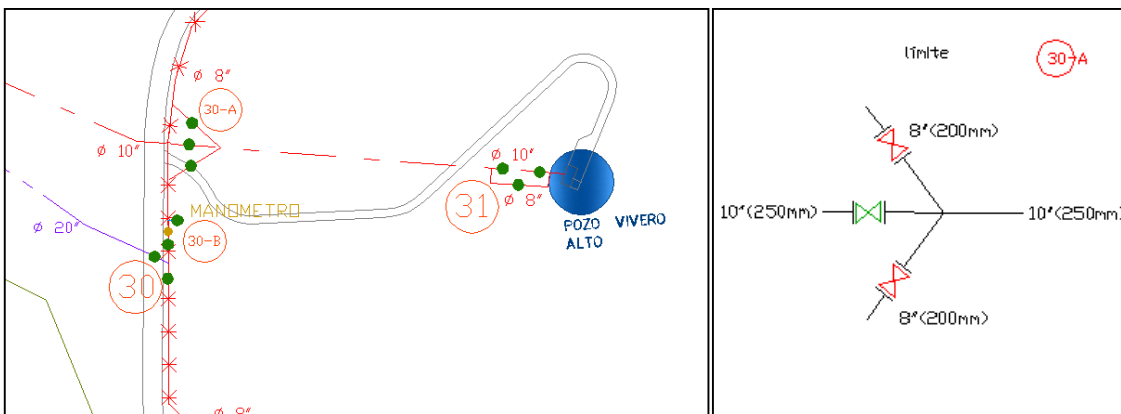


Figura 56 Crucero (30-A) lugar donde se ejecuta la maniobra de cierre de válvula.

En el sistema descrito en el Capítulo 4, se mencionan los diferentes casos en los que una válvula de control se puede abrir o cerrar, con tiempos del orden de 30 a 50 segundos, operación que se realiza para reducir el caudal bombeado previo al paro de bombas, este se da en la válvula que se encuentra en el crucero (30-A), ver Figura 56. Este cierre puede ser continuo, hasta su posición de cierre total, o bien lo que es más común, hasta un grado de apertura muy pequeño (del orden de 10%). Posteriormente se realiza el paro de la bomba y de ser el caso la válvula de descarga completa su carrera de cierre en un tiempo adicional de entre 10 y 20 segundos. Estos tiempos deben ser cuidadosamente revisados, pero normalmente son de un orden semejante al señalado para el caso del sistema de bombeo. Igual que en el arranque, estas maniobras se realizan de manera manual y en algunos sistemas de forma automatizada.

5.1 Análisis de transitorios generados por cierre total y parcial de una válvula de control

Con base en las ecuaciones diferenciales del golpe de ariete en la teoría de Allievi, se determinará la carga de presión en la sección adyacente de la válvula de control que se encuentra en el crucero (30-A).

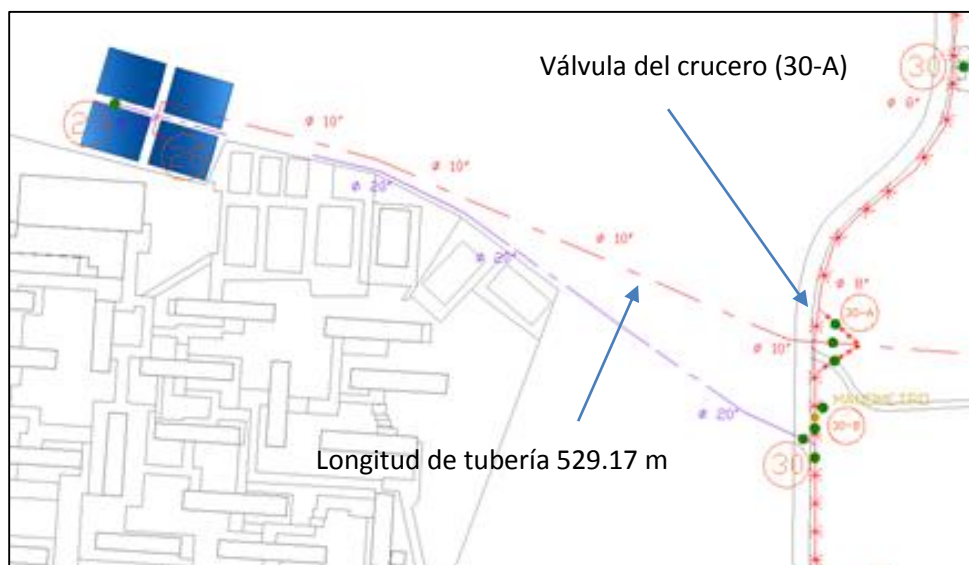


Figura 57 Tramo de la conducción para análisis de transitorios al cierre de una válvula.

Se procede a calcular las presiones y las velocidades que se presentan justo aguas arriba de la válvula para una ley de cierre lineal, teniendo en cuenta las siguientes características.

En la conducción de interés se tienen los siguientes datos:

- ✓ Longitud $L = 529.17m$ (entre la válvula central del crucero (30-A) y el punto de descarga)
- ✓ Velocidad $V_0 = 0.888m/s$
- ✓ Diámetro $D = 0.250m$
- ✓ Celeridad $a = 1298.82m/s$
- ✓ Altura $H_0 = 21.24m$ (entre la válvula del crucero (30-A) y el punto de descarga)

Cabe mencionar que la obtención de la celeridad se muestra en el subcapítulo 5.2.

Para cualquier caso expuesto de cierre o apertura de una válvula, el periodo y la constante de Allievi son respectivamente:

$$T = \frac{2 \times 529.17m}{1298.82m/s} = 0.8148s$$

$$\varepsilon = \frac{1298.82m/s \times 0.888m/s}{2 \times 9.81m/s^2 \times 21.24m} = 2.7676$$

Con base en información obtenida durante el trabajo de campo se conoce que el tiempo que se tarda en cerrar la válvula el operador es de 30 segundos, por lo que se tiene:

$$t_c = 30s; \quad t_c = \theta T; \quad \theta = \frac{t_c}{T} = \frac{30s}{0.8148s} = 36.81$$

Esos parámetros se usarán para realizar el análisis de transitorios por el cierre de una válvula, para esto conviene hacer una tabla, como la Tabla 7, posterior se describe paso a paso la obtención de cada columna.

Tabla 7 Modelo para analizar el transitorio generado por cierre o apertura de válvula.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
i	t	τ_i	$\varepsilon\tau_i$	$(\varepsilon\tau_i)^2$	$2(1+\varepsilon\tau_{i-1}Z_{i-1})$	Z_i	$(Z_i)^2$	H_i	ΔH	V_i
	(s)							(m)	(m)	(m/s)
0										
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										

La columna 1 indica los instantes de periodo, los cuales difieren entre sí T segundos; la columna 2 muestra el tiempo acumulado desde que inicia el cierre, y la columna 3, el valor de τ_i que corresponde a cada instante de periodo, y que por cierre total se determina con la ecuación $\tau = 1 - \frac{t}{t_c}$, una vez que concluye la maniobra todos los valores subsecuentes de τ_i son iguales a cero.

Para $i = 0$, el flujo es permanente, la válvula aún no cierra, por lo que $H_i = 21.24m$,

$$Z_i = \sqrt{\frac{H_i}{H_0}} = 1$$

Los valores de las columnas 4 y 5 se calculan fácilmente con los valores de ε y τ_i .

A partir de $i = 1$, para calcular la columna 6, los valores de $\varepsilon\tau_{i-1}$ y Z_{i-1} son los del renglón inmediato anterior. En la columna 7, Z_i se calcula con los valores de $\varepsilon\tau_i$, $(\varepsilon\tau_i)^2$, $2(1 + \varepsilon\tau_{i-1}Z_{i-1})$ y $(Z_{i-1})^2$ sustituidos en la siguiente ecuación $Z_i = \sqrt{(\varepsilon\tau_i)^2 + 2(1 + \varepsilon\tau_{i-1}Z_{i-1}) - Z_{i-1}^2 - \varepsilon\tau_i}$; en la columna 9, con la siguiente ecuación $Z_i^2 = \frac{H_i}{H_0}$ se determina $H_i = Z_i^2 H_0$ y en la columna 10 $\Delta H = H_i - H_0$ indica la diferencia de carga de presión con respecto al flujo permanente. Finalmente en la columna 11 la velocidad V_i es la velocidad en el instante en que la válvula va cerrando, se calcula a partir de la ecuación $\frac{V_i}{V_0} = \tau_{i-1} Z_i$ como $V_i = V_0 \tau_i Z_i$.

Para los primeros cincuenta periodos y un tiempo de cierre de 30 segundos, los cálculos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8 Análisis para un tiempo de cierre de 30 s.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
i	t	τ_i	$\epsilon\tau_i$	$(\epsilon\tau_i)^2$	$2(1+\epsilon\tau_i Z_{i-1})$	Z_i	$(Z_i)^2$	H_i	ΔH	V_i
	(s)							(m)	(m)	(m/s)
0	0.0000	1.0000	2.7676	7.6596		1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.8880
1	0.8148	0.9728	2.6924	7.2492	7.5352	1.0203	1.0410	22.1112	0.8712	0.8814
2	1.6296	0.9457	2.6173	6.8501	7.4942	1.0301	1.0611	22.5378	1.2978	0.8650
3	2.4444	0.9185	2.5421	6.4623	7.3921	1.0347	1.0705	22.7381	1.4981	0.8439
4	3.2592	0.8914	2.4669	6.0857	7.2604	1.0367	1.0748	22.8291	1.5891	0.8206
5	4.0740	0.8642	2.3918	5.7205	7.1151	1.0376	1.0767	22.8691	1.6291	0.7963
6	4.8888	0.8370	2.3166	5.3666	6.9636	1.0380	1.0775	22.8862	1.6462	0.7716
7	5.7036	0.8099	2.2414	5.0240	6.8094	1.0382	1.0778	22.8932	1.6532	0.7466
8	6.5184	0.7827	2.1663	4.6927	6.6540	1.0383	1.0780	22.8960	1.6560	0.7216
9	7.3332	0.7556	2.0911	4.3726	6.4982	1.0383	1.0780	22.8971	1.6571	0.6966
10	8.1480	0.7284	2.0159	4.0639	6.3423	1.0383	1.0780	22.8975	1.6575	0.6716
11	8.9628	0.7012	1.9408	3.7665	6.1862	1.0383	1.0780	22.8976	1.6576	0.6465
12	9.7776	0.6741	1.8656	3.4804	6.0301	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.6215
13	10.5924	0.6469	1.7904	3.2056	5.8740	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.5965
14	11.4072	0.6198	1.7152	2.9421	5.7179	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.5714
15	12.2220	0.5926	1.6401	2.6899	5.5618	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.5464
16	13.0368	0.5654	1.5649	2.4489	5.4058	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.5213
17	13.8516	0.5383	1.4897	2.2193	5.2497	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.4963
18	14.6664	0.5111	1.4146	2.0010	5.0936	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.4713
19	15.4812	0.4840	1.3394	1.7940	4.9375	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.4462
20	16.2960	0.4568	1.2642	1.5983	4.7814	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.4212
21	17.1108	0.4296	1.1891	1.4139	4.6253	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.3961
22	17.9256	0.4025	1.1139	1.2408	4.4692	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.3711
23	18.7404	0.3753	1.0387	1.0790	4.3131	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.3460
24	19.5552	0.3482	0.9636	0.9285	4.1570	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.3210
25	20.3700	0.3210	0.8884	0.7893	4.0009	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.2960
26	21.1848	0.2938	0.8132	0.6613	3.8448	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.2709
27	21.9996	0.2667	0.7381	0.5447	3.6887	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.2459
28	22.8144	0.2395	0.6629	0.4394	3.5326	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.2208
29	23.6292	0.2124	0.5877	0.3454	3.3766	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.1958
30	24.4440	0.1852	0.5126	0.2627	3.2205	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.1708
31	25.2588	0.1580	0.4374	0.1913	3.0644	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.1457
32	26.0736	0.1309	0.3622	0.1312	2.9083	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.1207
33	26.8884	0.1037	0.2871	0.0824	2.7522	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.0956
34	27.7032	0.0766	0.2119	0.0449	2.5961	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.0706
35	28.5180	0.0494	0.1367	0.0187	2.4400	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.0455
36	29.3328	0.0222	0.0616	0.0038	2.2839	1.0383	1.0780	22.8977	1.6577	0.0205
37	30.1476	0.0000	0.0000	0.0000	2.1278	1.0246	1.0498	22.2971	1.0571	0.0000
38	30.9624	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9748	0.9502	20.1829	-1.0571	0.0000
39	31.7772	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0246	1.0498	22.2971	1.0571	0.0000
40	32.5920	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9748	0.9502	20.1829	-1.0571	0.0000
41	33.4068	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0246	1.0498	22.2971	1.0571	0.0000
42	34.2216	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9748	0.9502	20.1829	-1.0571	0.0000
43	35.0364	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0246	1.0498	22.2971	1.0571	0.0000
44	35.8512	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9748	0.9502	20.1829	-1.0571	0.0000
45	36.6660	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0246	1.0498	22.2971	1.0571	0.0000
46	37.4808	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9748	0.9502	20.1829	-1.0571	0.0000
47	38.2956	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0246	1.0498	22.2971	1.0571	0.0000
48	39.1104	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9748	0.9502	20.1829	-1.0571	0.0000
49	39.9252	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0246	1.0498	22.2971	1.0571	0.0000
50	40.7400	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9748	0.9502	20.1829	-1.0571	0.0000

En este caso, la máxima carga de presión es de 22.8977 m, valor que prácticamente se presenta desde $i = 12$, posterior al cierre se presentan oscilaciones de carga de presión que van cambiando, a esta zona se le llama pendular; si el cálculo se realiza para valores de $i > 35$ estas oscilaciones se seguirán presentando. No olvidar que en los cálculos se hizo caso omiso de la fricción, por lo que

aparentemente las oscilaciones son permanentes; en realidad, las oscilaciones de presión se irán amortiguando hasta llegar a cero y la carga piezométrica en la sección, al no haber movimiento, será la misma que se tenga en la descarga.

Los resultados de la Tabla 8 presentan en la Figura 58.

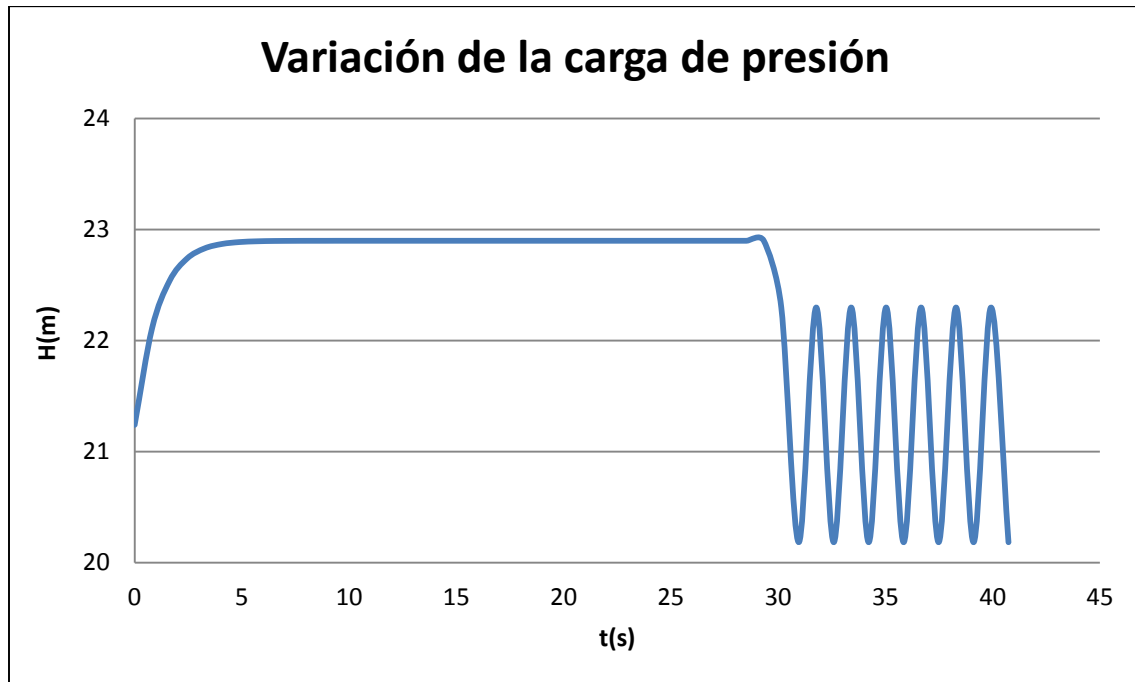


Figura 58 Variación de la carga de presión en un tiempo de cierre de 30 s.

Para un $t_c = 10s$ se tendrán las características mostradas en Tabla 9, tomando en cuenta que solo se toman los primeros 20 periodos.

Tabla 9 Análisis para un tiempo de cierre de 10 s.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
i	t	τ_i	$\epsilon\tau_i$	$(\epsilon\tau_i)^2$	$2(1+\epsilon\tau_i Z_{i-1})$	Z_i	$(Z_i)^2$	H_i	ΔH	V_i
	(s)							(m)	(m)	(m/s)
0	0.0000	1.0000	2.7676	7.6596		1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.8880
1	0.8148	0.9185	2.5421	6.4623	7.5352	1.0631	1.1302	24.0051	2.7651	0.8671
2	1.6296	0.8370	2.3166	5.3666	7.4050	1.0954	1.1998	25.4841	4.2441	0.8142
3	2.4444	0.7556	2.0911	4.3726	7.0750	1.1101	1.2324	26.1763	4.9363	0.7448
4	3.2592	0.6741	1.8656	3.4804	6.6428	1.1162	1.2458	26.4610	5.2210	0.6681
5	4.0740	0.5926	1.6401	2.6899	6.1646	1.1183	1.2506	26.5624	5.3224	0.5885
6	4.8888	0.5111	1.4146	2.0010	5.6682	1.1189	1.2520	26.5923	5.3523	0.5079
7	5.7036	0.4296	1.1891	1.4139	5.1656	1.1191	1.2523	26.5991	5.3591	0.4269
8	6.5184	0.3482	0.9636	0.9285	4.6613	1.1191	1.2524	26.6001	5.3601	0.3460
9	7.3332	0.2667	0.7381	0.5447	4.1566	1.1191	1.2524	26.6001	5.3601	0.2650
10	8.1480	0.1852	0.5126	0.2627	3.6519	1.1191	1.2524	26.6001	5.3601	0.1840
11	8.9628	0.1037	0.2871	0.0824	3.1472	1.1191	1.2524	26.6001	5.3601	0.1031
12	9.7776	0.0222	0.0616	0.0038	2.6425	1.1191	1.2524	26.6001	5.3601	0.0221
13	10.5924	0.0000	0.0000	0.0000	2.1378	0.9410	0.8854	18.8060	-2.4340	0.0000
14	11.4072	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0557	1.1146	23.6740	2.4340	0.0000
15	12.2220	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9410	0.8854	18.8060	-2.4340	0.0000
16	13.0368	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0557	1.1146	23.6740	2.4340	0.0000
17	13.8516	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9410	0.8854	18.8060	-2.4340	0.0000
18	14.6664	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0557	1.1146	23.6740	2.4340	0.0000
19	15.4812	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.9410	0.8854	18.8060	-2.4340	0.0000
20	16.2960	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	1.0557	1.1146	23.6740	2.4340	0.0000

Con base en los cálculos realizados se observa que al momento de cerrar la válvula en un tiempo menor que el ordinario para el cierre de la misma válvula, se generan presiones mayores, esto se puede observar en la Figura 59.

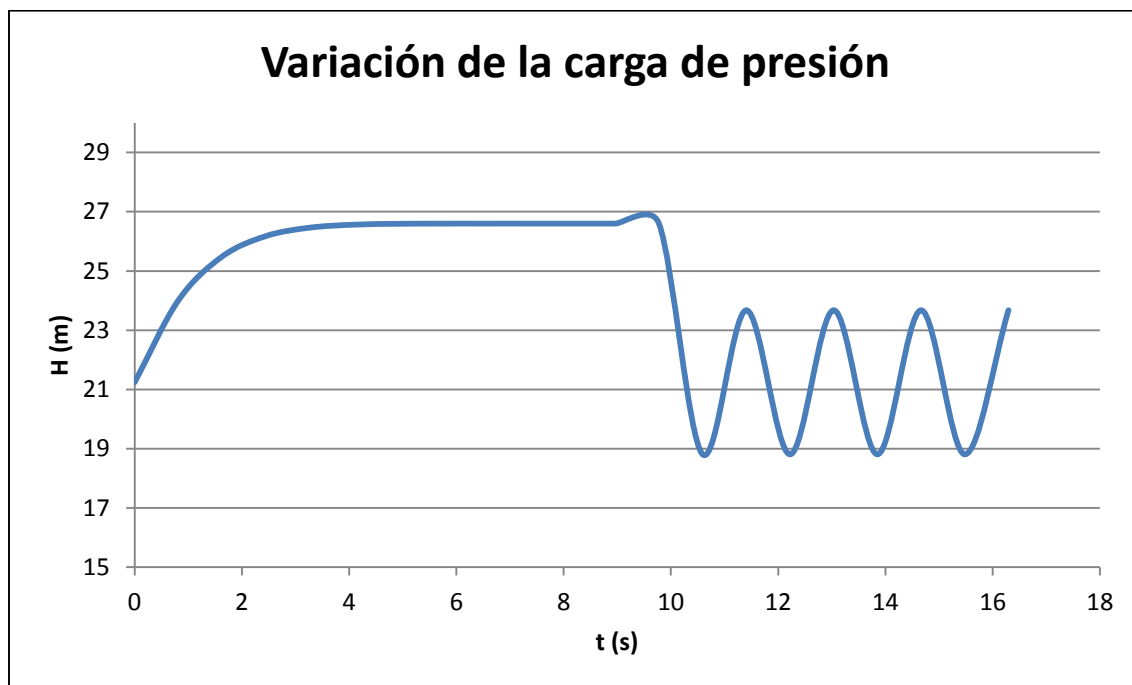


Figura 59 Variación de la carga de presión en un tiempo de cierre de 10 s.

Con base en los cálculos realizados se concluye que entre más rápido sea el cierre de una válvula se generarán presiones cada vez más grandes.

Posteriormente se procedió a identificar las presiones para un cierre parcial. Para esto se utiliza la misma tabla para el cálculo de un cierre total, pero haciendo algunas modificaciones, primero se obtendrá de manera distinta el parámetro τ_i este se obtendrá de la siguiente manera

$\tau_i = 1 - (1 - \tau_f) \frac{i}{\theta}$ para $\theta = 10$ y $\tau_f = 0.5$ quedando una tabla de cálculo semejante a las anteriores.

$\theta = \frac{t_c}{T} = \frac{30s}{0.8148s} = 36.81$ Este parámetro se obtiene del cociente de tiempo de cierre entre el periodo.

$\tau_f = 0.5$ Este valor es cuando se tiene un cierre parcial, el 0.5 significa que está exactamente a la mitad de la capacidad de abertura.

Tabla 10 Análisis para un cierre parcial de válvula.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
i	t	τ_i	$\epsilon\tau_i$	$(\epsilon\tau_i)^2$	$2(1+\epsilon\tau_{i-1}Z_{i-1})$	Z_i	$(Z_i)^2$	H_i	ΔH	V_i
	(s)							(m)	(m)	(m/s)
0	0.0000	1.0000	2.7676	7.6596		1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.8880
1	0.8148	0.9500	2.6292	6.9128	7.5352	1.0379	1.0773	22.8819	1.6419	0.8756
2	1.6296	0.9000	2.4908	6.2043	7.4579	1.0567	1.1166	23.7159	2.4759	0.8445
3	2.4444	0.8500	2.3525	5.5341	7.2640	1.0654	1.1350	24.1075	2.8675	0.8041
4	3.2592	0.8000	2.2141	4.9022	7.0125	1.0692	1.1431	24.2791	3.0391	0.7595
5	4.0740	0.7500	2.0757	4.3085	6.7344	1.0707	1.1464	24.3494	3.1094	0.7131
6	4.8888	0.7000	1.9373	3.7532	6.4449	1.0713	1.1477	24.3762	3.1362	0.6659
7	5.7036	0.6500	1.7989	3.2362	6.1508	1.0715	1.1481	24.3855	3.1455	0.6185
8	6.5184	0.6000	1.6606	2.7575	5.8551	1.0716	1.1482	24.3885	3.1485	0.5709
9	7.3332	0.5500	1.5222	2.3170	5.5588	1.0716	1.1483	24.3893	3.1493	0.5234
10	8.1480	0.5000	1.3838	1.9149	5.2623	1.0716	1.1483	24.3895	3.1495	0.4758
11	8.9628	0.5000	1.3838	1.9149	4.9657	1.0104	1.0210	21.6853	0.4453	0.4486
12	9.7776	0.5000	1.3838	1.9149	4.7965	1.0017	1.0033	21.3104	0.0704	0.4447
13	10.5924	0.5000	1.3838	1.9149	4.7722	1.0003	1.0005	21.2513	0.0113	0.4441
14	11.4072	0.5000	1.3838	1.9149	4.7683	1.0000	1.0001	21.2418	0.0018	0.4440
15	12.2220	0.5000	1.3838	1.9149	4.7677	1.0000	1.0000	21.2403	0.0003	0.4440
16	13.0368	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
17	13.8516	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
18	14.6664	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
19	15.4812	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
20	16.2960	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
21	17.1108	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
22	17.9256	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
23	18.7404	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
24	19.5552	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
25	20.3700	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
26	21.1848	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
27	21.9996	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
28	22.8144	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
29	23.6292	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440
30	24.4440	0.5000	1.3838	1.9149	4.7676	1.0000	1.0000	21.2400	0.0000	0.4440

De igual manera que en los dos casos anteriores también se muestra una gráfica, ver Figura 60, para apreciar el comportamiento de este fenómeno.

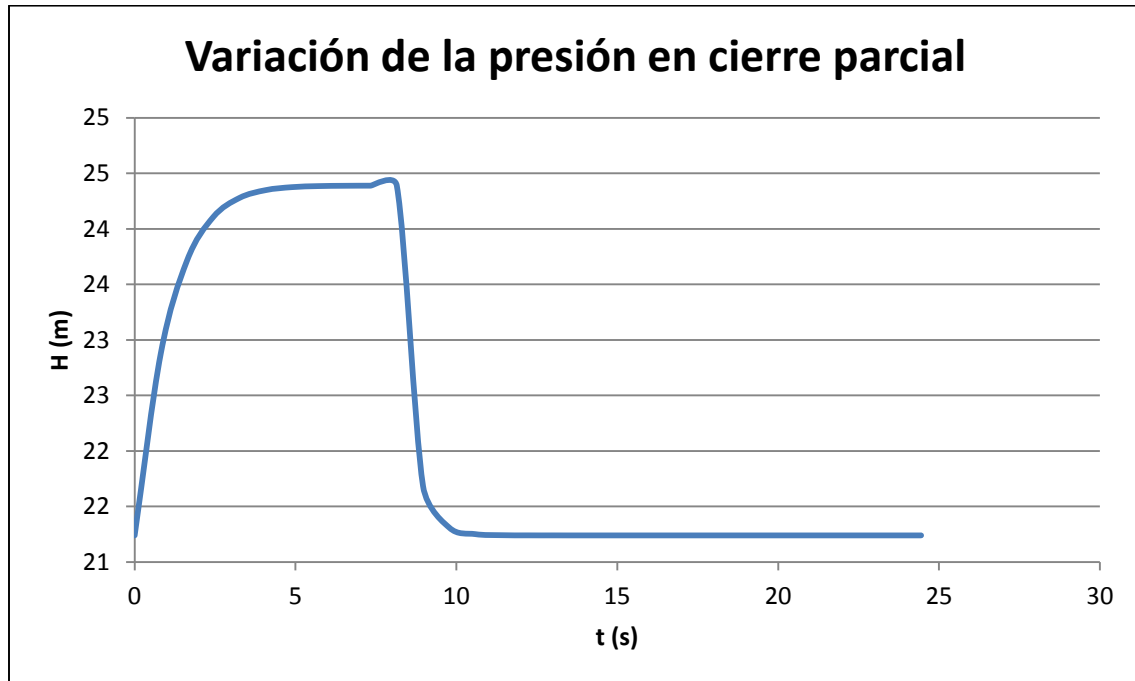


Figura 60 Variación de la carga de presión en un cierre parcial de válvula.

Como se observa en la Figura 60, en el momento de tener un cierre parcial de válvula en 10 s, se tiene un fenómeno similar al cierre total en 10 s, después del segundo 10, la carga dentro de la tubería vuelve a la de operación normal.

La Figura 61 muestra un resumen de las diferentes maniobras analizadas, las cuales son:

- ✓ Cierre de válvula a 30 s
- ✓ Cierre de Válvula a 10 s
- ✓ Cierre parcial

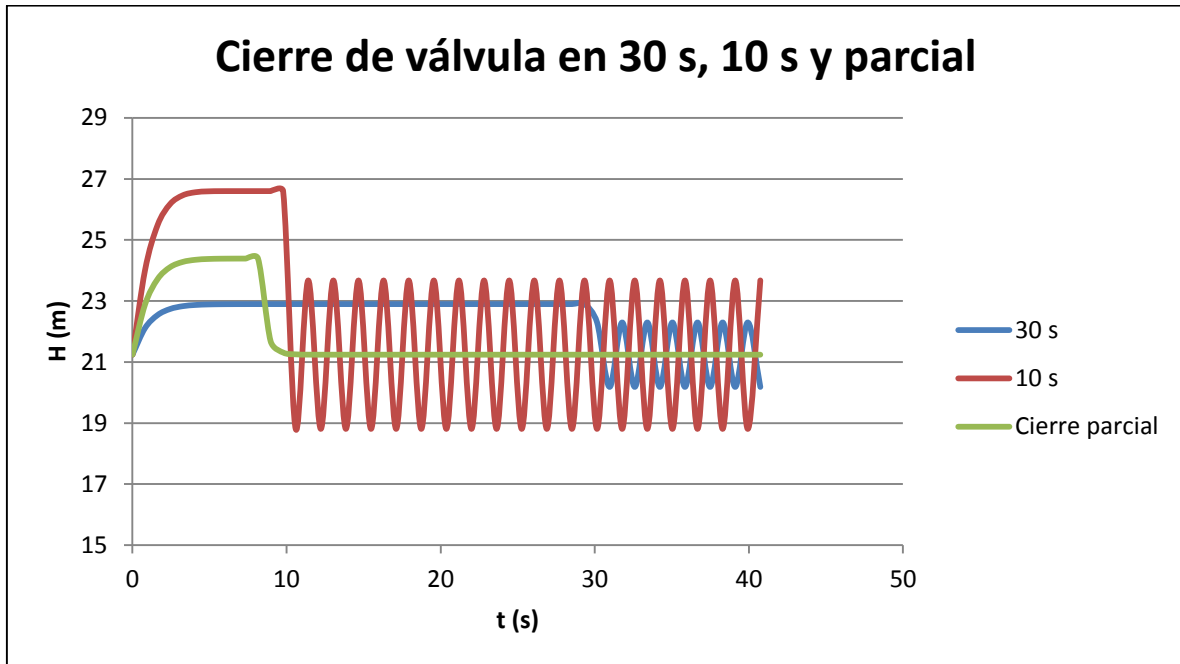


Figura 61 Variación de la carga en cierre de válvula a 30 s, 10 y cierre parcial.

Para el caso de cierre o apertura bruscos se emplea la expresión de Joukowsky.

En el siguiente subcapítulo se determinan las presiones máximas y mínimas que se pueden presentar en la línea de conducción.

5.2 Análisis del transitorio que se produce en la línea de conducción pozo III – tanques de regularización con la ecuación de Joukowsky

En el subcapítulo anterior se determinaron las presiones que pueden ocasionar las diferentes maniobras de una válvula, en este subcapítulo se aplica la teoría de Joukowsky para determinar las máximas y mínimas presiones en un cierre instantáneo de una válvula, también se obtienen parámetros que se usan en el Capítulo 6 en el análisis de transitorios hidráulicos con el programa Trans.

Considerando las características de la línea de conducción, siendo un conducto circular con un diámetro nominal $D = 0.250 \text{ m} = 10''$, material de acero al carbón se realiza el cálculo de la celeridad de la onda de presión, con el espesor $\delta = 0.0127 \text{ m} = \frac{1}{2}''$, obtenido mediante un medidor ultrasónico.

Con la relación D/δ se clasifica el tipo de pared, para este caso es:

$$\frac{D}{\delta} = \frac{0.250m}{0.0127m} = 19.6850$$

En el subcapítulo 2.3 se menciona como se clasifica si un tubo es de pared delgada o gruesa.

Dado que $19.6850 < 25$, el tipo de pared es gruesa, por lo que se trabajará con la ecuación 5.

El coeficiente C se calcula con la ecuación 6.

$$C = \frac{2 \times 0.0127m}{0.250m} (1 + 0.30) + \frac{0.250m(1 - 0.30^2)}{0.250m + 0.0127m} = 0.9980$$

Este coeficiente afecta a la ecuación 5 y el resultado se muestra a continuación, tomando en cuenta los siguientes parámetros.

- $a_0 = 1425 \text{ m/s}$ (Velocidad del sonido en el agua a 20° C)
- $E_{agua} = 2.074 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ (Módulo de elasticidad volumétrica del agua)
- $E_{mat} = 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ (Módulo de elasticidad (módulo de Young) del material del tubo)
- $D = 0.250 \text{ m}$ (Diámetro interior del tubo)
- $\delta = 0.0127 \text{ m}$ (Espesor de la pared del tubo)

$$a = \frac{1425 \text{ m/s}}{\sqrt{1 + \frac{2.074 \times 10^9 \text{ N/m}^2}{200 \times 10^9 \text{ N/m}^2} \times \frac{0.250m}{0.0127m} \times 0.9980}} = 1298.82 \text{ m/s}$$

Es común expresar las sobrepresiones en forma de carga de presión, se puede calcular con la ecuación de Joukowsky, ecuación 7.

$$\Delta H = \pm \frac{a}{g} \Delta V$$

El signo positivo se emplea para el aumento de carga de presión y el negativo para la disminución de la misma.

Durante el transitorio la máxima y mínima carga de presión que se pueden presentar son las siguientes:

$$\frac{P_{\text{máx}}}{\rho g} = H_0 + \Delta H \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\frac{P_{\text{mín}}}{\rho g} = H_0 - \Delta H \quad \text{Ecuación 18}$$

La carga a vencer H_0 se determina como:

$$H_0 = H_2 - H_1$$

Donde:

H_2 Nivel del agua en la descarga

H_1 Nivel dinámico de bombeo

Por lo tanto se tiene que la carga estática es:

$$H_E = 2365.24m - 2249.64m = 115.60m$$

La sobrepresión de Joukowsky constituye la máxima presión que se puede alcanzar.

Teniendo los siguientes datos:

$$a=1298.82 \text{ m/s}$$

$$v=0.888 \text{ m/s}$$

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

$$H_E=115.60 \text{ m}$$

Se hace el cálculo respectivo con las ecuaciones 17 y 18 para identificar la máxima y mínima presión que se presenta.

Con la ecuación 7 se calcula la máxima presión que se puede presentar en la tubería.

$$\Delta H = \pm \frac{1298.82 \text{ m/s}}{9.81 \text{ m/s}^2} 0.888 \text{ m/s} = \pm 117.56 \text{ m}$$

La máxima carga de presión se calcula con la ecuación 17 y resulta:

$$\frac{P_{\text{máx}}}{\rho g} = 117.56 \text{ m} + 115.60 \text{ m} = 233.16 \text{ m}$$

Con la ecuación 18 se calcula la mínima carga de presión, teniendo:

$$\frac{P_{mín}}{\rho g} = 117.56m - 115.60m = 1.96m$$

Con base en dimensiones de la tubería, se procede a calcular la resistencia de presión nominal de la tubería (P_{nom}) o presión máxima de trabajo, como:

$$P_{nom} = \frac{2\delta}{(D + \delta)} \frac{\sigma}{f_{seg}} \quad \text{Ecuación 19}$$

En donde σ es el esfuerzo nominal de trabajo del material y f_{seg} es un factor de seguridad ($1 \leq f_{seg} \leq 2$). Como es común que la presión que se presenta en la conducción se exprese como carga de presión, también la presión nominal puede expresarse como:

$$\frac{P_{nom}}{\rho g} = \frac{2\delta}{(D + \delta)} \frac{\sigma}{f_{seg}} \frac{1}{\rho g} \quad \text{Ecuación 20}$$

La resistencia del tubo no distingue entre las condiciones de flujo permanente y las de transitorio, por lo que la presión en este último, al ser la de mayor magnitud, es la que se emplea para revisar el conducto.

Para evitar riesgo de ruptura se debe cumplir:

$$\frac{P_{máx}}{\rho g} \leq \frac{P_{nom}}{\rho g} \quad \text{Ecuación 21}$$

Y para evitar problemas de colapso, se recomienda que:

$$\frac{P_{mín}}{\rho g} > 0 \quad \text{Ecuación 22}$$

Con base en la ecuación 20 se realiza el cálculo de la P_{nom} y se hará la comparación de los valores obtenidos.

$$\frac{P_{nom}}{\rho g} = \frac{2 \times 0.0127m}{(0.250m + 0.0127m)} \frac{2.2 \times 10^8 Pa}{2} \frac{1}{1000kg/m^3 \times 9.81m/s^2} = 1084.16m$$

Para que no presente riesgo de ruptura y colapso se deben cumplir las ecuaciones 21 y 22 respectivamente.

$$\frac{P_{m\acute{a}x}}{\rho g} \leq \frac{P_{nom}}{\rho g} ; 233.16 \text{ m} \leq 1084.16 \text{ m} \text{ por lo que no hay peligro de ruptura.}$$

Y como $\frac{P_{m\acute{i}n}}{\rho g} > 0$ tampoco se tiene riesgo de colapso.

A continuaci3n se analizar3 el caso m3s desfavorable en la operaci3n del sistema de bombeo, que corresponde al disparo de la bomba, esto es que de una forma accidental o no prevista se interrumpa el funcionamiento del equipo de forma no controlada.

Se sabe que solo se cuenta con un equipo de bombeo, el gasto de conducci3n es de 0.045 m³/s, la magnitud de la onda transitoria negativa generada al disparo de la bomba ser3 de ΔH=-117.56 m y se desplazará con una celeridad $a=1298.82 \text{ m/s}$, la onda negativa se propagará hacia el almacenamiento llegando a éste en un tiempo calculado como:

$$t = \frac{L}{a} = \frac{529.1729\text{m}}{1298.82\text{m/s}} = 0.4074\text{s}$$

La onda negativa incidente ser3 reflejada por el almacenamiento como onda positiva, restituyendo la presi3n correspondiente a la piezom3trica en operaci3n normal, en un tiempo:

$$t = \frac{2L}{a} = \frac{2 \times 529.1729\text{m}}{1298.82\text{m/s}} = 0.8148\text{s}$$

La onda habr3 arribado de regreso a la estaci3n de bombeo. En este momento se estar3 reflejando la onda de presi3n, el despreciar la fricci3n implicar3a que los estados alternados de incremento y decremento de la presi3n se repetir3n indefinidamente, situaci3n que no se presenta en realidad, donde finalmente se llega a la condici3n de gasto nulo, se llega a esta condici3n debido a la p3rdida de energ3a por la fricci3n y disipaci3n de la misma.

Realizar el c3lculo del golpe de ariete para el caso m3s desfavorable tomando en cuenta los dispositivos de control que tiene el sistema en estudio es muy complejo, raz3n por la cual, tomando en cuenta los elementos que integran a la conducci3n, se har3 el uso de un programa especial para el c3lculo del golpe de ariete.

En el Cap3tulo 6 se llevar3 a cabo un an3lisis detallado mediante el uso del programa Trans.

Capítulo VI Uso de programa Trans para el análisis de transitorios

El sistema de simulación de transitorios en tuberías a presión, Trans, fue desarrollado por el grupo de hidromecánica del Instituto de Ingeniería UNAM, específicamente por el Dr. Rafael B. Carmona Paredes y la M. C. Libia G. Carmona Paredes.

Este sistema fue especialmente diseñado para que gran número de líneas de conducción en el país, en las que se presenta el golpe de ariete, tengan la garantía de operar de forma eficiente.

Los resultados de Trans se obtienen resolviendo, con el método de las características, el sistema de ecuaciones hiperbólicas en derivadas parciales que modelan el golpe de ariete, tomando en consideración las condiciones de frontera que imponen los elementos que forman físicamente a la conducción y los eventos que determinan la operación hidráulica del sistema.

Los elementos, estructuras hidráulicas y eventos que se puede simular son los siguientes:

- ✓ Apertura y cierre de válvulas
- ✓ Aportaciones
- ✓ Batería de tubos en paralelo
- ✓ By-pass
- ✓ Cámaras de aire
- ✓ Derivaciones
- ✓ Descarga a carga constante
- ✓ Operación de equipos de bombeo
- ✓ Paro no programado de equipos de bombeo
- ✓ Paro programado de equipos de bombeo
- ✓ Tanques de carga constante
- ✓ Tanques de oscilación
- ✓ Tanques unidireccionales
- ✓ Tuberías
- ✓ Uniones
- ✓ Válvulas aliviadoras de presión
- ✓ Válvulas de admisión y expulsión de aire
- ✓ Válvulas de cierre y apertura controlada
- ✓ Válvulas de retención

Los resultados producto de los cálculos mostrados en el subcapítulo 5.2, se utilizarán como base para la modelación en el software Trans.

Para usar este programa se deben determinar los parámetros que se describirán conforme se procede al análisis.

Dado que el sistema en estudio ya está construido y opera, este análisis se puede clasificar como un problema de “revisión”.

Si fuese un problema clasificado como de “diseño” se tendrían que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Determinación de la carga estática.

Esta se cuantifica a partir del análisis del nivel dinámico de bombeo y el nivel de descarga.

- Diámetro de la tubería de conducción.

Se toma en cuenta el diámetro interior de dicha tubería ya que es el diámetro que está en contacto con el agua y define la geometría de la vena líquida.

- Curva del sistema

Sirve para la selección adecuada del sistema de bombeo para satisfacer las demandas de flujo de un sistema de conducción. Se requiere, además de la comprensión del comportamiento de las bombas, un análisis hidráulico.

$$HB_{SIS} = H_0 + H_{rs} + H_{rd}$$

Donde:

HB_{SIS} Carga total o dinámica que proporciona la bomba

H_0 Carga estática

H_{rs} Pérdida de carga en el tramo de succión (fricción y locales)

H_{rd} Pérdida de carga en el tramo de descarga (fricción y locales)

Con dicha expresión es posible estimar la carga de bombeo.

- Carga de bombeo

Existen dos formas para estimar la carga de bombeo:

La primera mediante el método gráfico, leyendo las curvas características de la bomba. La segunda mediante la expresión de la curva del sistema obtenida en el punto anterior.

- Verificación de bombas adecuadas para el sistema de conducción

Obtenida la carga de bombeo, y la curva del sistema, se grafican y se obtiene el punto de operación.

6.1 Análisis del transitorio durante el disparo de una bomba con el programa Trans

El análisis del sistema de conducción con el programa Trans, tomará en cuenta los dispositivos que existen y las características físicas de la tubería. Por ejemplo cada válvula con la que la conducción cuenta.

El programa Trans permite introducir la información necesaria en un archivo de captura de datos, cada una de las pestañas permite al usuario ingresar datos acerca de la conducción. La Figura 62 muestra una captura de pantalla de la ventana para la recopilación de datos.



Figura 62 Menú principal para captura de datos del programa Trans.

En este archivo ejecutable es donde se cargarán los datos de la línea de conducción, estos datos los podremos observar en la pestaña “Arreglo de la conducción” y en “Tramos”.

Los cálculos hechos en el Capítulo 5 servirán para integrar el archivo de datos que genera este software, donde se ejecutará el análisis y se darán los resultados del comportamiento del sistema durante el disparo de la bomba.

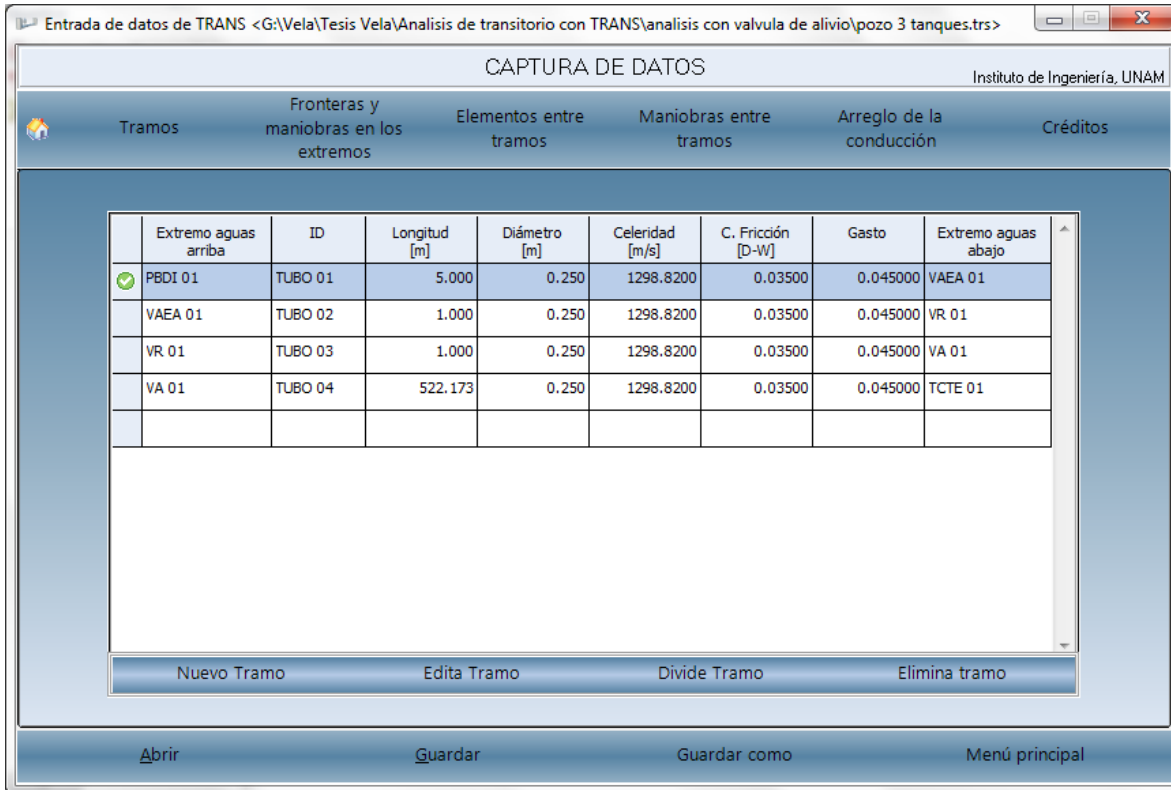


Figura 63 Arreglo de tuberías y dispositivos de control.

Después de insertar los datos se procede a abrir el archivo ejecutable donde se realizará la simulación.

En la Figura 62 se observa el menú principal de Trans, en la Figura 63 se muestra el arreglo de tuberías y dispositivos que existen en la línea de conducción.

Se le dice arreglo de tuberías a cada tramo de tubería que existe entre cada dispositivo de control.

Captura de frontera disparo de equipos de bombeo <Pozo 3 Tanques.tr>

DISPARO DE EQUIPOS DE BOMBEO INICIAL Instituto de Ingeniería, UNAM

PBDI's existentes: PBDI 01 Edicion de PBDI 01

Número de bombas: 1 Tramo aguas abajo: TUBO 01

Instante en que inicia el disparo [s]: 1 Carga en el extremo aguas arriba [msnm]: 2250

Cadenamiento del extremo aguas arriba: 0

Tipo de válvula:

Válvula de control

Válvula de retención

Datos de las válvulas en la descarga:

Tiempo de cierre de las válvulas [s]: 1

Instante en que inicia el cierre [s]: 1

Posición de las válvulas a gasto establecido [°]: 0

Posición de la válvula [°]:
Abierta[0°]
Cerrada[90°]

Coefficiente mínimo de pérdida [s²/m⁵]: 0.15

Coefficientes del polinomio $P(\tau) = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + \dots + a_5\tau^5$

a0 = 4.3402

a1 = -7.0562

a2 = 4.358

Datos bombas

Ángulo máximo de las curvas fh y fb: 270
 $270 \leq \theta \leq 360$

Incremento angular entre puntos: 5
 $1 \leq \Delta\theta \leq 10$

Gasto de diseño [m³/s]: 0.045

Carga de diseño [m]: 120

Velocidad de diseño [rpm]: 3500

Eficiencia máxima: 0.87
 $0 < \eta \leq 1$

Momento de inercia calculado [kg·m²]: 0.3474

$[N_s] = \frac{rpm \cdot \sqrt{m^3/s}}{m^{0.75}}$ Velocidad específica [N_s]: 20.79
(Opcional)

Captura datos curva fh

Graba Inicializa Baja Salir

Figura 64 Recopilación de datos de la bomba.

El caso más desfavorable que el Trans simulará es el disparo de una bomba, los datos que se introducen son del sistema, conforme avanza el análisis el programa solicita mayor cantidad de datos, algunos de estos se desconocen, sin embargo, el programa muestra cómo calcularlos y posteriormente cómo introducirlos.

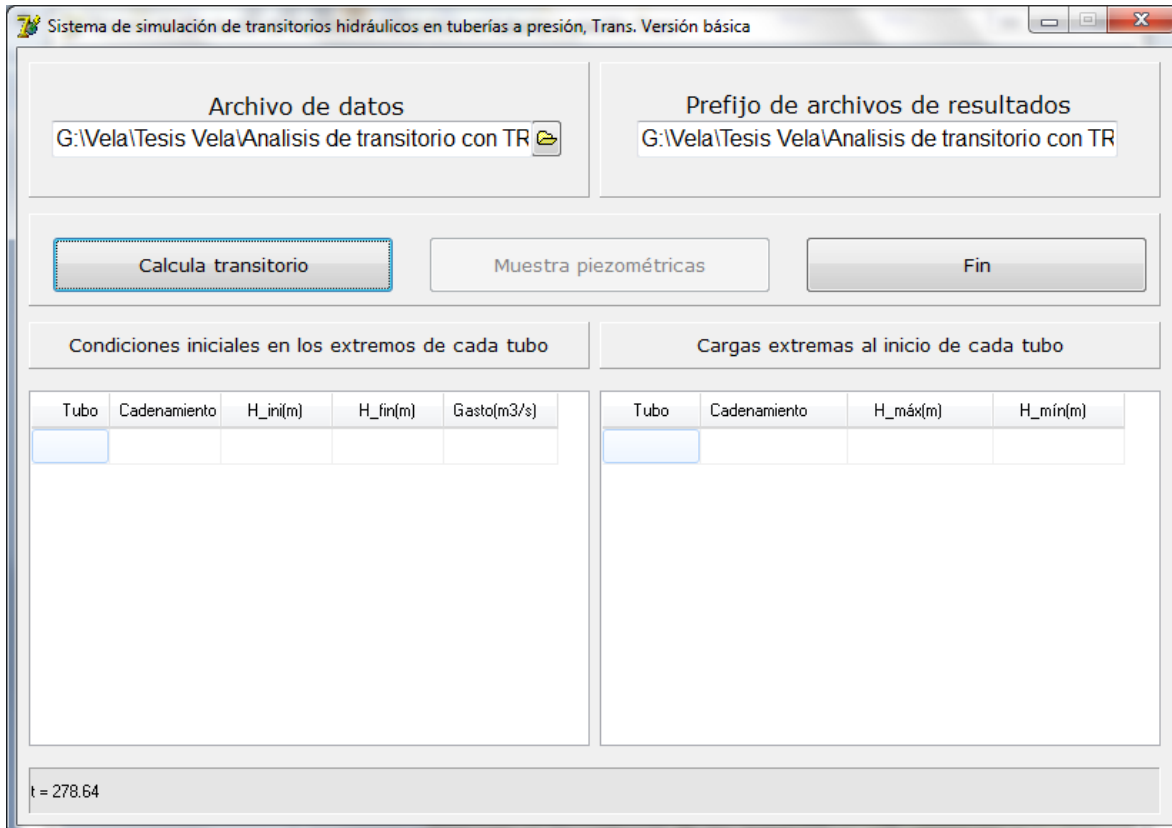


Figura 65 Captura del archivo de datos para su posterior simulación.

El transitorio se simulará en un lapso de 1000 segundos. El tiempo de análisis puede modificarse de forma manual, después de guardar el archivo de datos.

Posterior a la simulación el programa Trans mostrará las envolventes de cargas máximas y mínimas que se generarán.

A continuación se presenta el resultado de simular el transitorio durante un lapso considerable.

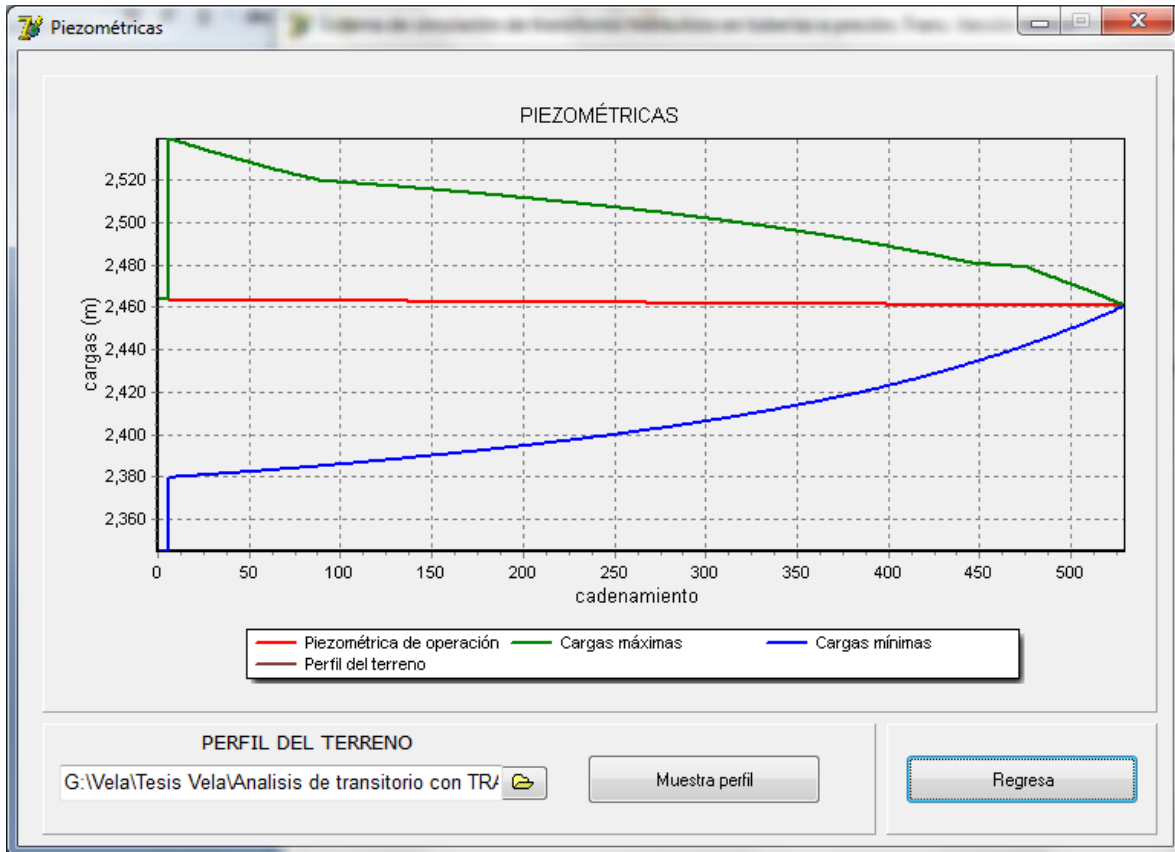


Figura 66 Envolvente de cargas máximas y mínimas después del disparo de la bomba.

El programa produce diversos archivos, el que principalmente interesa es aquel en donde se muestran los datos de las cargas de presión y la línea piezométrica de operación.

Los archivos que genera el programa Trans son los siguientes:

- ✓ Cargas máximas, mínimas y piezométrica en operación.
- ✓ Variación del gasto durante el transitorio.
- ✓ RPM de la bomba después del disparo.
- ✓ Cargas de presión en las válvulas.

El programa ofrece la opción de colocar el perfil del terreno, pudiendo con ello observar con mayor detalle si es que está resuelto el transitorio.

Con base en la teoría del análisis de transitorios la envolvente de cargas mínimas no tiene que estar por debajo del perfil topográfico, y en donde se supone que aproximadamente encuentra el eje de la línea de conducción. La envolvente de cargas máximas no debe superar la carga de presión

nominal de la tubería. Si estas condiciones no se cumplen entonces se dice que el transitorio no está resuelto, así que se tendría que proponer la inclusión en la línea de algún dispositivo que permita amortiguar la presión máxima o mínima que se pueda presentar.

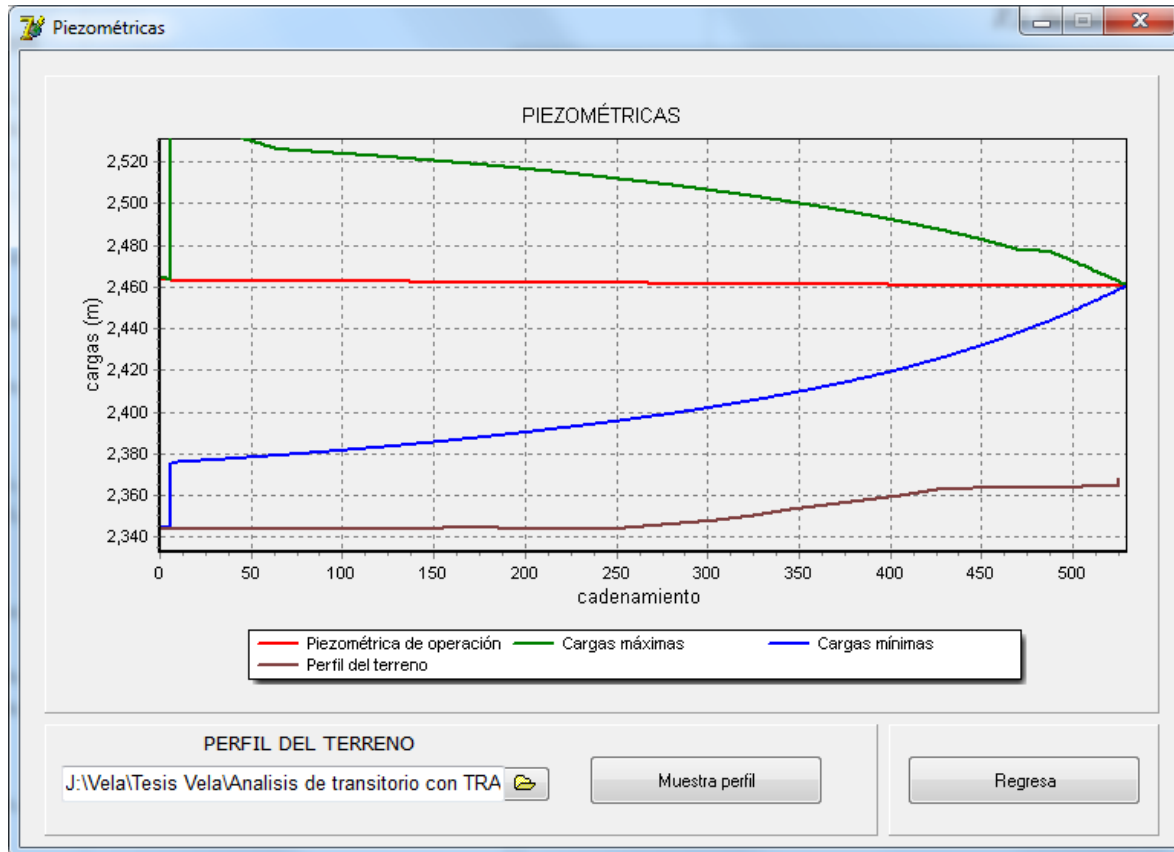


Figura 67 Envoltorio de carga máxima, mínima, piezométrica en operación y perfil topográfico.

Con base en la observación de la Figura 67, se establece que la envoltorio de cargas mínimas sí se encuentra dentro del perfil topográfico de la línea de conducción. Es muy importante que dicha envoltorio pase siempre por arriba del perfil de la conducción, para no tener problemas de depresión en la tubería. La resistencia nominal de la tubería está muy por encima de la envoltorio de cargas máximas así que no habrá riesgo de ruptura. Las cargas máximas y mínimas se encuentran dentro del perfil topográfico y la línea de resistencia, entonces se dice que el transitorio está resuelto.

El programa no brinda la opción de colocar la línea de resistencia nominal, esta se mostrará en una gráfica donde se incluyen las envoltorios y el perfil del terreno, esta información es necesaria para identificar si el transitorio ha quedado resuelto.

Capítulo VII Análisis de resultados

7.1 Resultados con el uso de las ecuaciones diferenciales del golpe de ariete y las ecuaciones de Allievi

En el Capítulo 5 se hicieron iteraciones a diferentes periodos de tiempo en el análisis del cierre de una válvula, asimismo se creó una gráfica para identificar la variación de la carga de presión.

Usando las ecuaciones diferenciales del golpe de ariete y las ecuaciones de Allievi, en el subcapítulo 5.1 se hizo una simulación, particularmente en el caso de una válvula y sus diferentes maniobras. Para tal fin se consideró un cierre de válvula en 30 segundos, este caso es el que se acerca más a la realidad ya que el operador tarda un tiempo de cierre muy aproximado. Para este caso se tiene una carga máxima de presión de 22.8977 m.

Posteriormente se decidió acotar el tiempo de cierre hasta 10 segundos, cuando se cierra la válvula en un tiempo más corto se eleva la carga de presión a 26.5991 m, lo que implica 4 m más que en un cierre de 30 segundos. Con base en estos resultados se concluye que entre más rápido sea el cierre de una válvula más elevada será la carga de presión que se presente dentro de la tubería.

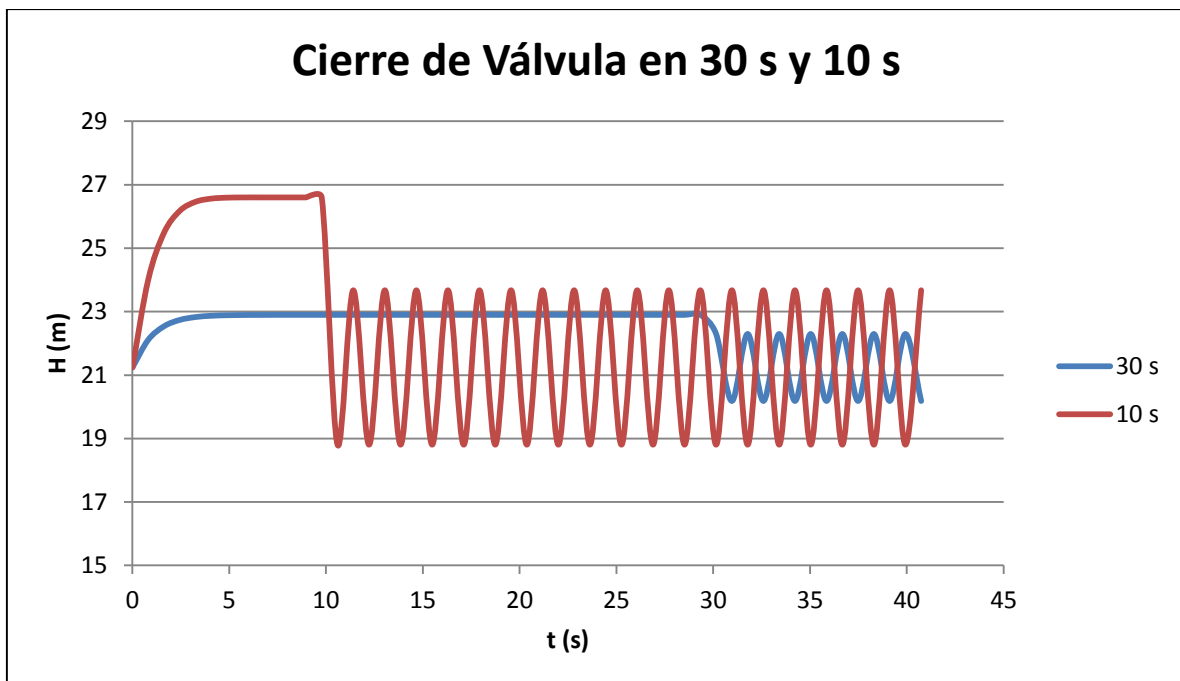


Figura 68 Cierre de válvula en 30 y 10 segundos.

Como se puede ver en la Figura 68, la variación de la carga de presión varía mucho dependiendo el tiempo en que se dé el cierre de la válvula.

También se analizó el cierre parcial de la válvula, se hizo la modelación con un tiempo de cierre parcial de 10 segundos, los resultados obtenidos fueron muy similares a los de un cierre total, ya que existe un instante en el que hay una carga máxima de presión, no es tan grande como la del cierre total, pero en este caso se vuelve a la condición normal de operación. Se tendrán pérdidas de energía por dicho suceso.

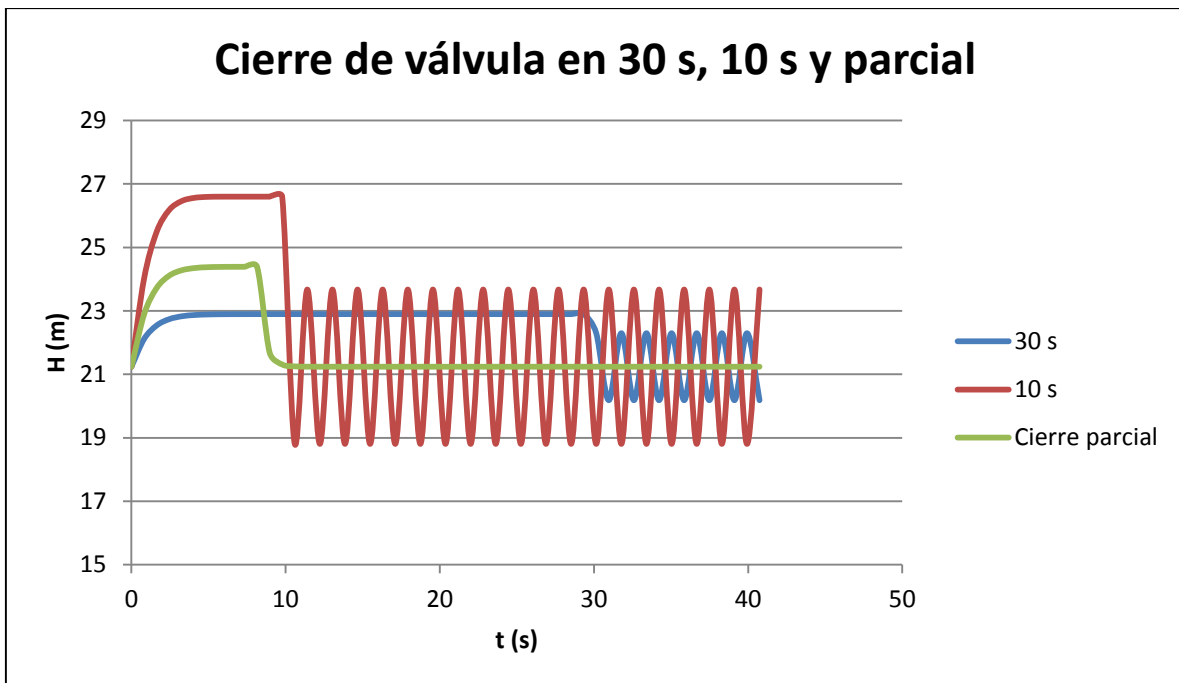


Figura 69 Cierre parcial y total.

El cierre instantáneo de una válvula corresponde al caso más desfavorable en maniobras de válvulas. Este suceso se da por el accionamiento en una válvula de no retorno, la línea de conducción que analizamos cuenta con una válvula de este tipo así que no queda descartado el fenómeno transitorio que se generará.

Para el análisis del fenómeno transitorio que ocurre al cierre de la válvula de no retorno se usó la ecuación de Joukowsky, tomando en cuenta las características de la tubería y siguiendo paso a paso la obtención de la carga máxima y mínima que llegarán a suceder dentro de la conducción.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

$$\frac{P_{\text{máx}}}{\rho g} = 117.56m + 115.60m = 233.16m$$

$$\frac{P_{\text{mín}}}{\rho g} = 117.56m - 115.60m = 1.96m$$

Estos resultados son de gran importancia ya que la carga de presión máxima no debe rebasar la carga nominal soportable por la tubería, ya que tendría efectos negativos en su estructura. El resultado obtenido del cálculo de la carga de presión mínima no debe ser menor a cero, ya que se podría dar un resultado así, aunque sea físicamente imposible, si indica que la presión es muy baja o nula y ello conlleva riesgo de separación de columnas y cavitación en la tubería.

$$\frac{P_{\text{nom}}}{\rho g} = \frac{2 \times 0.0127m}{(0.250m + 0.0127m)} \frac{2.2 \times 10^8 Pa}{2} \frac{1}{1000kg/m^3 \times 9.81m/s^2} = 1084.16m$$

Como se observa en el cálculo anterior la carga de presión nominal es muy grande y dista mucho de la carga de presión máxima generada por el cierre instantáneo de la válvula check. La carga de presión mínima es mayor que cero así que no se supone que existan problemas de depresión en la tubería.

Cabe recordar que las sobrepresiones y depresiones constantes generan en la tubería daños por fatiga, por lo que se hace necesario tomar las medidas adecuadas para evitarlo.

El cierre de una válvula contribuye a que se genere un fenómeno transitorio. Para la línea de conducción en análisis se observa claramente que ninguna de las maniobras excede la capacidad de la tubería para soportar presiones altas.

Ahora bien, para tomar en cuenta todos los accesorios que existen en la línea de conducción que une al pozo III y los tanques de regularización se usó el programa Trans, teniendo un mejor criterio del comportamiento del fenómeno transitorio y sin dejar de considerar accesorios que son de ayuda para la protección de la tubería ante fenómenos transitorios.

En el siguiente subcapítulo se hará un resumen preciso de los resultados del programa Trans, tomando en cuenta los accesorios involucrados.

7.2 Resultados del programa Trans

El programa Trans es una herramienta muy útil, ya que a partir de ingresar datos de la línea de conducción, éste brinda resultados que sirven para tomar decisiones importantes para la ejecución de una línea o el mantenimiento preventivo y correctivo de líneas de conducción que se encuentran ya en operación.

Este programa ayuda a realizar un mejor diseño de una línea de conducción, después de simular el fenómeno transitorio, si este no queda resuelto, el diseñador puede cambiar dimensiones, materiales o elegir la inclusión de dispositivos de control que ofrezcan mayor resistencia ante un fenómeno, tal como el golpe de ariete.

En la figura 70 se muestra un resumen de todas las envolventes involucradas para conocer si el transitorio generará problemas en la línea de conducción.

Recordando que el análisis que se hizo en el programa Trans fue para el caso más desfavorable que puede suceder en la línea de conducción a bombeo, es decir, el disparo de la bomba, o simplemente el apagado no programado.

Se fue detallando paso a paso como se usó el programa, arrojando resultados más próximos a lo que sucede en la realidad, gracias a la simulación que hace el mismo. A continuación se muestra una gráfica construida con base en los resultados obtenidos.

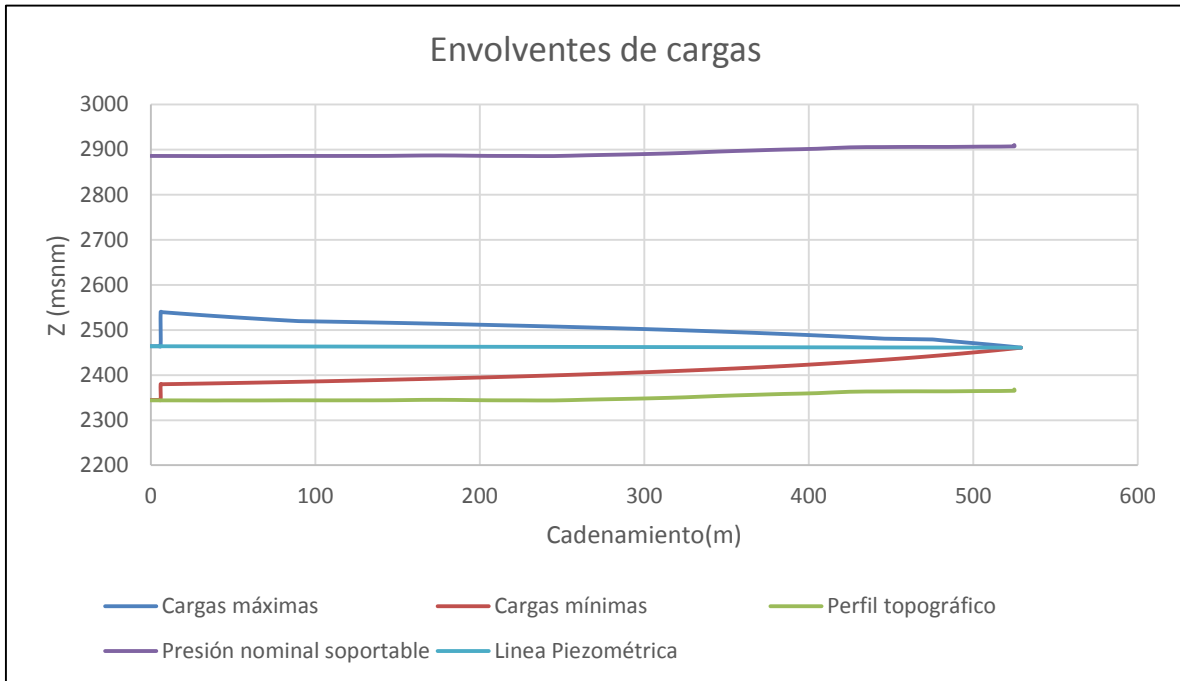


Figura 70 Envolturas de las cargas involucradas para el análisis de transitorios generado por el disparo de la bomba.

Con base en los resultados que se muestran en la Figura 70, se observa que existe una presión máxima muy grande. En el caso de la carga máxima se presenta una carga aproximada de más de 250 m, la línea de resistencia está muy por encima de la carga máxima que se presenta durante el disparo de la bomba, mientras que la mínima no está por debajo de la línea del perfil topográfico.

Como se describe en el manual de dicho programa, mientras las líneas de carga máxima y mínima se encuentren entre la línea del perfil topográfico y la línea de resistencia nominal de la tubería, no se presentarán problemas físicos en la tubería.

En la figura 67 se muestran los resultados del programa Trans. Dado que el programa solo permite adicionar la línea del perfil topográfico, se usan los datos obtenidos para crear una gráfica en el programa Excel en la que se presenten todas las líneas involucradas para el análisis de los resultados.

En la actualidad se tienen desarrollados métodos matemáticos especiales que permiten modelar los transitorios y obtener las presiones máximas y mínimas que se producen en una conducción con y sin medios de control. Debido a que la cantidad de cálculos que se requieren para obtener la solución numérica es muy grande, la realización de este proceso se lleva a cabo hoy en día mediante el uso de programas de cómputo especiales.

En el caso del programa Trans, usa un método matemático basado en método de las características, por tal motivo, el programa tiene que ser alimentado con los resultados obtenidos del análisis previo del flujo permanente, en particular, con el caudal que circula por la tubería y las presiones en cada punto de la conducción (carga piezométrica).

En México es común el uso de este programa ya que los resultados del mismo son confiables. Es una herramienta útil para el diseño de líneas de conducción a bombeo, ya que se puede elegir la tubería y el uso de accesorio tal que no existan riesgos durante la operación de la conducción.

7.3 Comparativa con la resistencia de los elementos que integran a la línea de conducción

Una vez expuestos los resultados obtenidos con las ecuaciones para el análisis del golpe de ariete, ecuaciones de Allievi y uso del programa Trans, se presenta una comparativa de la resistencia que ofrece la línea de conducción. Después de hacer el análisis numérico, se procede a confirmar el estado y capacidad de la línea de conducción.

La DGOyC de la UNAM lleva a cabo el mantenimiento de la línea de conducción que une el pozo III a los tanques de regularización, lo que ayuda a que el sistema se encuentre en condiciones óptimas de operación. Por ello los accesorios con los que cuenta tienen un funcionamiento adecuado, para el momento en que se presenta un fenómeno transitorio. En el capítulo 4 se describe cada elemento con los que cuenta dicha línea de conducción, sin embargo, a continuación se enlistan los elementos y la función cuando ocurre el disparo de la bomba.

La línea de conducción tiene los siguientes dispositivos de protección ante fenómenos transitorios:

- ✓ Válvula de admisión de aire.
- ✓ Válvula de no retorno.
- ✓ Válvula aliviadora de sobrepresión.

Estas válvulas se encuentran en el orden en que se escribieron, en el momento en que se presenta el fenómeno transitorio más desfavorable para la tubería actúan de la siguiente manera:

Durante el paro de la bomba se permite la entrada de aire para que no se generen presiones bajas. La válvula tiene un correcto funcionamiento y la posición de la misma es adecuada ya que le sigue la válvula de no retorno.

La válvula de no retorno tiene la función de retener el agua y evitar que la columna de agua que se encuentra en la tubería retorne hacia la bomba, lo que podría generar daños, o bien que el equipo electromecánico sufra un sobrecalentamiento al operar como una turbina, esto es que el impulsor gire en sentido contrario al normal en operación.

La válvula aliviadora de presión se coloca después de la válvula de no retorno, entra en funcionamiento cuando sucede un fenómeno transitorio, comienza a expulsar pequeñas cantidades de agua para aliviar o liberar la presión que se está generando dentro de la tubería, a medida que la magnitud del fenómeno se va reduciendo, también se reduce el volumen de agua expulsado, hasta que se estabiliza el sistema.

Durante la puesta en marcha del sistema la línea de conducción necesita ser llenada de agua, en ocasiones tiene que ser vaciada y llenada nuevamente. En cada arranque o paro de bombas y en cada apertura o cierre de válvulas, se genera un régimen de flujo transitorio, en el que varían de forma importante los parámetros hidráulicos (velocidad y presión). El paro de las bombas puede ser programado y controlado cuando se realiza por el operador de la planta de bombeo, o accidental y no controlado, cuando se interrumpe el suministro de energía eléctrica al equipo de bombeo por una falla en el sistema de suministro, lo cual puede resultar muy peligroso para la conducción si no se prevén los efectos que dichos eventos pueden ocasionar.

Capítulo VIII Conclusiones

Como resultado de la revisión de la trayectoria, geometría, materiales y operación de la línea de conducción que comienza en el pozo III y termina en los tanques de regularización, y revisión de los resultados obtenidos del análisis de fenómenos transitorios, se concluye que sí existe concordancia entre la resistencia del material y las presiones que se presentan dentro de la línea de conducción, asimismo se determinó la eficiencia de la línea de conducción ante un fenómeno transitorio de gran magnitud, como lo es el disparo de la bomba.

Resultó indispensable realizar el análisis de los transitorios hidráulicos que pueden presentarse en el caso de una maniobra de válvula de control y disparo de la bomba, por los cuales puede provocarse un fenómeno transitorio, asimismo se requirió definir si los dispositivos de alivio tenían una función correcta. Después de dicho análisis se ha determinado que dichos dispositivos tienen un funcionamiento óptimo al presentarse un fenómeno transitorio de magnitud grande. Por lo que no existe algún riesgo derivado de los efectos de un transitorio, en principio por el golpe de ariete. Por el momento no se requiere tomar medidas para proteger a la conducción ya que también cuenta con una tubería que puede soportar grandes presiones.

Todos los dispositivos de protección ante fenómenos transitorios instalados en la conducción tienen un funcionamiento adecuado, ya que al observar los resultados del análisis realizado con el programa Trans, se muestra que mitigan las presiones.

Si se hubiera usado este programa cuando se diseñó la línea de conducción, probablemente se hubiera usado otro material o diferente espesor.

La configuración de la línea de conducción en estudio está sobrada en cuanto a la resistencia que ofrece, esto es que la tubería que conecta el pozo III hacia los tanques de regularización tiene una resistencia excesiva, inclusive ante fenómenos transitorios.

La línea de conducción que une al pozo III con los tanques de regularización de Ciudad Universitaria soportará transitorios de gran magnitud y tiene un funcionamiento óptimo.

Bibliografía

1. Anuario estadístico de la UNAM. Dirección General de Planeación. UNAM: 2014
2. Cafaggi Félix, Amalia Adriana. (2011). Sistemas de bombeo. México, D.F.: UNAM, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Hidráulica: Trillas.
3. Cervantes Gutiérrez, Virginia, et. "El agua en la UNAM". Facultad de Ciencias. 2007.
4. Diagnóstico del Sistema de Agua Potable de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México. PUMAGUA. XX Congreso Nacional de Hidráulica. Toluca. México. Octubre 2008.
5. Dispositivos para el control de transitorios - J. Izquierdo Sebastián, E. Cabrera Marcet, P. L. Iglesias.
6. El gran reto del agua en la ciudad de México, México D.F., Octubre de 2012
7. Estudio Integral de Sistemas de Bombeo de Agua Potable Municipal, México, D.F., Octubre de 2011. González Villarreal Fernando Jorge, Val Segura Rafael, Rocha Guzmán José Daniel.
8. http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/deschamps_g_e/capitulo3.pdf
9. <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujoentuberias/golpedeariete/golpedeariete.html>
10. <http://ingenieriareal.com/golpe-de-ariete/>
11. http://water.epa.gov/aboutow/owm/upload/2004_07_07_septics_cs-99-062.pdf
12. <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=62&n3=62>
13. <http://www.ecologiahoy.com/aguas-subterranas>
14. http://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_5._infiltracion_pluvial.pdf
15. Rocha Guzmán, José Daniel. Diagnóstico y sectorización del sistema de agua potable de ciudad universitaria de la UNAM. PUMAGUA. Tesis que para obtener el título de ingeniero. Director de tesis: Dr. Fernando J. González Villarreal. UNAM. 2010.
16. Informe PUMAGUA. 2008.
17. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2007. **Conducción.**
18. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2007. **Diseño, construcción, operación y mantenimiento de pozos de observación para el control de la calidad de los acuíferos.**

-
19. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2007. **Diseño, construcción y operación de tanques de regulación para abastecimiento de agua potable.**
 20. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2001. **Fenómenos transitorios en líneas de conducción.**
 21. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2007. **Fuentes de Abastecimiento.**
 22. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2007. **Guía de diseño de redes de agua potable con uno o más tanques y fuentes de abastecimiento.**
 23. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2002. **Obras de toma.**
 24. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2007. **Operación de equipo electromecánico en plantas de bombeo para agua potable y residual.**
 25. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2007. **Perforación de pozos.**
 26. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. CONAGUA. 2007. **Redes de Distribución.**
 27. Manual de Incremento de Eficiencia Física. **Hidráulica y Energética en sistemas de Agua Potable.** Versión Preliminar. CONAGUA. Septiembre de 2009.
 28. Manual de prácticas, Taller de abastecimiento de agua potable y alcantarillado, 2014-2.
 29. Mataix, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, México. Harper & Row Publishers Inc., 1978
 30. Sotelo Ávila, Gilberto. Hidráulica General, Vol. I, Fundamentos, México Limusa, 1977.
 31. TWYMAN J. (2009), "Golpe de Ariete en Redes de Tuberías", TWYMAN Ingenieros Consultores.