



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL– HIDRÁULICA**

**ANÁLISIS TRANSITORIO POR ARRANQUE DE EQUIPOS DE BOMBEO EN UNA RED DE  
POZOS**

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**ALAN ERNESTO SAÑUDO VALENZUELA**

**TUTOR (ES) PRINCIPAL(ES)**  
**DR. RAFAEL BERNARDO CARMONA PAREDES, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM**

**CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Oscar Arturo Fuentes Mariles

Secretario: Dr. Jesús Gracia Sánchez

Vocal: Dr. Rafael Bernardo Carmona Paredes

1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Moisés Berezowsky Verduzco

2<sup>do.</sup> Suplente: Dr. Oscar Pozos Estrada

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad Universitaria, Ciudad de México

**TUTOR DE TESIS:**

DR. RAFAEL BERNARDO CARMONA PAREDES

-----

**FIRMA**



# AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por otorgarme la siempre puntual manutención que, durante dos años, impulsó mis estudios. Sin este apoyo, tal vez concluir éstos, habría sido una meta inalcanzable.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrir sus puertas a mi persona y facilitar sus instalaciones para los estudiantes que, como yo, emigran de distintos rincones de la Republica y forman parte de la Máxima Casa de Estudios.

A todos mis Maestros, que día a día, se entregan a la docencia y nos permiten un aprendizaje de calidad como estudiantes.

Al Dr. Rafael Carmona, por creer en mí, por sus enseñanzas, por su honestidad y por su apoyo.

A mi madre, Elsa, que a pesar de las batallas que la vida le ha puesto en el camino, me ha enseñado que la vida es bondadosa y que nunca hay que rendirse; Por su total entrega y cariño desde que llegué al mundo y hasta la fecha. Sin ella estas metas no habrían sido tangibles.

A mi esposa, que, desde el primer instante, nunca ha dejado de creer en mis ideas. Su apoyo incondicional a lo largo de este viaje, ha sido indispensable. Gracias por tu paciencia y gracias por haberme acompañado todo este tiempo. Este trabajo es tuyo, Karla.

A mi pequeña, pero gran familia, quienes han seguido mis pasos desde que los aprendí a dar y quienes me han ayudado en cada tropiezo, por más grande o pequeño que haya sido. Tía, Jesús, Primos, Naná, y Tíos.

A mi Padre, QEPD.



## RESUMEN

En este trabajo se lleva a cabo el análisis de fenómenos transitorios en una red de pozos, dichos fenómenos pueden ser ocasionados por el paro súbito de equipos de bombeo y posteriormente por el arranque de éstos, ambos escenarios serán estudiados dentro del marco de esta investigación. Cabe mencionar que también existen otras maniobras en los sistemas hidráulicos que provocan fenómenos transitorios como el cierre o apertura de válvulas de control, cambios de régimen de bombeo a gravedad, inclusión de aire en los sistemas, entre otros.

Se espera que, como antesala a un arranque de equipos de bombeo, podrá presentarse un paro súbito en dichos equipos, el cual dará lugar a un transitorio con variaciones muy desfavorables para el sistema donde, después de revisar con diversos dispositivos de protección contra transitorios, se han propuesto cámaras de aire como medida de mitigación.

En ese sentido, la presencia de las cámaras de aire no deberá interferir o perturbar la maniobra de arranque de los pozos de la red. En esta tesis se presentarán resultados de ambos escenarios mostrando el comportamiento del sistema ante la secuencia de arranque de pozos propuesta como metodología de análisis para futuros proyectos de esta índole.

Para desarrollar este trabajo se utilizó el sistema de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión, *Trans*, desarrollado en el Grupo de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIUNAM). En 1983 se inició el desarrollo de *Trans*, desde entonces la capacidad de simulación ha aumentado conforme a las necesidades de análisis en los diferentes acueductos del país derivado de esto, se han obtenido diferentes versiones hasta llegar a la más reciente.

## INDICE GENERAL

Resumen.....	3
1. Planteamiento del Problema .....	14
2. Conducciones.....	18
3. Condiciones en una Sistema Hidráulico .....	19
3.1 Flujo Permanente .....	19
3.1.1 Ecuación de Continuidad .....	20
3.1.2 Ecuación de la Energía.....	20
3.2 Flujo No Permanente o Transitorio.....	22
3.2.1 Breve Historia del Flujo Transitorio .....	23
3.2.2 Ecuación de Joukowsky.....	24
3.2.3 Conservación de la Masa .....	24
3.2.4 Ecuación de la Continuidad para un Conducto.....	24
3.2.5 Ecuación Dinámica para un Conducto.....	25
3.3 Teoría de la Columna Elástica .....	27
3.3.1 Ecuación de Continuidad .....	28
3.3.3 Ecuación Dinámica .....	29
4. Dispositivo para control de transitorios .....	30
4.1 Cámaras de Aire.....	30
4.1.1 Ventajas y Desventajas .....	32
4.1.2 Ecuaciones .....	32
5. Métodos de solución .....	35
5.1 Método de las características .....	35
5.2 Criterio de Courant .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
6. Trans .....	37
7. Desarrollo.....	43
7.1 Selección de Equipos de Bombeo.....	46
7.1.1 Curva Característica de una Bomba Centrífuga.....	46
7.1.2 Altura Neta Positiva de Succión Disponible (NPSHd).....	47
7.1.3 Altura Neta Positiva de Succión Requerida (NPSHr).....	48
7.1.4 Altura Máxima de Succión (HsMax).....	48

7.1.5 Momento de Inercia de las Bombas.....	48
7.1.6 Velocidad Especifica .....	49
7.2 Curvas Carga-Gasto para Cada Equipo de Bombeo .....	51
7.3 Análisis del Paro Súbito Simultáneo del Sistema.....	57
7.3.1 Dispositivos Propuestos.....	58
.....	
7.4 Análisis del Arranque de los Equipos de Bombeo.....	70
8. Conclusiones.....	82
9. Bibliografía .....	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Zona de Estudio.....	15
Figura 2. Esquema de la red de Pozos Xicuco.....	16
Figura 3. Esquema de una línea de conducción a gravedad. ....	18
Figura 4. Esquema de una línea de conducción por bombeo.....	19
Figura 5. Esquema de una línea de conducción combinada. ....	19
Figura 6. Carga dinámica del sistema cuando la descarga se efectúa en condiciones atmosféricas. .....	21
Figura 7. Esquema del arreglo de un equipo de bombeo vertical en pozo profundo.....	21
Figura 8. Volumen elemental finito.....	25
Figura 9. Fuerzas que actúan dentro de una línea de conducción.....	26
Figura 10. Cámara de Aire.....	31
Figura 11. Variables para el cálculo de transitorios con cámara de aire.....	33
Figura 12. Funcionamiento de una cámara de aire ante la caída de presión.....	34
Figura 13. Malla de Cálculo empleada en la aplicación del Método de las Características. ....	36
Figura 14. Toma de decisiones al momento de analizar transitorios.....	38
Figura 15. Celeridades de onda en tuberías en relación al material y el espesor de pared. ....	39
Figura 16. Pantalla de Inicio de Trans. ....	40
Figura 18. Pantalla de Captura de datos para paro súbito de equipos de bombeo en Trans. ....	42
Figura 19. Pantalla de captura de datos para arranque de equipos de bombeo en Trans.....	42
Figura 20. Pantalla de captura de datos para cámara de aire en Trans. ....	43
Figura 21. Gradiente hidráulico a gasto establecido del Pozo 40 a la descarga en el tanque Xicuco. .....	46

Figura 22. Curva característica para bomba centrífuga aislada. ....	47
Figura 22. Envolventes de presiones máximas y mínimas sin dispositivos de control. ....	58
Figura 23. Ubicación de cámaras de aire en la red. ....	60
Figura 24. Envolventes de presiones máximas y mínimas del transitorio controlado del pozo 40 al tanque de entrega. ....	65
Figura 25. Envolventes de presiones máximas y mínimas del transitorio controlado del pozo 41 al tanque de entrega. ....	65
Figura 26. Envolventes de presiones máximas y mínimas del transitorio controlado del pozo 19j al tanque de entrega. ....	66
Figura 27. Variación de presiones a la descarga del pozo 40 ante el paro de equipos de bombeo. ....	66
Figura 28. Variación de presiones a la descarga del pozo 41 ante el paro de equipos de bombeo. ....	67
Figura 29. Variación de presión a la descarga del pozo 26 ante el paro de equipos de bombeo..	67
Figura 30. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 40 ante el paro de equipos de bombeo.....	68
Figura 31. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 39 ante el paro de equipos de bombeo.....	68
Figura 32. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 19 ante el paro de equipos de bombeo.....	68
Figura 33. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 17 ante el paro de equipos de bombeo.....	69
Figura 34. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 153 ante el paro de equipos de bombeo.....	69
Figura 35. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 26 ante el paro de equipos de bombeo.....	69
Figura 36. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 22 ante el paro de equipos de bombeo.....	70

Figura 37. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 23 ante el paro de equipos de bombeo.....	70
Figura 38. Curva tipo, Carga –Gasto. ....	72
Figura 23. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 27. ....	73
Figura 25. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 36. ....	73
Figura 26. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22. ....	74
Figura 27. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22. ....	74
Figura 28. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22. ....	75
Figura 29. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22. ....	75
Figura 30. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22. ....	76
Figura 31. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22. ....	76
Figura 32. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22. ....	77
Figura 33. Puntos de observación de presión.....	78
Figura 34. Presiones en el Punto de Observación 1.....	79
Figura 35. Presiones en el Punto de Observación 2.....	79
Figura 36. Presiones en el Punto de Observación 3.....	80
Figura 37. Presiones en el Punto de Observación 4.....	80

Figura 38. Gasto con respecto al tiempo al arranque secuencial de los equipos de bombeo en la red. .... 81

## 1. Planteamiento del Problema

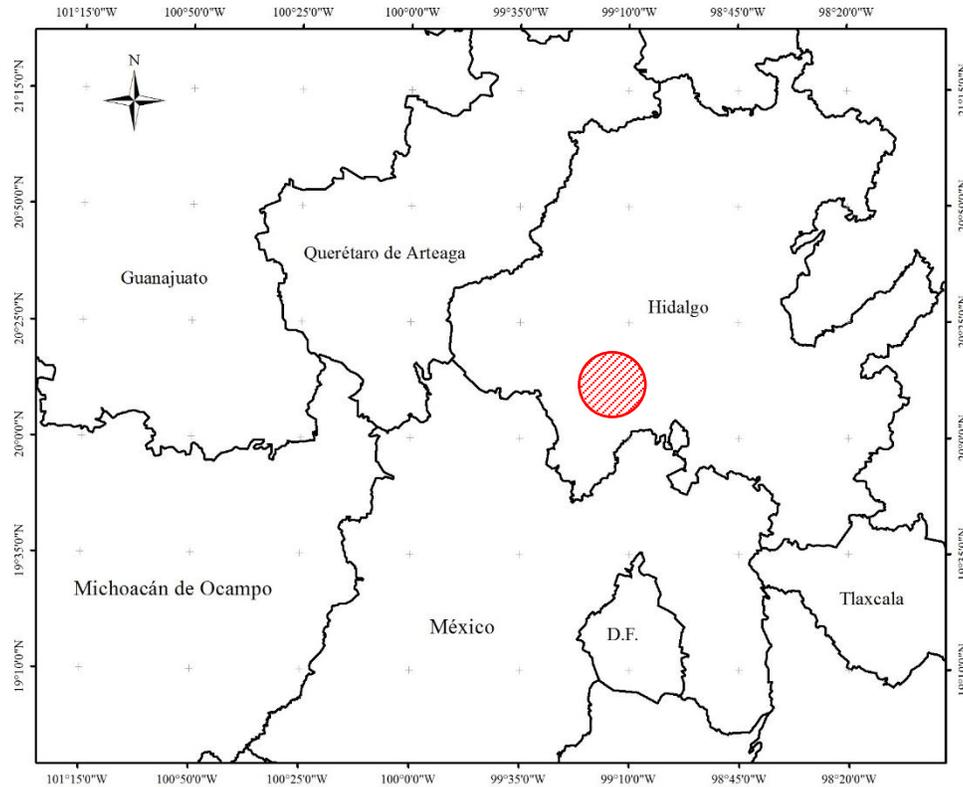
Para conocer el funcionamiento integral de una red de pozos es necesario identificar y analizar diversos escenarios: La operación a gasto establecido, el paro súbito de los equipos de bombeo y el arranque de los equipos posterior al paro. En estos dos últimos escenarios se presentan fenómenos de variación de presión conocidos como transitorios. El estado transitorio en un sistema se genera por el cambio en las condiciones de operación. Pueden ser ocasionados por una mala maniobra o simplemente por la falla en el sistema de alimentación eléctrico, apertura o cierre de válvulas, vaciado o llenado de tuberías, etc. En muchos sistemas es necesario incorporar dispositivos de control o protección adecuados para evitar que las variaciones de presión producidas por los cambios en las condiciones de flujo puedan dañar por colapso o sobrepresión a las tuberías, bombas y otros dispositivos que forman parte de los sistemas de bombeo.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una metodología tal que, en proyectos subsecuentes se pueda determinar un criterio de arranque de pozos en una red con base en las recomendaciones dadas a partir del análisis de sensibilidad de los resultados obtenidos. Para la definición del sistema de control de transitorios de la red de pozos que aquí se estudió, se tomó como condición más desfavorable el paro súbito de los equipos de bombeo, y se han propuesto cámaras de aire para la mitigación de este fenómeno. La secuencia de arranque de los pozos debe tomar en cuenta la presencia de las cámaras para evitar presiones elevadas por sobre-compresión del aire en su interior.

El sitio de estudio tomado como base para el desarrollo de esta tesis se encuentra dentro del estado de Hidalgo, precisamente en una de las zonas agrícolas más grandes del país, denominada valle del Mezquital. Geográficamente el valle del Mezquital es una zona con forma de triángulo cuyos vértices son Tula, al suroeste; Actopan, al este; e Ixmiquilpan, al norte. Está comprendido entre los 20° 11' y los 20° 41' de latitud norte y los 98° 50' y los 99° 20' de longitud oeste.

La ciudad de México y el valle del Mezquital han estado comunicados desde la construcción del Gran Canal de Desagüe que data de fines del siglo antepasado, puesto en operación en 1900 para desalojar las aguas pluviales hacia la zona del Mezquital, dando lugar a un crecimiento agrícola acelerado por el reúso que se la ha dado a las aguas residuales formando en 1904 el distrito de riego 03 de Tula y que transformó las áreas de cultivo de temporal en áreas de riego permanentes. La introducción propiamente del riego se inicia a finales de la década de los treinta con el inicio de la operación del sistema Taxhimay- Requena, lo cual fue un factor clave para la movilización de la población en los alrededores.

Actualmente el valle del Mezquital tiene dentro de sus límites los siguientes municipios: Actopan, Ajacuba, Alfajayucan, El Arenal, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Cardonal, Francisco I. Madero, Jacala, Mixquiahuala, Tlahuelilpan, Tlaxcoapan y Tula de Allende



*Figura 1. Localización de la Zona de Estudio.*

La red a analizar está formada por 16 pozos interconectados mediante sub-ramales que llegan a un ramal principal, cada pozo aporta un gasto de  $0.0448 \text{ m}^3/\text{s}$  descargando un gasto total de  $0.7168 \text{ m}^3/\text{s}$  al tanque de sumergencia Xicuco que también tiene como función la regulación del bombeo, con un volumen de  $5,000 \text{ m}^3$  que serían utilizados para el abastecimiento durante una hora en caso de alguna falla en el sistema de pozos Xicuco. El aprovechamiento completo del agua del acuífero del Valle del Mezquital se propone con 143 pozos, distribuidos en cuatro redes principales de bombeo.

El proyecto contempla rebombar agua desde esta zona hasta la ZMVM mediante un acueducto con entrega en el tanque Chiconautla ubicado en la cota  $2400.00 \text{ m.s.n.m.}$ , elevación suficiente para cubrir con suficiente presión la zona a abastecer. Actualmente existe una gran problemática de abastecimiento de agua potable en esta zona, por lo que el desarrollo integral y culminación de este proyecto es de suma importancia para la comunidad que carece del líquido vital. En la figura 2 se presenta el esquema de la red de pozos y la localización del tanque de sumergencia Xicuco.

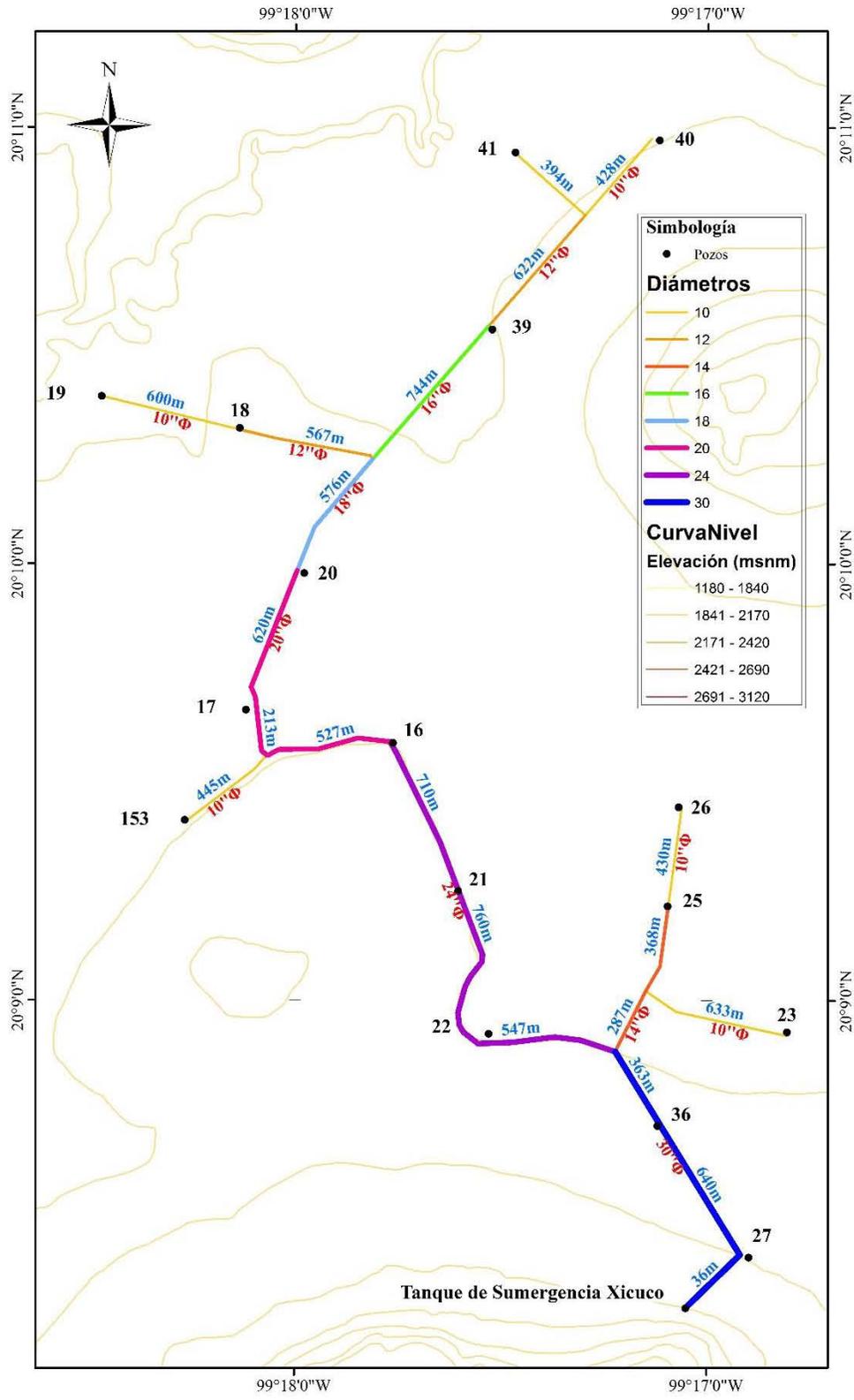


Figura 2. Esquema de la red de Pozos Xicuco.

En la tabla 1 se muestran las coordenadas de localización UTM de cada pozo, así como la del tanque de sumergencia Xicuco.

<b>Estructura</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Pozo 16	469065.00	2229200.00
Pozo 17	468444.00	2229340.00
Pozo 18	468418.00	2230530.00
Pozo 19	467835.00	2230660.00
Pozo 20	468690.00	2229910.00
Pozo 21	469340.00	2228570.00
Pozo 22	469469.00	2227970.00
Pozo 23	470729.00	2227970.00
Pozo 25	470225.00	2228510.00
Pozo 26	470272.00	2228920.00
Pozo 27	470567.00	2227020.00
Pozo 36	470182.00	2227580.00
Pozo 39	469485.00	2230940.00
Pozo 40	470192.00	2231740.00
Pozo 41	469583.00	2231690.00
Pozo 153	468185.00	2228870.00
T.S. Xicuco	470300.00	2226810.00

*Tabla 1. Coordenadas de localización UTM de Pozos en la red.*

En el distrito de riego 03 de Tula, Hidalgo, existe actualmente un volumen de 914.11 Mm<sup>3</sup>/año para un área de 50,781.00 has. Esto se encuentra registrado en datos de CONAGUA y en el Diario Oficial de la Federación dentro de la publicación del año 2013. Dentro de este distrito se encuentran los acuíferos del Mezquital y Actopan teniendo cada uno de ellos una recarga de 515.00 Mm<sup>3</sup>/año de acuerdo a la publicación en el DOF-2013, de los cuales se drenan 293 y 90 Mm<sup>3</sup>/año respectivamente hacia los ríos del Tula y Actopan.

El agua que se infiltra de excedentes de riego, canales y lluvia, constituyen las principales entradas de agua al acuífero, mientras que las salidas son extracciones mediante pozos, manantiales, drenes y descargas al río Tula, por lo tanto se tiene un excedente o una recarga de 222 Mm<sup>3</sup>/año.

$$\Delta S = E - S \quad \dots (1.1)$$

En donde:

- $\Delta S$  es el almacenamiento neto en el acuífero.
- E son las entradas de agua subterránea.
- S son las salidas de agua subterránea.

Entonces:

$$\Delta S = 515 \text{ Mm}^3/\text{año} - 293 \text{ Mm}^3/\text{año} = 222 \text{ Mm}^3/\text{año}.$$

De estos 222.00 Mm<sup>3</sup>/año solamente se tiene un volumen concesionado de 176.00 Mm<sup>3</sup>/año con base en la publicación del DOF-2013. Por lo que la extracción disponible es de 5.64 m<sup>3</sup>/s en el acuífero del Mezquital y para este caso solamente se contempla una extracción total de 4.80 m<sup>3</sup>/s dando un volumen de 151.37 Mm<sup>3</sup>/año.

Dicho esto, la disponibilidad de agua subterránea posterior a esta extracción será de 24.63 Mm<sup>3</sup>/año. Se espera que, con esta propuesta se ayude a mitigar la sobreexplotación de los acuíferos de la Zona Metropolitana del Valle de México y, con ello, los problemas de sobreexplotación, hundimientos o abatimientos en la zona.

## 2. Conducciones

Una línea de conducción es toda aquella obra hidráulica destinada al transporte de agua entre dos puntos. Ésta incluye tanto el medio físico (equipos de bombeo, tuberías, tanques de almacenamiento y demás), como todas las demás obras adicionales necesarias para lograr un funcionamiento adecuado de la instalación.

Existen tres tipos de líneas de conducción: Por bombeo, por gravedad y combinadas.

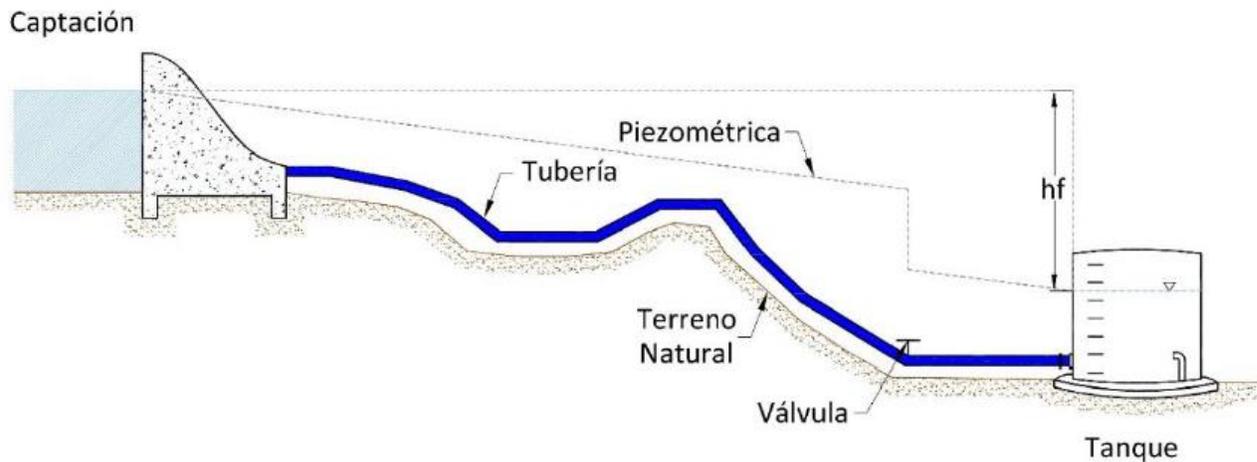


Figura 3. Esquema de una línea de conducción a gravedad.

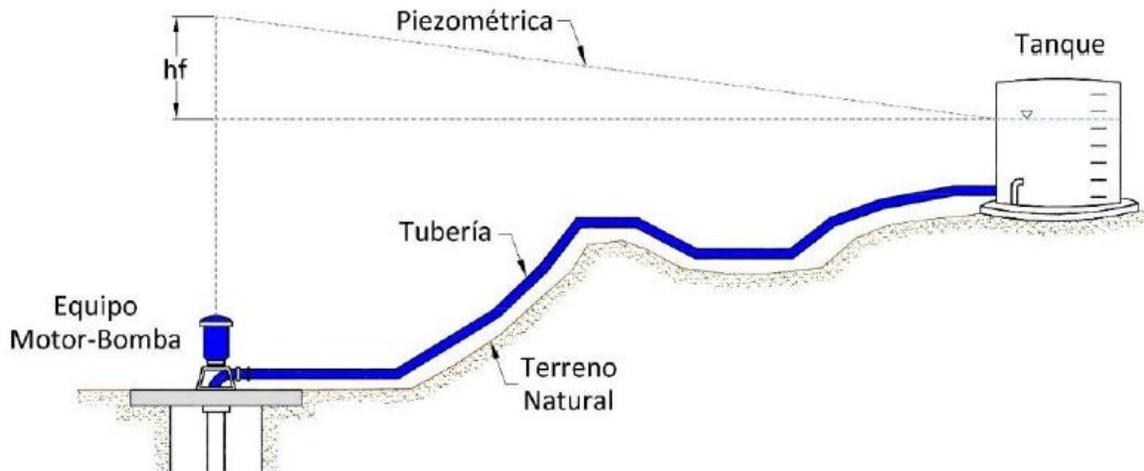


Figura 4. Esquema de una línea de conducción por bombeo.

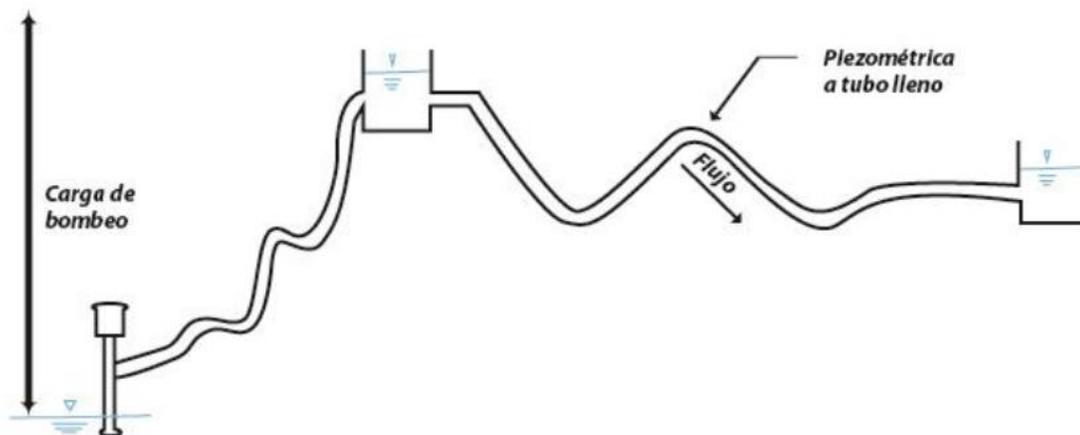


Figura 5. Esquema de una línea de conducción combinada.

### 3. Condiciones en una Sistema Hidráulico

#### 3.1 Flujo Permanente

En flujo permanente las características hidráulicas en una determinada sección del conducto permanecen constantes para cualquier instante y no varían con respecto al tiempo. De lo anterior se deduce que:

$$\frac{\partial}{\partial t} (p, V, Q) = 0 \dots (2.1)$$

Donde:

$p$  es la presión manométrica en el conducto en m.

$V$  es la velocidad en m/s.

$Q$  es el gasto en m<sup>3</sup>/s.

### 3.1.1 Ecuación de Continuidad

$$Q_1 = Q_2 \dots (2.2)$$

$Q$  es el Gasto en la conducción m<sup>3</sup>/s.

### 3.1.2 Ecuación de la Energía

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + h_f \dots (2.3)$$

Donde:

$$h_f = \frac{fl}{D} \frac{V^2}{2g} \dots (2.4)$$

Siendo:

$h_f$  las pérdidas por fricción en metros.

$f$  el factor de fricción para la ecuación de Darcy-Weisbach, el cual puede ser calculado con la ecuación de Swamee-Jain para cualquier valor de  $Re$ .

$l$  la longitud de la línea de la conducción en metros.

$z$  la carga de posición en el punto dado en metros.

$\frac{V_1^2}{2g}$  la carga de velocidad en metros.

$\frac{P_1}{\rho g}$  la carga de presión en metros.

Si la tubería descarga en forma libre, la elevación del punto de entrega es el eje de la tubería de descarga y en esta sección se tiene carga de velocidad, tal como se indica en la figura 4. Para este caso la ecuación de la energía queda:

$$H_{Bsis} = H_E + \frac{V_d^2}{2g} + h_{rs} + h_{rd} \dots (2.5)$$

Donde:

$H_{Bsis}$  es la carga por bombeo que requiere el sistema.

$H_E$  es la carga estática.

$z_D$  es la cota al eje de la tubería de descarga.

$h_{rs}$  es la pérdida de carga en el tramo de succión.

$h_{rd}$  es la pérdida de carga en el tramo de descarga, incluye pérdidas por fricción  $h_f$  y pérdidas locales.

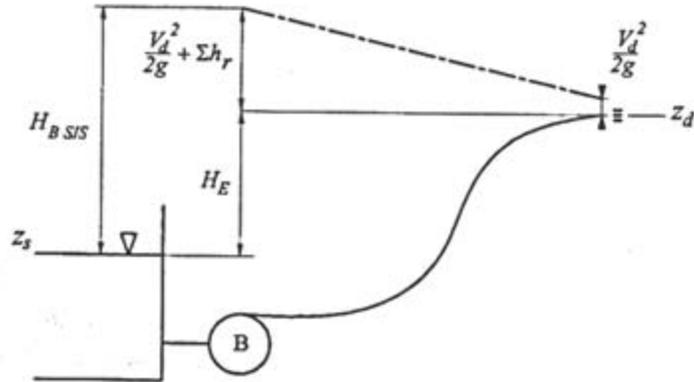


Figura 6. Carga dinámica del sistema cuando la descarga se efectúa en condiciones atmosféricas.

El agua que viaja desde un punto de toma hasta otro de entrega, incrementa su energía potencial en la carga estática  $H_e$  y realiza un trabajo de fricción contra las paredes de la tubería conocido como  $H_f$ . Por lo tanto, si el gasto volumétrico es  $Q$  y  $\gamma$  el peso específico del agua, la potencia empleada en conducir el gasto  $Q$  desde la toma al punto de entrega es de  $P = \gamma Q (H_f + H_e)$ . Esta potencia es entregada al fluido por las bombas que, a su vez, son movidas por motores eléctricos.

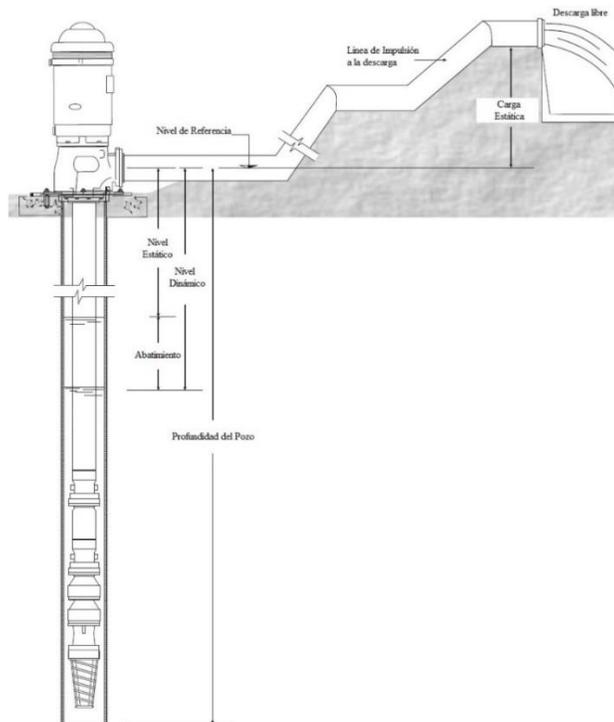


Figura 7. Esquema del arreglo de un equipo de bombeo vertical en pozo profundo.

### 3.2 Flujo No Permanente o Transitorio

También conocido como flujo transitorio, éste se define como el flujo intermedio entre el permanente inicial y el final presentes en una línea de conducción. En caso contrario al flujo permanente, en el flujo no permanente las características hidráulicas varían de un instante a otro y puede ser expresado como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(p, V, Q) \neq 0 \quad \dots (2.6)$$

Un ejemplo particular importante de este tipo de flujo es el fenómeno denominado como el golpe de ariete, que se analizará en este trabajo para la red de pozos propuesta tanto en el paro súbito como en el arranque del sistema.

Existen dos tipos de transitorios:

- *Transitorio muy lento o cuasi-estático*; En el que las variables significativas del flujo, fundamentalmente caudales y presiones, varían de manera muy lenta en el tiempo. Como ejemplo más significativo se tiene el comportamiento normal de las redes hidráulicas a presión. La aplicación sucesiva del modelo estático permite su análisis.
- *Transitorio lento u oscilación de masa*; Ocurre cuando el cierre de válvulas, o cualquier maniobra que trastorne la condición estacionaria del sistema, se realiza en un tiempo mayor que el tiempo característico de la tubería  $\frac{2l}{a}$ , el cual depende directamente de la longitud de la tubería  $l$  y la celeridad de la onda de presión  $a$ , o el paro de bombas es controlado por un operador en un tiempo considerable. Este tipo de fenómeno es analizado bajo la teoría de la *columna rígida* donde se asume que el fluido es incompresible y que la conducción es una frontera rígida.
- *Transitorios rápido o Golpe de Ariete*; Ocurre después de un paro instantáneo de bombas o un cierre rápido de válvulas, generando sobrepresiones o depresiones, así como la posibilidad de separación de columna líquida en la conducción, por lo que resulta importante colocar distintos dispositivos de control de transitorios en puntos estratégicos que permitan controlar la variación de presión. Este tipo de fenómeno transitorio es analizado con el modelo teórico llamado de *columna elástica*.

En resumen, se pueden considerar tres grandes tipos de transitorios hidráulicos. En primer lugar, los de muy lenta evolución y que se agrupan con el nombre genérico de cuasi-estáticos. Su estudio tiene interés en el análisis de operación hidráulica de redes de distribución, por lo que queda fuera del alcance del presente trabajo. El trío se completa con los transitorios lentos y rápidos que se analizan a través de sus modelos de cálculo: el rígido y elástico respectivamente.

### 3.2.1 Breve Historia del Flujo Transitorio

El estudio de los flujos transitorios tuvo su inicio con las investigaciones de propagación de las ondas del sonido en el aire, propagación de ondas de aire en flujos a superficie libre y estudios del flujo sanguíneo.

Newton, LaGrange, Fuler, Laplace, Monge, Young, Riemann, entre otros investigadores fueron los responsables de las primeras investigaciones de flujo transitorio, tomando ya en consideración el concepto de celeridad de onda con varios arreglos de conductos, diferentes fluidos y sus propiedades elásticas. Joukowski en el año 1897 realizó extensos trabajos de laboratorio y realizó la publicación de un artículo sobre la teoría básica del golpe de ariete, definiendo así una fórmula para la celeridad de onda de presión y una relación entre la velocidad media y el incremento de presión; los ensayos que ejecutó incluyó el análisis del flujo con varias perturbaciones transitorias.

Posteriormente en el año 1902, el Sistema en flujo permanente o estacionario Perturbación transitoria - variación de caudal en la conducción (maniobra de válvulas, bombas) Generan importantes variaciones en la carga piezométrica (sobrepresiones y depresiones) - Flujo transitorio 38 italiano Allievi desarrolló la teoría general del golpe de ariete desde sus principios básicos en un arreglo tanque – tubería - válvula e introdujo varios parámetros adimensionales, con los que pudo generar varios ábacos para determinar la variación de presiones ante las maniobras de una válvula. Estos primeros estudios consideraron arreglos sencillos de los conductos, con una perturbación transitoria que estuvo dada por el cierre o apertura de una válvula y sin considerar los efectos de fricción en el sistema; estos estudios estuvieron vigentes en las primeras dos décadas del siglo XX.

Hasta el año 1940 hubo un desarrollo bastante importante de las teorías propuestas por Joukowski y Allievi, asociando algunas modificaciones como por ejemplo la inclusión de las pérdidas por fricción del sistema y se desarrollaron matemáticamente las ecuaciones básicas de los transitorios que fueron propuestas por Weber. Se generaron varios ábacos para la determinación de la variación de sobrepresiones, e inclusive Schnyder y Bergeron realizaron las primeras experimentaciones de transitorios con bombas centrífugas llegando finalmente a definir un método gráfico para la resolución de este problema.

Posterior al año 1940, numerosos autores e investigadores como Rich, Jaeger, Parmakian, Ruus, Gray, Streeter, Evangelisti, Wylie, continuaron con los estudios de los transientes, pudiendo desarrollar varios métodos numéricos para la resolución de las ecuaciones fundamentales del movimiento, además de la continua experimentación de dispositivos para el control y atenuación del flujo transitorio tales como tanques unidireccionales, chimeneas de equilibrio, entre otros.

Dentro del desarrollo de los métodos numéricos merece una mención especial el método de las características cuyo fundamento matemático fue introducido por Monge en 1897 y desarrollado con fines computacionales por Gray y aplicado por Lai y Streeter; este método tiene una alta aplicabilidad para la resolución de varios problemas de flujo transitorio, por ende, su vigencia

### 3.2.2 Ecuación de Joukowsky

Esta fórmula permite el cálculo del cambio de presión  $\Delta H$  (sobrepresión o depresión) en una tubería, cuando el tiempo de cierre (variación del caudal) es 'instantáneo' o menor al periodo de la conducción.

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

Donde:

$\Delta H$ : variación de la presión (m);

a: celeridad de la onda de presión (m/s);

$\Delta v$ : variación de la velocidad en el conducto (m/s);

g: aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

### 3.2.3 Conservación de la Masa

Este principio establece que la totalidad de la masa en una unidad de tiempo que entra a un volumen finito dentro del fluido, una parcialidad se almacena dentro del mismo y lo restante sale.

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Cantidad neta de masa que} \\ \text{atraviesa la superficie de} \\ \text{frontera del volumen en la} \\ \text{unidad de tiempo.} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{Rapidez de variación de la} \\ \text{masa contenida en el} \\ \text{volumen.} \end{array} \right] = 0$$

### 3.2.4 Ecuación de la Continuidad para un Conducto

En la figura 5 se explica de manera ilustrativa un volumen elemental limitado por la superficie interna de un conducto 3 y por las secciones transversales 1 y 2. La cantidad de masa que atraviesa la superficie A de frontera del volumen de estudio es:

$$\left[ \rho VA + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho VA) dx \right] - \left[ \rho VA - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho VA) dx \right] = \frac{\partial}{\partial x} (\rho VA) dx$$

Donde:

A es la superficie de frontera del volumen

V es la velocidad

$\rho$  es la densidad del agua

Y la rapidez de la variación de masa dentro del mismo  $\frac{\partial}{\partial x} (\rho A dx)$

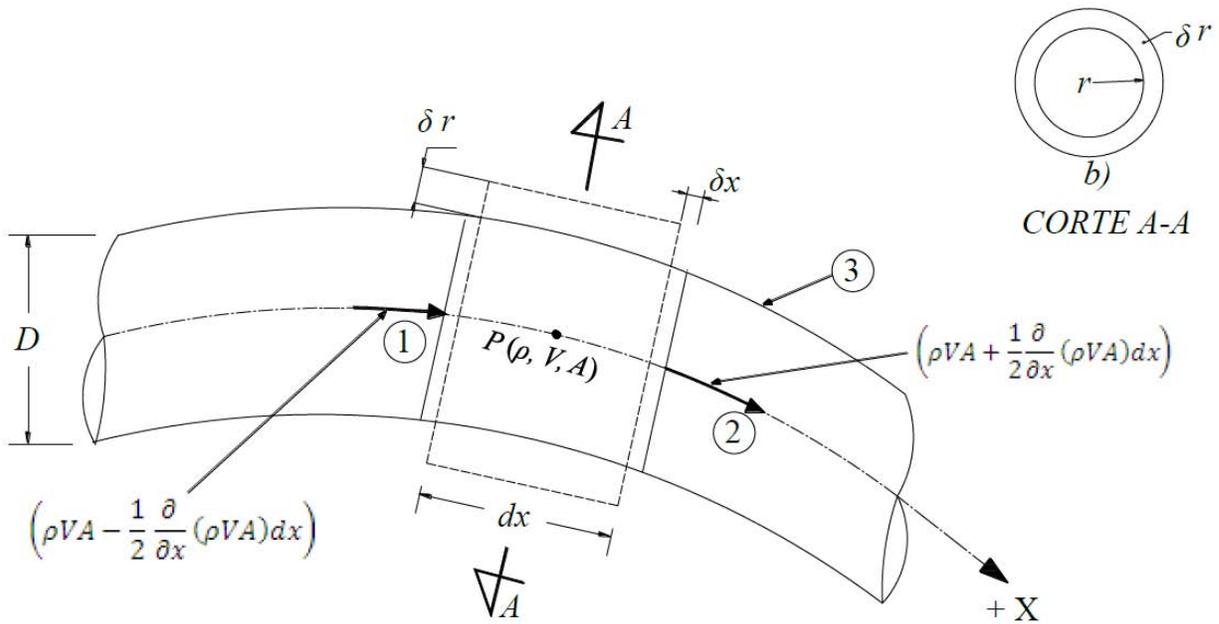


Figura 8. Volumen elemental finito.

De acuerdo con el principio de conservación de la masa, y aceptando que la variación longitudinal del volumen elemental se escribe que:

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho VA + \frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad \dots (2.7)$$

Al derivar parcialmente la ecuación anterior y ordenar términos:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial A}{\partial t} = V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t}$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial p}{\partial t} = V \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t}$$

Al sustituir las expresiones anteriores en la ecuación 2.7 y dividiendo entre  $\rho A$ :

$$\frac{\partial V}{\partial x} \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = 0 \quad \dots (2.8)$$

Siendo esta, la ecuación de la continuidad para un conducto con flujo no uniforme, no permanente y compresible.

### 3.2.5 Ecuación Dinámica para un Conducto

Para obtener la ecuación dinámica de un conducto se debe establecer el equilibrio de las fuerzas que actúan en la dirección tangencial a la coordenada curvilínea x, sobre la superficie de frontera que limita el volumen elemental que se muestra en la figura 4.

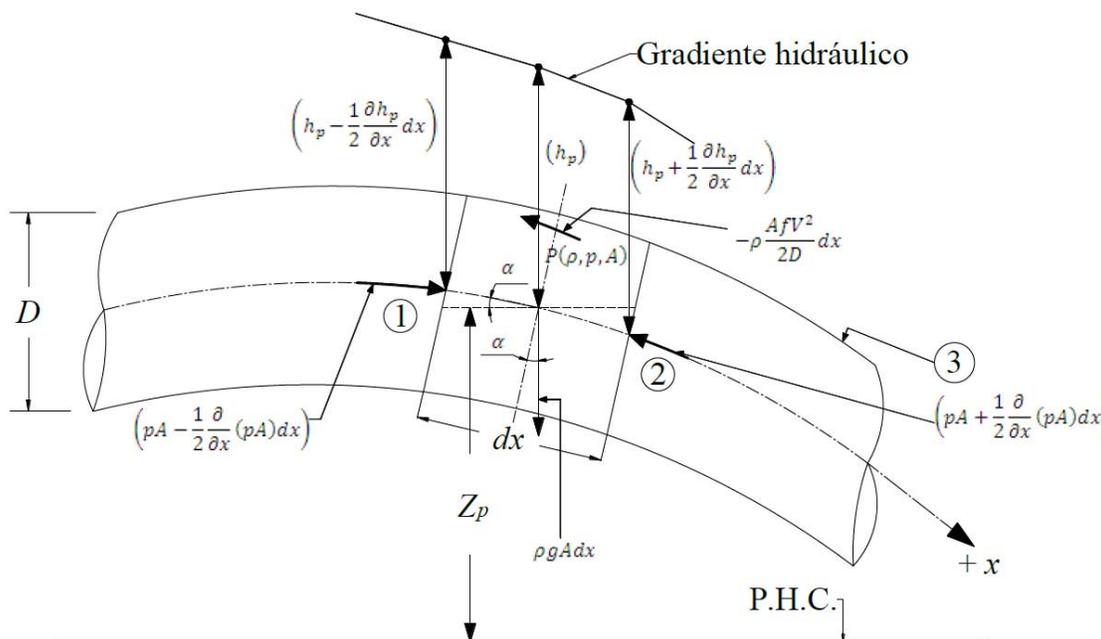


Figura 9. Fuerzas que actúan dentro de una línea de conducción.

Las fuerzas aplicadas considerando valor positivo en la dirección + x, son las siguientes:

- a) La fuerza de superficie resultante de las que actúan en las secciones 1 y 2 debida a un gradiente de presión.

$$\left[ \rho A - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho A) dx \right] - \left[ \rho A + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (\rho A) dx \right] = -\frac{\partial}{\partial x} (\rho A) dx \approx -A \frac{\partial p}{\partial x} dx$$

- b) La fuerza de superficie resultante debida a la resistencia al movimiento, aplicada al volumen elemental y calculada a partir de la fórmula de Darcy - Weisbach.  
c)

$$-\rho A \frac{fV^2}{2D}$$

- d) La componente tangencial del peso propio del volumen, aplicada en el centro de gravedad del mismo.

$$\rho g A dx \operatorname{sen} \alpha = -\rho g A \frac{\partial Z_p}{\partial x} dx$$

Donde:

$$\operatorname{sen} \alpha = -\frac{\partial Z_p}{\partial x}$$

Siendo  $Z_p$  la carga de posición del conducto.

De acuerdo con la segunda ley de Newton, la suma de estas fuerzas debe ser igual a la masa del elemento  $\rho g A dx$  multiplicada por la componente tangencial de la aceleración, lo que permite escribir:

$$A \frac{\partial p}{\partial x} dx + \rho A \frac{fV^2}{2D} dx + \rho g A \frac{\partial Z_p}{\partial x} dx = -\rho A \left[ \frac{\partial}{\partial x} \frac{V^2}{2} + \frac{\partial V}{\partial t} \right] dx$$

Sabiendo que  $p = \rho g h_p$  y se divide la ecuación anterior entre  $\rho g A dx$  después de ordenar términos resulta:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h_p + \frac{V^2}{2g} + Z_p \right) + \frac{h_p}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV^2}{2gD} = 0$$

Para una determinada sección del conducto el valor de  $H_T = h_p + \frac{V^2}{2g} + Z_p$  representa la energía total por unidad de peso o carga total que tiene el líquido, medida con relación a un plano horizontal de referencia, y el término  $V^2$  debe ser definido como  $V|V|$  para tomar en cuenta la inversión en la dirección del flujo cuando este es transitorio. De acuerdo con esto, la ecuación siguiente adquiere la forma de:

$$\frac{\partial H_T}{\partial x} + \frac{h_p}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2gD} = 0 \quad \dots (2.9)$$

Siendo esta la ecuación dinámica para un conducto con flujo uniforme, no permanente y compresible.

### 3.3 Teoría de la Columna Elástica

Las ecuaciones de continuidad y dinámica en este caso están sujetas a las siguientes hipótesis simplificadoras:

1. El conducto permanece lleno de agua todo el tiempo y la presión mínima en cualquier sección siempre es mayor que la de vaporización del fluido. (No hay formación de cavidades gaseosas)
2. Las distribuciones de velocidad y presión en cualquier sección del conducto son uniformes, es decir, la velocidad y presión solo dependen de la coordenada espacial de distancia a lo largo del eje de la tubería.
3. Las ecuaciones para el cálculo de pérdidas de carga cuando el flujo es permanente, también son válidas cuando éste es transitorio.
4. La pared del conducto y el fluido se comportan de una manera elástica lineal y tienen pequeñas deformaciones.

5. El incremento de la presión con respecto a la coordenada curvilínea  $x$  resulta pequeño comparado con el incremento de la misma con respecto al tiempo.

$$\frac{d_p}{d_t} = \frac{\partial_p}{\partial_t}$$

6. El incremento de la carga de velocidad y la densidad del fluido resulta pequeño comparado con el de la carga piezométrica.

$$\frac{\partial H_T}{\partial x} + \frac{h_p}{\rho} \frac{\partial_p}{\partial x} \approx \frac{\partial_H}{\partial x}, \quad \frac{\partial_p}{\partial t} \approx \rho g \frac{\partial_H}{\partial t}$$

Para efectos de esta investigación se analizará el golpe de ariete mediante el método de las características, tanto para el paro como para el arranque de los equipos de bombeo.

El incremento de presión resultante de una reducción brusca de la velocidad puede definirse aplicando la ecuación no estacionaria de cantidad de movimiento a un volumen de control sobre la tubería que incluya la zona donde está ocurriendo el cambio.

El modelo matemático que representa a los transitorios rápidos o golpe de ariete está formado por las ecuaciones de continuidad y dinámica. Este par de ecuaciones determinan un sistema de ecuaciones hiperbólicas en derivadas parciales, no lineal cuyas variables independientes son el tiempo  $t$  y la posición  $x$  y las variables dependientes son la carga  $H$  y el gasto  $Q$ . Este sistema se puede resolver utilizando el método numérico llamado de las características, mismo que el sistema *Trans* emplea. Ver referencia 8.

### 3.3.1 Ecuación de Continuidad

De acuerdo a la hipótesis 5 de la teoría de la columna elástica:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots (2.10)$$

En donde  $a$  es la celeridad de la onda de presión en el conducto y su valor se determina mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{1}{E_v} + \frac{D}{eE_T} \right)}} \quad \dots (2.11)$$

Donde:

- $\rho$  es la densidad del fluido transportado.
- $E_v$  es el módulo de elasticidad del fluido transportado.
- $E_T$  es el módulo de elasticidad del material de la conducción.
- $e$  es el espesor de la tubería.

Este parámetro está definido como la velocidad con que se transporta la onda de presión al interior de la tubería, al existir una variación en el caudal del sistema. La celeridad depende de las propiedades elásticas del fluido, del material que conforma el conducto y de las fuerzas resistivas externas (grados de libertad de movimiento del conducto).

El diámetro tiene que ser multiplicado por un coeficiente adimensional que determina qué tipo de empotramiento o juntas tiene cada tubería.

Para tuberías empotradas en un extremo sin juntas de expansión.

$$c1 = 54 - \mu$$

Para tuberías empotradas y con restricción del movimiento longitudinal en sentido del flujo.

$$c1 = 1 - \mu^2$$

Para tuberías con juntas de expansión.

$$c1 = 1 - \mu^2$$

Donde:

$\mu$ : coeficiente de Poisson del material del conducto

para propiedades elásticas se puede consultar la siguiente tabla:

MATERIAL	MÓDULO DE ELASTICIDAD Ea (GPa)	MÓDULO DE POISSON $\mu$
Acero templado	200 -212	0.27
Hormigón	14 – 30	0.10 – 0.15
Cobre	107 – 131	0.34
Acero fundido	80 – 170	0.25
Latón	78 – 110	0.36
PVC, PRFV	2.4 – 2.75	0.33

• Factor de conversión 1 GPA =  $1 \times 10^8$  kg/m<sup>2</sup>

Tabla 2. Propiedades elásticas de diferentes materiales.

### 3.3.3 Ecuación Dinámica

Partiendo de la hipótesis 6 de la teoría de la columna elástica, la definición de carga piezométrica  $H$  y la relación  $Q=VA$ :

$$\frac{\delta Q}{\delta t} + gA \frac{\delta H}{\delta x} + \frac{fQ|Q|}{2DA} = 0 \dots (2.12)$$

Es, necesario destacar que, para el cálculo de las pérdidas por fricción en el conducto, se ha utilizado la ecuación Darcy-Weisbach. No obstante, es posible utilizar cualquier expresión de forma  $K_1 Q |Q|^m D^b$  con valores de  $K_1$ ,  $m$  y  $b$  que dependen de la ecuación utilizada; así, para la fórmula de Manning, que en la práctica también se aplica a los conductos a presión,  $K_1 = 8.08 \text{ gn}^2$ ,  $m = 1$  y  $b = -10/3$ , siendo  $n$  el coeficiente de rugosidad.

#### 4. Dispositivo para control de transitorios

El propósito de los dispositivos de control de transitorios hidráulicos es evitar el daño que éstos puedan producir por caídas de presión o el consecuente golpe de ariete, generado por los cambios súbitos en las variables de presión en el sistema.

Para controlar los efectos del transitorio hidráulico se tienen dispositivos de acción directa y dispositivos de acción indirecta. Los primeros ejercen un efecto inmediato desde el instante en que inicia el transitorio y su objetivo es disminuir la rapidez con la que se reduce la velocidad de la columna líquida, lo que a la postre se manifestará en menores oscilaciones de presión y una menor exigencia para la resistencia de la tubería.

Los dispositivos de acción indirecta llevan a cabo su efecto cuando la presión aumenta abruptamente o disminuye peligrosamente. En los casos en que no se puede alargar el transitorio, existe la posibilidad de minimizar sus consecuencias.

Para Guarga R. (1995) los dispositivos de protección ante transitorios se clasifican de la siguiente manera:

Dispositivos de acción directa:

- Volantes de inercia
- Cámaras de aire
- Válvulas de cierre programado

Dispositivos de acción indirecta:

- Torres de oscilación
- Tanques unidireccionales
- Válvulas de retención
- Válvulas de admisión y expulsión de aire
- Válvulas de alivio

En este trabajo se expone el funcionamiento de las cámaras de aire por ser el tema central a tratar.

##### 4.1 Cámaras de Aire

Para mitigar las sobrepresiones y supresiones que se presentan en el sistema al momento de un disparo de bombas se ha planteado la utilización de cámaras de aire como dispositivo de control.

Pero, ¿Qué es una cámara de aire? La cámara de aire es un tanque cilíndrico con tapa toriesférica o hemisférica.

La cámara de aire va anclada al suelo mediante soportes metálicos sobre una base de concreto (figura 14). Este dispositivo contiene en su interior un volumen de agua y otro de aire comprimido que almacena la energía que la conducción requiere en las diferentes transiciones de los estados del flujo durante el transitorio.

Una cámara de aire cuenta con una a la línea principal que permite tanto el ingreso, como la salida de agua de la cámara. Esta conexión puede o no tener placas orificios como disipadores de energía que den lugar a pérdidas de carga locales, que tienen como función evitar un incremento súbito de presión al momento del regreso de agua al su interior.

En este caso, las dimensiones de cada cámara se determinaron mediante iteraciones de cálculo simulando inicialmente un sistema sin dispositivos de protección alguna en *Trans* para así obtener las presiones máximas y mínimas contra las que se trabajaría de tal manera que se pueda conocer el volumen de aire necesario, así como también al nivel que debe estar el agua dentro de la cámara. Las cámaras de aire controlan los transitorios ocasionados por paros súbitos de equipos reduciendo la variación del  $Q(t)$  y amortiguan de manera lenta el arranque de los mismos.



Figura 10. Cámara de Aire.

#### 4.1.1 Ventajas y Desventajas

Las ventajas más significativas que presenta una cámara de aire como dispositivo principal o secundario para el control del golpe de ariete, son las siguientes:

- Reduce, en función de la cantidad de aire comprimido, la magnitud de la onda de presión negativa que se produce luego del paro los equipos de bombeo.
- Su efecto no depende de la cota inicial de la superficie libre del agua dentro de la cámara. Ésta diferencia esencial con la torre de oscilación y con el tanque unidireccional permite que con la cámara se controle la caída de presión por corte de bombeo en topografías en las cuales altura de los tanques sería prohibitiva.
- El volumen de agua estática existente dentro de la cámara de aire es sustancialmente menor que en una torre de oscilación o tanque unidireccional, por lo tanto, en zonas con clima frío es más fácil evitar la congelación mediante calentamiento.
- La cámara de aire puede colocarse siempre cerca de la planta de bombeo puesto que su efecto no depende de la cota inicial de la superficie libre del agua dentro de la cámara. Ello facilita su mantenimiento, la alimentación de aire comprimido y calentamiento, si fuese necesario.

Por otra parte, los problemas más importantes que presenta la cámara son:

- Requiere de compresores para mantener el colchón de aire que, de otra manera, se disolvería en el agua y finalmente desaparecería.
- El orificio diferencial habitualmente se construye mediante un bypass con válvulas de retención.
- Como todo tanque a presión, debe ser inspeccionado periódicamente para evitar fallas.
- Como la cámara reduce, pero no suprime la onda de presión negativa, ésta viaja en la dirección aguas abajo. En función de la topografía, pueden requerirse otros dispositivos de control auxiliares.

#### 4.1.2 Ecuaciones

Para el cálculo de nodos en el sistema, se utilizaron 9 ecuaciones con 9 incógnitas formando un sistema complejo que se puede resolver mediante el método de las características:

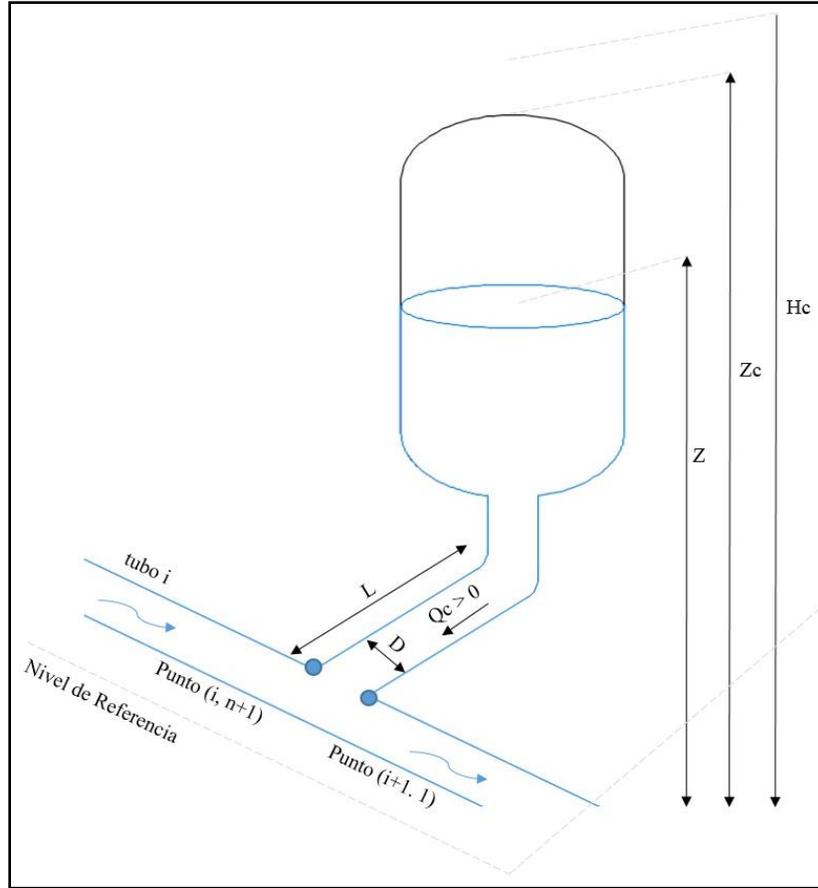


Figura 11. Variables para el cálculo de transitorios con cámara de aire.

$$Q_c = -A_c \frac{dZ}{dt} \quad \text{Ecuación de la Continuidad} \quad \dots (3.1)$$

$$H_c = Z + \frac{p - p_a}{\gamma} \quad \text{Ecuación Dinámica} \quad \dots (3.2)$$

$$\frac{p}{\gamma} (Z_c - Z)^{1.2} = C \quad \text{Ecuación Constitutiva del Gas} \quad \dots (3.3)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = Q_{CP} + Q_{P_{n+1}} \quad \dots (3.4)$$

$$\frac{dQ_{CP}}{dt} = \frac{Q_{CP} - Q_C}{\Delta t} \quad \dots (3.5)$$

$$H_{P_{i+1,1}} = H_{P_{n+1}} \quad \dots (3.6)$$

$$Q_{CP} + Q_C = -2A_c \frac{dZ_P}{dt} \quad \dots (3.7)$$

$$H_{CP} - H_{P_{i,n+1}} = \frac{l}{gA} \frac{dQ_{CP}}{dt} + \left( \frac{fl}{2gDA^2} + K_V \right) Q_{CP} |Q_{CP}| \quad \dots (3.8)$$

$$\frac{dZ_P}{dt} = \frac{Z_P - Z}{\Delta t} \quad \dots (3.9)$$

$$H_{CP} = Z_P + \frac{p_P - p_a}{1.2} \quad \dots (4)$$

$$\frac{p_P}{\gamma} (Z_C - Z_P)^{1.2} = C \quad \dots (4.1)$$

$$Q_{P_{i,n+1}} = C_P - C_{ai} H_{HP_{i,n+1}} \quad \dots (4.2)$$

$$Q_{P_{i+1,1}} = C_N - C_{ai+1} H_{HP_{i+1,1}} \quad \dots (4.3)$$

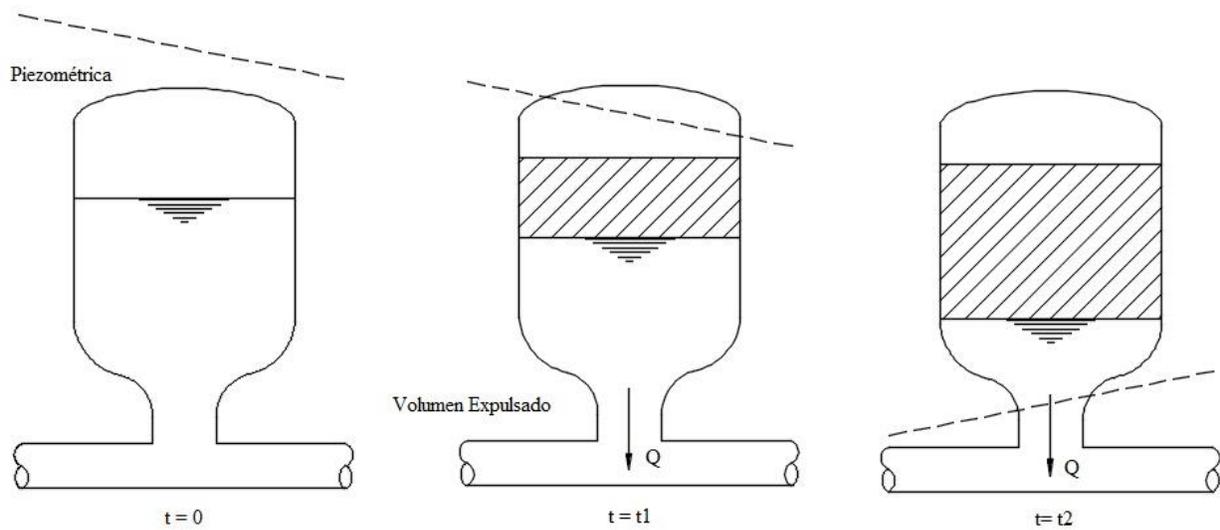


Figura 12. Funcionamiento de una cámara de aire ante la caída de presión.

Se puede observar que en la figura 21, la piezométrica en  $t=0$  está en posición normal para un flujo establecido, posteriormente en  $t=t1$  al momento del disparo de los equipos de bombeo, lo primero que se presenta en el sistema es una presión negativa y la necesidad de ingreso de agua al sistema por lo que existe un volumen expulsado de la cámara hacia la línea de conducción para evitar succiones a lo largo de la línea que puedan ocasionar roturas y evitar depresiones.

Como se expresó anteriormente, las ecuaciones que representan de mejor manera al flujo transitorio son las dadas por el modelo de la columna elástica, que son ecuaciones diferenciales parciales de primer orden cuyas funciones resultantes son de tipo hiperbólico y cuentan con innumerables soluciones.

Sin embargo y gracias a la aplicación de varios artificios matemáticos se ha logrado ‘linealizar’ estas ecuaciones y desarrollar varios métodos de resolución gráficos y analíticos, que brindan soluciones aproximadas. Estos métodos numéricos determinan la variación de los parámetros hidrodinámicos de los sistemas: caudal, velocidad y carga piezométrica; valores que son esenciales con fines de diseño hidráulico.

Con el desarrollo de la tecnología, en la actualidad es posible contar con la programación de varios de estos métodos, con la aplicación de varias técnicas y artificios matemáticos que facilitan la resolución del sistema de ecuaciones fundamentales del flujo transitorio. Existen varios métodos utilizados: método de elementos finitos, métodos pseudoespectrales, método de elementos espectrales, método implícito de diferencias finitas y el método de las características, siendo estos dos últimos los más difundidos.

En el método de las características las derivadas parciales se convierten en ecuaciones diferenciales ordinarias, las mismas que se resuelven por medio de una técnica explícita de diferencias finitas. En este método se establece una condición de frontera para cada sección de conducto y para determinado intervalo de tiempo, por lo que es totalmente conveniente para la resolución de sistemas complejos en geometría y con perturbaciones transitorias complejas.

Dado que el método de las características toma en consideración a las variables espacio y tiempo con sus distintas condiciones de borde, es necesario determinar un efectivo intervalo de tiempo para el análisis para satisfacer la convergencia del modelo (criterio de Courant); sin embargo, de esta ligera complicación este método es sencillo de programar, tiene mayor eficiencia en el cálculo y sobretodo refleja de manera correcta el fenómeno de traslación de onda. La gran mayoría de paquetes computacionales utilizan como método resolutivo de los problemas de flujo transitorio al método de las características, por tanto, en el siguiente capítulo se hará una síntesis de la resolución mediante este método y sus principales parámetros.

## 5. Métodos de solución

### 5.1 Método de las características

Utilizando las ecuaciones 2.10 Y 2.12 el método de las características transforma el sistema de ecuaciones formado por ambas a un sistema de ecuaciones lineal (ecuaciones 3.1 Y 3.2) en donde las incógnitas son  $Q_p$  y  $H_p$ .

$$Q_p = -\frac{gA}{a} H_p + Q_F + \frac{gA}{a} H_F - \frac{fQ_F|Q_F|}{2DA} \Delta t \dots (3.1)$$

$$Q_p = \frac{gA}{a} H_p + Q_G + \frac{gA}{a} H_G - \frac{fQ_G|Q_G|}{2DA} \Delta t \dots (3.2)$$

Ambas ecuaciones pueden resumirse a ecuación de característica positiva (ecuación 3.3) y ecuación de característica negativa (ecuación 3.4):

$$Q_p = C_p - C_a H_p \dots (3.3)$$

$$Q_p = C_n + C_a H_p \dots (3.4)$$

De donde:

$$C_p = Q_A + \frac{gA}{a} H_F - \frac{fQ_F|Q_F|}{2DA} \Delta t \dots (3.5)$$



- Depósito con nivel constante.
- Extremo cerrado situado en la frontera aguas abajo.
- Cambios de diámetro en un conducto.
- Válvula situada en el extremo aguas debajo de un conducto.
- Válvula situada en cualquier sección de un conducto con cambio de diámetro.
- Bifurcación en un conducto.
- Bombes o válvulas de no retorno (check) en la tubería de descarga situadas en el extremo aguas arriba.

## 6. Trans

Para iniciar el análisis transitorio de un sistema hidráulico habrá que contar previamente con las condiciones de frontera necesarias para llevarlo a cabo. Éstas se obtienen a partir de la modelación del sistema a flujo establecido. Posteriormente, es necesario iterar y analizar sensiblemente los resultados para detectar los puntos críticos y en ese sentido, dimensionar los dispositivos de protección requeridos.

Un diseño basado en estos tipos de análisis permitirá que el funcionamiento de las bombas esté siempre por debajo de las tolerancias señaladas por el fabricante (Guarga, 1985).

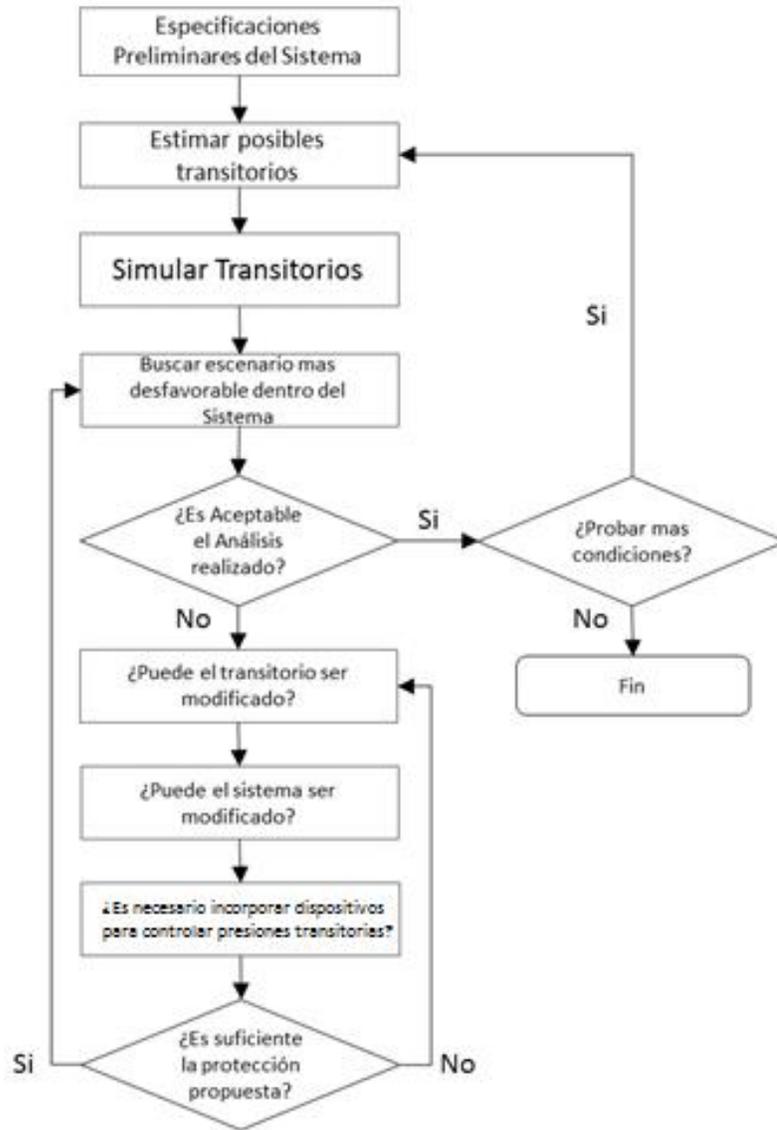


Figura 14. Toma de decisiones al momento de analizar transitorios.

Para llevar a cabo un análisis transitorio de un sistema hidráulico se debe disponer de información sustancial cualitativa y cuantitativamente para lograr un mayor detalle en las simulaciones. Existe información relevante que ayuda a comenzar un análisis de este tipo de donde se destaca lo siguiente:

- Celeridad de Onda,  $c$  (m/s)
- Longitud de la Tubería, (m)
- Gasto de Operación, (m<sup>3</sup>/s)
- Diámetro de la conducción, (m)

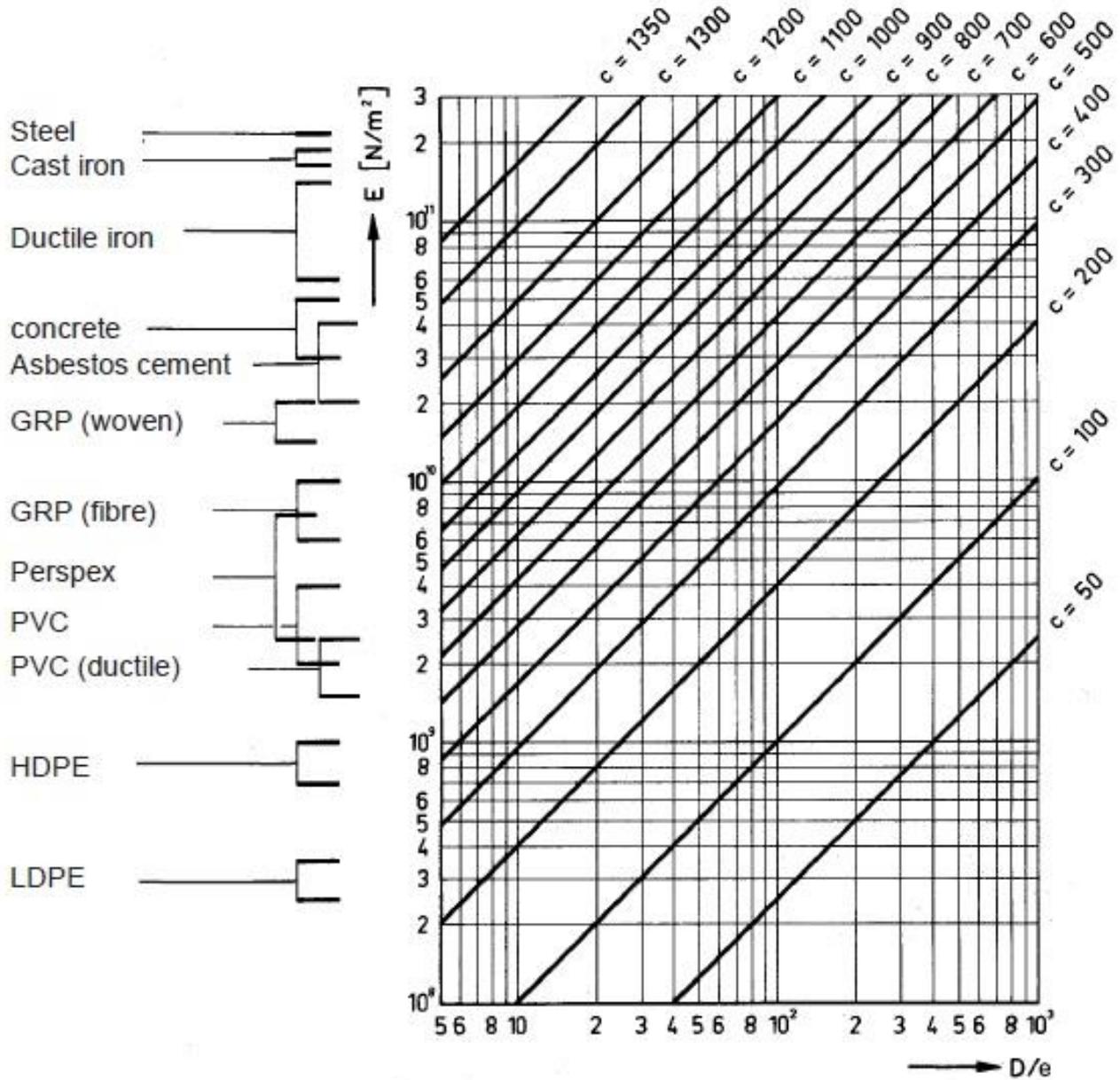
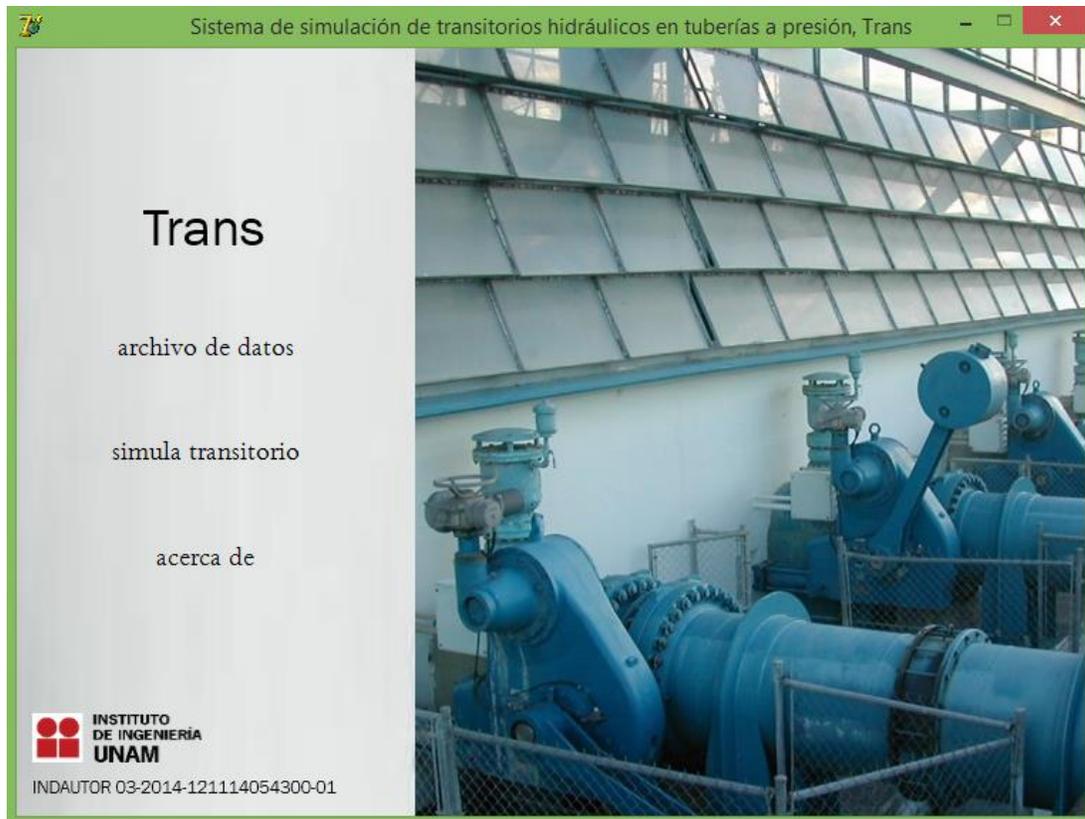


Figura 15. Celeridades de onda en tuberías en relación al material y el espesor de pared.

El sistema *Trans* fue utilizado en este trabajo para modelar el disparo y arranque de equipos de bombeo en la red. En retrospectiva la confiabilidad de las simulaciones de *Trans* está respaldada con calibraciones realizadas al sistema de cómputo a través de analizar comparaciones de registros tomados tanto en el Laboratorio de Hidromecánica del propio IIUNAM como los obtenidos durante campañas de medición en diferentes acueductos del país. Para alimentar al modelo se utilizaron diversos datos para cada elemento de la red como bombas, líneas de conducción, dispositivos de control y válvulas.



*Figura 1617. Pantalla de Inicio de Trans.*

Para las líneas de conducción se necesitó de:

- Longitud del tramo en metros.
- Celeridad en metros por segundo.
- Coeficiente de fricción (Darcy-Weisbach).
- Gasto total que fluye por el conducto ( $m^3/s$ ), en caso de no tener el gasto de diseño se ingresa solamente la carga contra la que trabaja el elemento.
- Código del elemento o evento aguas abajo de la batería de tubos.

Captura tramo <Paro\_H\_Corregidas\_Disen0.tr0>

TRAMOS Instituto de Ingeniería, UNAM

Edición de TUBO 01

Longitud [m]

Diámetro [m]

Celeridad [m/s]

Coeficiente de fricción [D·W]

Gasto [m³/s]

Carga al inicio del tramo [mca]

Figura 17. Pantalla de captura de datos para líneas de conducción en Trans.

Para el paro súbito de equipos de bombeo:

- Nombre de la planta de bombeo o de bomba.
- Número de bombas.
- Instante en el que ocurre el disparo de las bombas en segundos.
- Tipo de válvula en la descarga de las bombas. Se debe dar alguno de los números: 0 o 1, según sea el caso: de apertura/cierre controlado o de retención, en este caso fue de retención.
- Tramo aguas abajo.
- Nivel de succión de la bomba o planta de bombeo en metros sobre el nivel del mar.
- Cadenamiento de la bomba o planta de bombeo en metros.
- Datos de las válvulas; Para las válvulas de retención, los datos que se deben indicar son:  
Coeficiente mínimo de pérdida ( $s_2/m_5$ )  
Coeficiente máximo de pérdida ( $s_2/m_5$ ).
- Datos de las bombas:
  - 1) Incremento angular entre los puntos de las curvas características.
  - 2) Gasto de diseño de las bombas ( $m^3/s$ ).
  - 3) Carga de trabajo de las bombas en metros.
  - 4) Velocidad de diseño de las bombas en revoluciones por minuto.
  - 5) Eficiencia máxima de las bombas.
  - 6) Momento de inercia ( $kg\cdot m^2$ ). Nota: Existe la opción para que *Trans* lo calcule con el criterio de Thorley en caso de no tener el dato.
  - 7) Datos de la curva característica de carga ( $f_h$ ) y datos de la curva característica de momento ( $f_\beta$ ).

Captura de frontera disparo de equipos de bombeo <Paro\_H\_Corregidas\_Diseño.tr>

DISPARO DE EQUIPOS DE BOMBEO AGUAS ARRIBA Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes:  Nuevo ELEMENTO

Nombre

Número de bombas

Instante en que inicia el disparo [s]

Tramo aguas abajo

Nivel de succión [msnm]

Cadenamiento planta de bombeo [m]

Tipo de válvulas en la descarga de las bombas:  
 Válvula de control  
 Válvula de retención

Datos de las válvulas en la descarga:

Tiempo de cierre de las válvulas [s]

Instante en que inicia el cierre [s]

Posición de las válvulas a gasto establecido [°]

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

Coefficiente mínimo de pérdida [s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>]

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

a0 =

a1 =

a2 =

a3 =

a4 =

a5 =

Datos bombas:

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

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

Gasto de diseño [m<sup>3</sup>/s]

Carga de diseño [m]

Velocidad de diseño [rpm]

Eficiencia máxima   
 $0 < \eta \leq 1$

Momento de inercia calculado [kg·m<sup>2</sup>]

$[N_s] = \frac{rpm \sqrt{m^3/s}}{m^{0.75}}$  Velocidad específica [N<sub>s</sub>]   
 (Opcional)

Observaciones...

Figura 18. Pantalla de Captura de datos para paro súbito de equipos de bombeo en Trans.

Para el arranque de equipos de bombeo:

- Número de bombas.
- Tiempo en el que inicia el arranque en segundos.
- Constantes del polinomio de la curva Carga-Gasto de la bomba.
- Gasto máximo que el equipo de bombeo puede bombear (m<sup>3</sup>/s).

FArranqueBombasValvulasCheck <SinTitulo.tr>

NOMBRE ESTRUCTURA Instituto de Ingeniería, UNAM

Existentes:  Nuevo ELEMENTO

Nombre

Número de bombas

Instante en que inicia el arranque [s]

Gasto máximo que entrega cada bomba [m<sup>3</sup>/s]

Tramo aguas abajo

Curva de la bomba

$$H = a_0 + a_1Q + a_2Q^2 + a_3Q^3$$

a0 [m] =

a1 [s/m<sup>2</sup>] =

a2 [s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>] =

a3 [s<sup>3</sup>/m<sup>8</sup>] =

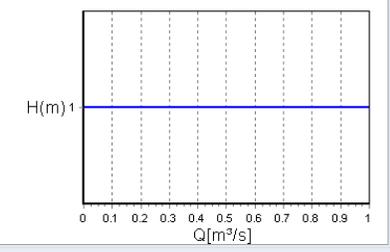


Figura 19. Pantalla de captura de datos para arranque de equipos de bombeo en Trans.

Para las cámaras de aire:

- Coeficiente de pérdida de una válvula de salida de la cámara ( $s^2/m^5$ ).
- Volumen de aire inicial en la cámara ( $m^3$ ).
- Área de la cámara ( $m^2$ ).
- Cota del espejo de agua en la cámara (msnm).
- Coeficiente de pérdida de una válvula de entrada a la cámara ( $s^2/m^5$ ).
- Longitud de la tubería de conexión cámara-conducción (m).
- Diámetro de la tubería de conexión cámara-conducción (m).
- Tramo aguas arriba y tramo aguas abajo.

CÁMARA DE AIRE		Instituto de Ingeniería, UNAM	
Existentes:	<input type="text"/>	Nuevo ELEMENTO	
Nombre	<input type="text"/>	Tramo aguas arriba	<input type="text"/>
Coeficiente de pérdida de la placa orificio [cámara - conducción] [ $s^2/m^5$ ]	<input type="text" value="0"/>	Tramo aguas abajo	<input type="text"/>
Volumen de aire inicial en la cámara [ $m^3$ ]	<input type="text" value="0"/>		
Área de la cámara [ $m^2$ ]	<input type="text" value="0"/>		
Cota del agua en la cámara [msnm]	<input type="text" value="0"/>		
Coeficiente de pérdida de la placa orificio [conducción - cámara] [ $s^2/m^5$ ]	<input type="text" value="0"/>		
Longitud de la tubería de conexión cám-conducción [m]	<input type="text" value="0"/>		
Diámetro de la tubería de conexión cám-conducción [m]	<input type="text" value="0"/>		
<input type="button" value="Graba"/>	<input type="button" value="Consulta"/>	<input type="button" value="Inicializa"/>	<input type="button" value="Baja"/>
<input type="button" value="Salir"/>			

Figura 20. Pantalla de captura de datos para cámara de aire en Trans.

## 7. Desarrollo

En el caso de flujo en conductos y considerando el flujo como permanente y la velocidad, a su vez, es uniforme en una sección transversal, así como también el gasto permanece constante con respecto al tiempo. Los cálculos correspondientes a este caso en específico, se muestran en la tabla 2, para después llevar a cabo la calibración del programa *Trans* y comenzar a simular el flujo no permanente o transitorio. El sistema tendrá descarga libre en el tanque Xicuco al nivel 2080.00 msnm mediante un arreglo hidráulico tipo garza, el cual tiene su desplante en la cota 2063.00, una altura de 17.00 m de alto y 17.00 metros de ancho.

La red de pozos cuenta con un ramal principal y 4 sub-ramales (figura 2) en donde, para cada pozo, se ha considerado una conexión de 10 m de longitud cada ramal o sub-ramal, ya que *Trans* pide como una distancia de conexión mayor a 5 metros. El cálculo de los diámetros de las líneas de conducción se realizó en función de la velocidad y la pérdida por kilómetro recorrido.

Se tomó como rango de velocidades de 1.5 a 2.5 m/s en las tuberías, para obtener una pérdida de entre 3 y 4 m/km de conducción. El material que fue seleccionado para la conducción y red de pozos es acero, con un coeficiente de fricción de  $f = 0.018$ . Considerando incrustación de sólidos y materia que el agua del acuífero contiene.

A continuación, se muestra en una tabla, el cálculo a flujo permanente del sistema de pozos, así como la piezométrica de operación para gasto establecido para el perfil desde el Pozo 40 al tanque Xicuco (consultar figura 2).

Tramo		Gasto de Diseño (m <sup>3</sup> /s)	Longitud (m)		Diámetro		Área (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m <sup>3</sup> )	Hf (m)	Elevación (msnm)	Profundidad (m)	Nivel Freático (m.s.n.m.)	Carga Estática (m.c.a.)	Carga de Bombeo (m.c.a.)	Potencia (HP)	Carga Dinámica (m.c.a.)	Carga de Trabajo (m.c.a.)	Variación Dinámica
De	A		Tramo	Acumulada	(in)	(m)												
P40	I-1		428	428	10	0.2540	0.05	0.88	2.82	2,019.17	20	1,984.17	95.83	119.37	100.46	2,103.54	84.37	20%
I-1	P39	0.0448	622	1,050	12	0.3048	0.07	1.23	4.54	2,020.37	15					2,102.33	81.97	1%
P39	I-2	0.0896	744	1,794	16	0.4064	0.13	1.04	2.42	2,017.61	10	1,992.61	87.39	106.90	89.97	2,099.51	81.90	18%
I-2	P20	0.1344	576	2,370	18	0.4572	0.16	1.36	3.74	2,020.61						2,097.71	77.10	
P20	P17	0.2240	620	2,990	20	0.5080	0.20	1.33	3.18	2,027.91	10	2,002.91	77.09	92.65	77.97	2,095.56	67.65	17%
P17	I-3	0.2688	213	3,203	20	0.5080	0.20	1.55	4.32	2,033.94	10	2,008.94	71.06	84.65	71.24	2,093.59	59.65	16%
I-3	P16	0.3136	527	3,730	20	0.5080	0.20	1.77	5.65	2,041.32						2,092.67	51.35	
P16	P21	0.3584	710	4,440	24	0.6096	0.29	1.38	2.87	2,040.82	10	2,015.82	64.18	73.87	62.17	2,089.69	48.87	13%
P21	P22	0.4032	760	5,200	24	0.6096	0.29	1.53	3.55	2,042.85	10	2,017.85	62.15	69.80	58.75	2,087.65	44.80	11%
P22	I-4	0.4480	547	5,747	24	0.6096	0.29	1.69	4.29	2,042.30	10	2,017.30	62.70	67.66	56.94	2,084.96	42.66	7%
I-4	P36	0.4928	363	6,110	30	0.7620	0.46	1.38	2.28	2,042.23						2,082.61	40.38	
P36	P27	0.6272	640	6,750	30	0.7620	0.46	1.47	2.61	2,047.75	10	2,022.75	57.25	59.03	49.68	2,081.78	34.03	3%
P27	T.X.	0.6720	37	6,787	30	0.7620	0.46	1.57	2.97	2,061.63	10	2,036.63	43.37	43.48	36.59	2,080.11	18.48	0%
T.X.		<b>0.7168</b>		6,787						2,063.09						2,080.00	16.91	
P41	I-1	0.0448	394	394	10	0.254	0.05	0.88	2.82	2,012.24	20	1,977.24	102.76	126.21	106.22	2,103.45	91	19%
P19	P18	0.0448	600	600	10	0.254	0.05	0.88	2.82	2,015.20	10	1,990.20	89.80	111.78	94.07	2,101.98	87	20%
P18	I-2	0.0896	567	1,167	12	0.305	0.07	1.23	4.54	2,022.45	10	1,997.45	82.55	102.83	86.54	2,100.28	78	20%
P153	I-3	0.0448	445	445	10	0.254	0.05	0.88	2.82	2,041.88	10	2,016.88	63.12	77.04	64.84	2,093.92	52	18%
P26	P25	0.0448	430	430	10	0.254	0.05	0.88	2.82	2,030.32	10	2,005.32	74.68	80.63	67.86	2,085.95	71	7%
P25	I-23	0.0896	368	798	14	0.356	0.10	0.90	2.10	2,027.69	10	2,002.69	77.31	82.05	69.05	2,084.74	72	6%
I-23	I-4	0.1344	287	1,085	14	0.3556	0.10	1.35	4.72	2,035.81						2,083.97	0	
P23	I-23	0.0448	633	633	10	0.254	0.05	0.88	2.82	2,037.55	10	2,012.55	67.45	73.98	62.26	2,086.53	64	9%

Tabla 3. Datos hidráulicos de la Red de Pozos.

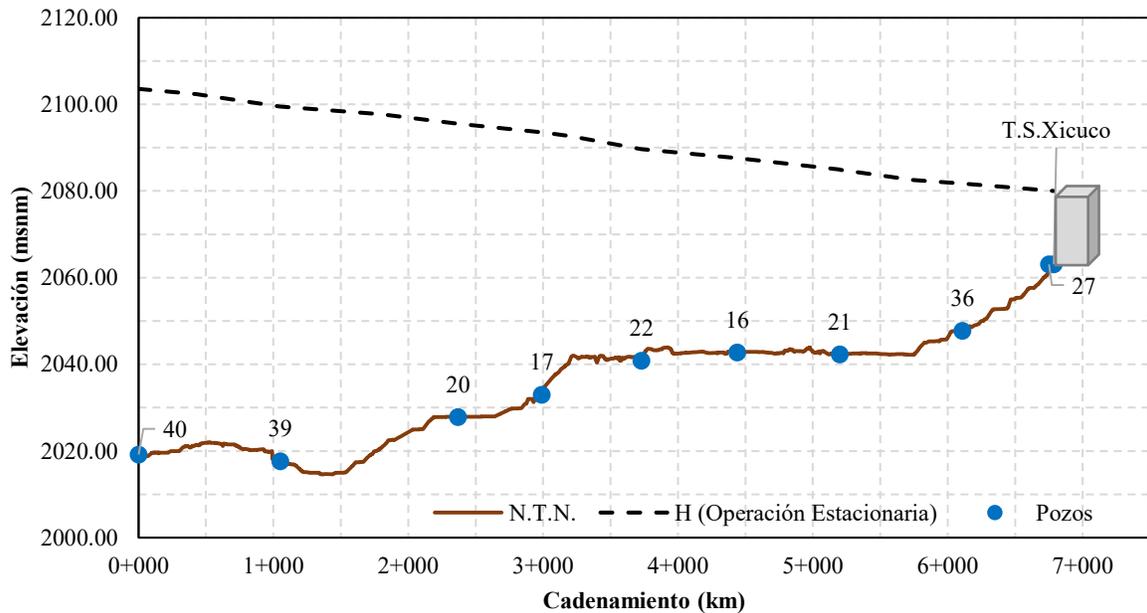


Figura 21. Gradiente hidráulico a gasto establecido del Pozo 40 a la descarga en el tanque Xicuco.

## 7.1 Selección de Equipos de Bombeo

Teóricamente la selección de bombas es un proceso similar al de definición de las dimensiones principales en el diseño. Se parte de la carga de bombeo, el gasto y la carga neta positiva de succión o *NPSH*. Con el caudal y el *NPSH* se define el diámetro de entrada y la velocidad de giro, que debe estar limitada a valores prácticos, como se mencionó con anterioridad esta velocidad de giro será igual a la velocidad nominal.

### 7.1.1 Curva Característica de una Bomba Centrífuga

La presión de una bomba depende fundamentalmente del caudal que circula por ella, lo que quiere decir que va a estar definida por su acoplamiento con el sistema. Si se considera la bomba de forma aislada, la curva que representa la carga proporcionada por la bomba en función del caudal se llama curva característica. La pendiente de tal curva es negativa, lo que quiere decir que cuanto mayor sea la altura que el sistema exija, menor es el caudal que la bomba puede proporcionar.

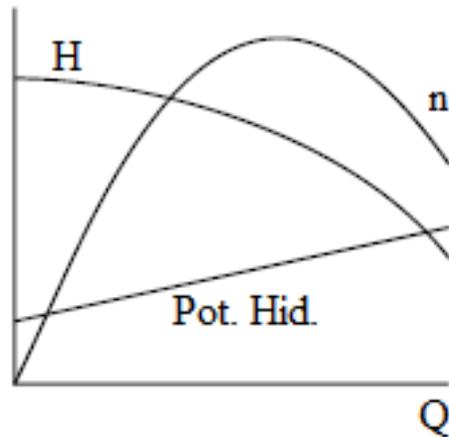


Figura 22. Curva característica para bomba centrífuga aislada.

$$P_{HID} = \rho gQH \quad \dots(19)$$

$$n = \frac{\rho gQH}{P_{HID}} \quad \dots(20)$$

Donde:

$P_{HID}$  es la potencia hidráulica.

$n$  es la eficiencia del equipo.

#### 7.1.2 Altura Neta Positiva de Succión Disponible (NPSHd)

Es una carga hidráulica disponible para conducir determinado caudal desde la succión hasta el eje de la bomba; esta carga neta está definida por la siguiente ecuación:

$$NPSHd = P_s - P_v \gamma - S - Hrs$$

Donde:

$P_s$ : presión absoluta en succión;

$P_v$ : presión absoluta de vapor del fluido a determinada temperatura;

$\gamma$ : peso específico del fluido a determinada temperatura;

$S$ : altura estática de succión;

$Hrs$ : pérdidas de carga en la succión.

Esta ecuación es aplicable cuando el tanque de succión se encuentra por debajo del eje de la bomba, cuando efectivamente exista succión.

### 7.1.3 Altura Neta Positiva de Succión Requerida (NPSHr)

Esta carga hidráulica es definida por el fabricante e impone las condiciones de operación de las bombas, es la altura neta positiva de succión disponible mínima; con el fin de evitar eventuales problemas de cavitación incipiente en la succión de la bomba y mantener la carga de presión necesaria al ingreso del rodete, para lo cual se debe cumplir esta condición:

$$NPSHd \geq NPSHr$$

### 7.1.4 Altura Máxima de Succión (HsMax)

Es la altura máxima de succión con la que podrá operar una bomba, sin generar problemas de cavitación.

$$HsMax = P_s - P_v \gamma - NPSHr - Hrs$$

Donde:

$P_s$ : presión absoluta en succión – generalmente es presión atmosférica;

$P_v$ : presión absoluta de vapor del fluido a determinada temperatura;

$\gamma$ : peso específico del fluido a determinada temperatura;

NPSHr: altura neta de succión requerida;

Hrs: pérdidas de carga en la succión.

Es evidente que la altura máxima de succión dependerá de las características propias de la bomba (referidas por el fabricante) y las condiciones del fluido.

Una vez hecho esto, y dependiendo de la velocidad específica, se elige un tipo de máquina axial, mixta o radial. Para ese tipo de máquina se busca el diámetro específico con el mejor rendimiento (teórico) posible y ya se tiene así definido el tamaño.

### 7.1.5 Momento de Inercia de las Bombas

El momento de inercia del conjunto motor-bomba es la suma de los momentos de inercia del motor y la bomba, éstos se pueden calcular como propone Thorley a través de las siguientes ecuaciones:

$$I(bomba) = 0.03768 \left( \frac{P}{N^3} \right)^{0.9556}$$

$$I(motor) = 0.0043 \left( \frac{P}{N} \right)^{1.48}$$

En las ecuaciones anteriores, N es la velocidad de giro de las bombas en miles rpm y la potencia mecánica, en kW, calculada como se indica en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta}$$

En la ecuación anterior,  $\rho$  es la densidad del fluido en  $\text{kg/m}^3$ ,  $g$  la aceleración de la gravedad en  $\text{m/s}^2$ ,  $Q$  y  $H$  el gasto y la carga en el punto de operación de máxima eficiencia en  $\text{m}^3/\text{s}$  y  $\text{m}$ , respectivamente y  $\eta$  la eficiencia.

### 7.1.6 Velocidad Especifica

Al definir la velocidad específica como se indica en la siguiente ecuación:

en donde la velocidad de la bomba,  $u$ , está en  $\text{rad/s}$  y; la carga  $H$ , el gasto  $Q$  y la aceleración de la gravedad están en unidades del sistema internacional ( $\text{m}$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$  y  $\text{m/s}^2$ ) o en las unidades inglesas ( $\text{ft}$ ,  $\text{ft}^3/\text{s}$  y  $\text{ft/s}^2$ ) se obtiene la velocidad específica adimensional, denotada como  $\Omega$ .

En la siguiente tabla se presentan los valores de carga y momento para las velocidades específicas: 35, 38, 46, y 63. La simulación de la operación transitoria de las bombas se realiza usando la información del más cercano al de la bomba en cuestión.

$\theta(^{\circ})$	$N_s = 35^*$		$N_s = 38^*$		$N_s = 46^*$		$N_s = 63^*$	
	$n_s=1087.4^{**}$		$n_s=1962.2^{**}$		$n_s=2357.4^{**}$		$n_s=3253.3^{**}$	
0	-0.567	-0.440	-0.530	-0.350	-0.530	-0.350	-0.574	-1.053
5	-0.479	-0.293	-0.461	-0.265	-0.476	-0.265	-0.517	-0.805
10	-0.396	-0.180	-0.392	-0.180	-0.392	-0.180	-0.460	-0.558
15	-0.313	-0.088	-0.271	-0.072	-0.291	-0.062	-0.403	-0.310
20	-0.195	0.027	-0.150	0.037	-0.150	0.037	-0.258	-0.141
25	-0.039	0.175	-0.038	0.133	-0.037	0.135	-0.112	0.028
30	0.114	0.304	0.075	0.228	0.075	0.228	0.033	0.197
35	0.233	0.378	0.199	0.309	0.200	0.320	0.189	0.298
40	0.339	0.432	0.322	0.390	0.320	0.410	0.344	0.399
45	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500
50	0.625	0.562	0.678	0.579	0.650	0.555	0.655	0.560
55	0.772	0.611	0.834	0.619	0.810	0.604	0.809	0.621
60	0.888	0.633	0.989	0.658	0.930	0.625	0.964	0.681
65	0.986	0.618	1.112	0.657	1.050	0.640	1.070	0.698
70	1.078	0.593	1.234	0.656	1.170	0.643	1.176	0.715
75	1.156	0.590	1.307	0.611	1.250	0.645	1.282	0.732

80	1.212	0.581	1.380	0.566	1.330	0.640	1.351	0.749
85	1.243	0.524	1.427	0.518	1.370	0.630	1.419	0.766
90	1.251	0.459	1.473	0.470	1.410	0.620	1.488	0.783
95	1.244	0.442	1.472	0.501	1.420	0.635	1.476	0.804
100	1.228	0.433	1.470	0.532	1.440	0.690	1.464	0.824
105	1.203	0.380	1.464	0.574	1.445	0.760	1.452	0.845
110	1.170	0.330	1.457	0.615	1.450	0.820	1.441	0.872
115	1.138	0.339	1.429	0.718	1.440	0.890	1.429	0.899
120	1.110	0.370	1.400	0.820	1.420	0.960	1.418	0.926
125	1.072	0.381	1.376	0.883	1.400	1.020	1.401	1.024
130	1.019	0.412	1.351	0.946	1.350	1.080	1.383	1.123
135	0.972	0.497	1.301	0.997	1.310	1.143	1.366	1.221
140	0.947	0.594	1.251	1.047	1.245	1.180	1.327	1.288
145	0.931	0.667	1.178	1.069	1.180	1.178	1.289	1.355
150	0.912	0.731	1.105	1.090	1.100	1.165	1.250	1.422
155	0.893	0.790	0.990	1.069	1.030	1.140	1.202	1.413
160	0.869	0.831	0.875	1.048	0.940	1.110	1.153	1.403
165	0.828	0.862	0.780	0.987	0.850	1.070	1.105	1.394
170	0.781	0.884	0.685	0.925	0.750	1.030	1.061	1.350
175	0.747	0.877	0.664	0.904	0.700	0.990	1.016	1.306
180	0.713	0.845	0.642	0.882	0.667	0.950	0.972	1.262
185	0.663	0.818	0.620	0.861	0.665	0.910	0.904	1.201
190	0.615	0.790	0.598	0.840	0.660	0.860	0.837	1.139
195	0.580	0.732	0.587	0.794	0.650	0.810	0.769	1.078
200	0.536	0.649	0.576	0.748	0.630	0.750	0.692	0.939
205	0.484	0.565	0.551	0.684	0.600	0.670	0.616	0.799
210	0.468	0.483	0.525	0.620	0.550	0.600	0.539	0.660
215	0.495	0.400	0.503	0.535	0.510	0.500	0.501	0.557
220	0.515	0.321	0.481	0.450	0.480	0.400	0.463	0.455
225	0.503	0.241	0.487	0.344	0.460	0.300	0.425	0.352
230	0.497	0.152	0.493	0.238	0.470	0.190	0.412	0.191
235	0.526	0.073	0.529	0.134	0.490	0.100	0.398	0.031
240	0.562	0.003	0.565	0.030	0.530	0.010	0.385	-0.130
245	0.577	-0.088	0.607	-0.084	0.570	-0.090	0.346	-0.306
250	0.580	-0.198	0.649	-0.198	0.620	-0.200	0.307	-0.483
255	0.594	-0.288	0.676	-0.283	0.660	-0.320	0.268	-0.659

260	0.625	-0.368	0.702	-0.368	0.690	-0.450	0.232	-0.842
265	0.651	-0.491	0.711	-0.506	0.715	-0.575	0.197	-1.025
270	0.635	-0.644	0.719	-0.644	0.740	-0.700	0.161	-1.208

$$* [N_s] = (rpm \sqrt{m^3/s}) / (m^{0.75}); ** [n_s] = (rpm \sqrt{gpm}) / (ft^{0.75})$$

Tabla 4. Velocidades específicas utilizadas en el software Trans

## 7.2 Curvas Carga-Gasto para Cada Equipo de Bombeo

Se tomaron de la tabla 2 las cargas de bombeo contra las que cada equipo trabaja y posteriormente se seleccionaron los impulsores y en función a la carga que un solo impulsor proporciona, se buscó la cantidad de impulsores que cada equipo necesitaba para llegar a la carga de bombeo, así, se tabularon las gráficas carga gasto para cada modelo de bomba y cantidad de impulsores para extraer los polinomios necesarios para alimentar el modelo de simulación.

Es importante señalar que se supone un giro de la bomba a velocidad nominal. A continuación, se presenta una tabla donde se concentra la información correspondiente a los 16 equipos, el modelo, número de impulsores y los coeficientes del polinomio con los que se encontrará el punto de estabilidad en el sistema al estar todos los equipos de bombeo en funcionamiento.

Pozo	Modelo	No. de Impulsores	Coeficientes del Polinomio			
			$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$
40	10M700	2.0	139.72	-657.01	11040	-155248.00
41	10M700	2.1	147.73	-694.66	11673	-164144.00
39	10M700	2.0	120.74	-458.04	10282	-168955.00
19	10M700	2.1	126.25	-478.95	10751	-176668.00
18	8MC-6970	4.2	252.77	-8007	197086	-2000000.00
20	10M700	2.0	103.92	-294.99	8296.8	-172709.00
17	8MC-6970	3.7	217.71	-7089.5	180587	-2000000.00
153	8MC-6970	3.2	232.16	-10442	291568	-3000000.00
16	8MC-6970	3.2	229.26	-10311	287927	-3000000.00
21	8MC-6970	3.2	229.26	-10311	287927	-3000000.00
22	8MC-6970	3.2	229.26	-10311	287927	-3000000.00
26	8MC-6971	3.3	236.42	-10634	296925	-3000000.00
25	8MC-6972	3.7	217.71	-7089.5	180587	-2000000.00
23	8MC-6973	3.1	222.94	-10027	279987	-3000000.00
36	10M700	1.1	66.674	-252.93	5677.8	-93297.00
27	10M700	1.0	48.768	-138.44	3893.6	-81051.00

Tabla 5. Características de equipos de bombeo empleados en la red.

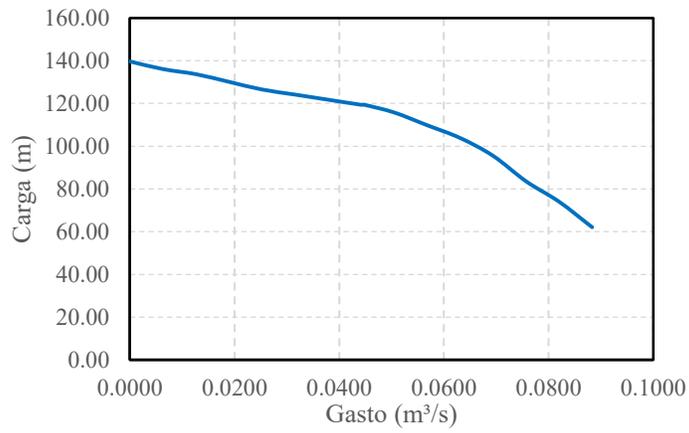


Figura 1. Curva Carga-Gasto para el Pozo 40.

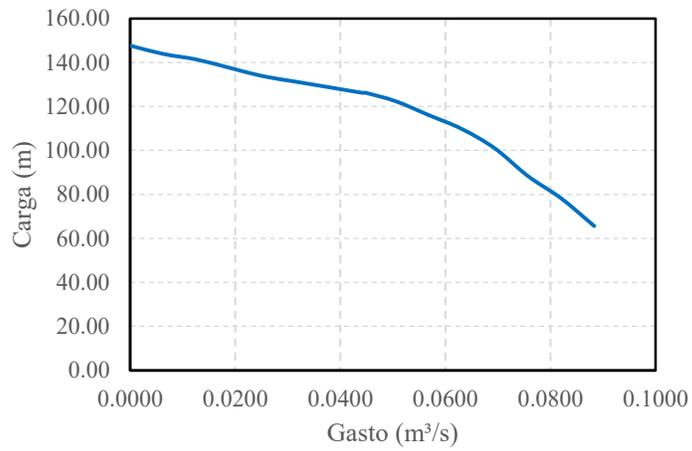


Figura 2. Curva Carga-Gasto para el Pozo 41.

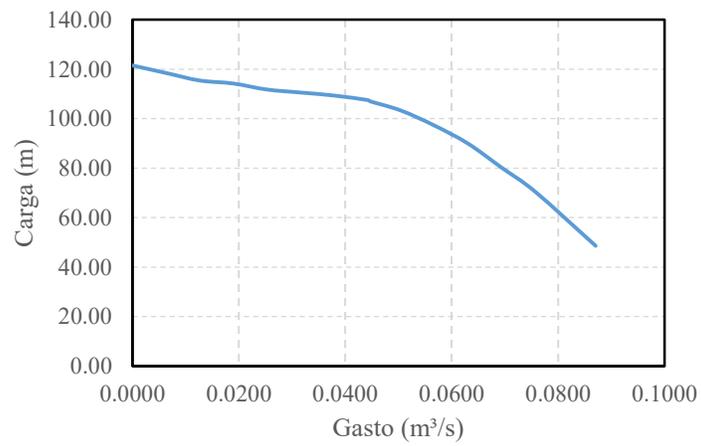


Figura 3. Curva Carga-Gasto para el Pozo 39.

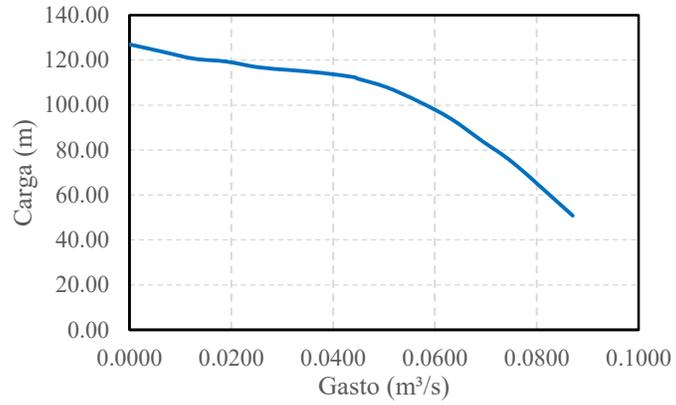


Figura 4. Curva Carga-Gasto para el Pozo 19.

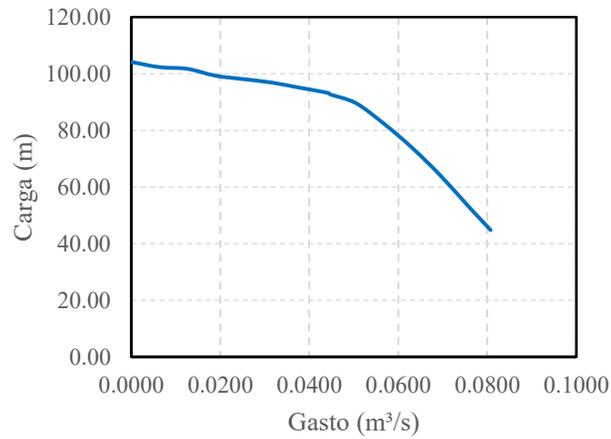


Figura 5. Curva Carga-Gasto para el Pozo 20.

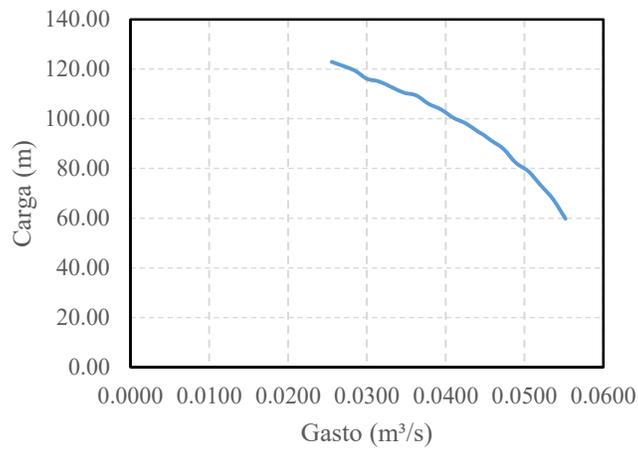


Figura 6. Curva Carga-Gasto para el Pozo 25.

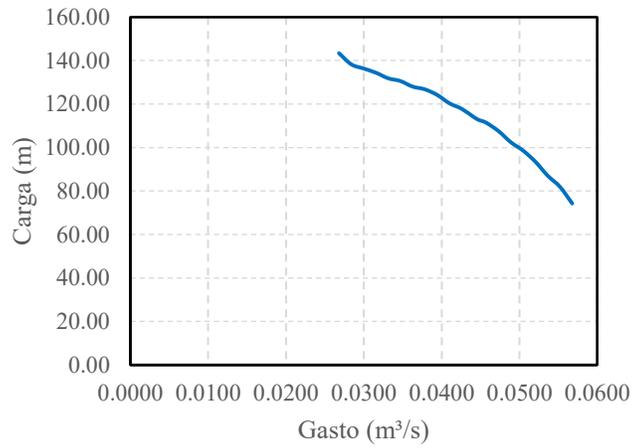


Figura 7. Curva Carga-Gasto para el Pozo 17.

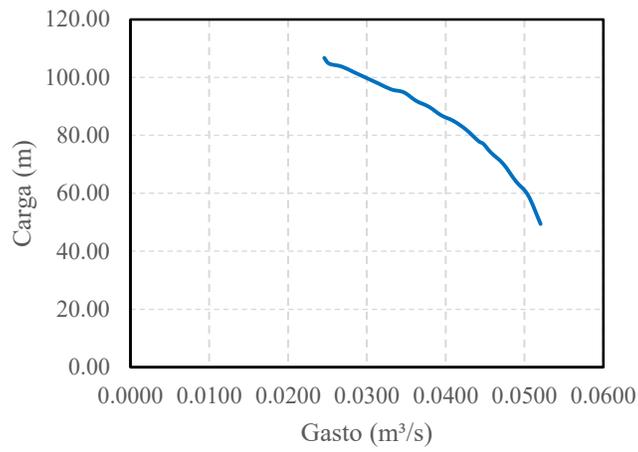


Figura 8. Curva Carga-Gasto para el Pozo 153.

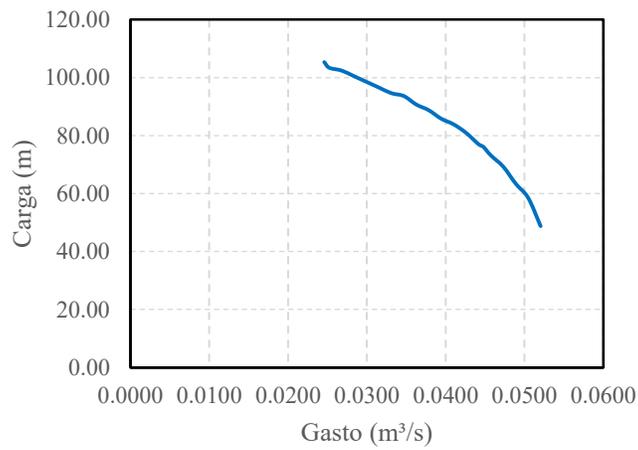


Figura 9. Curva Carga-Gasto para el Pozo 16.

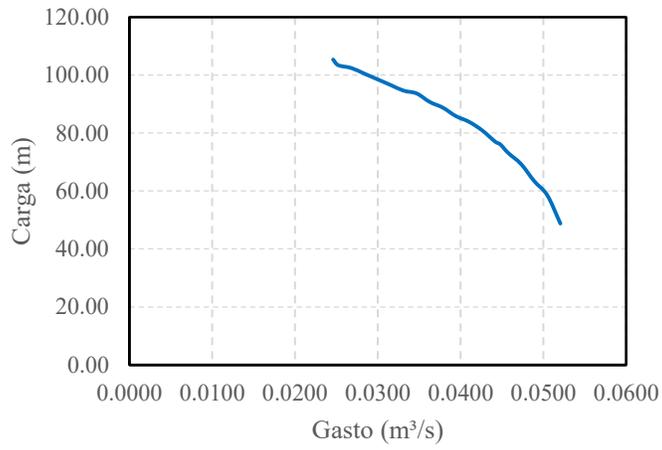


Figura 10. Curva Carga-Gasto para el Pozo 21.

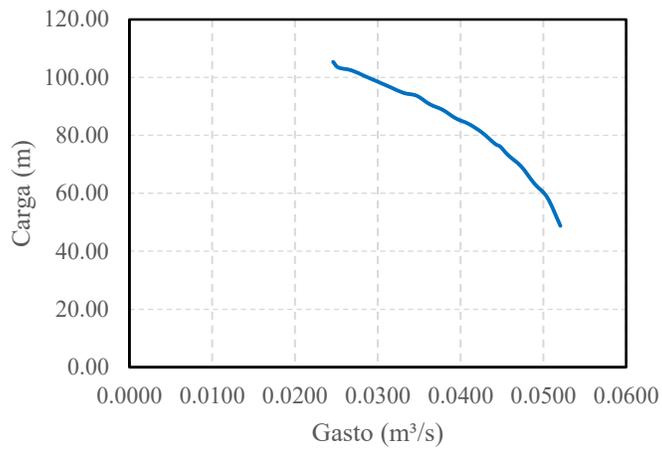


Figura 11. Curva Carga-Gasto para el Pozo 22.

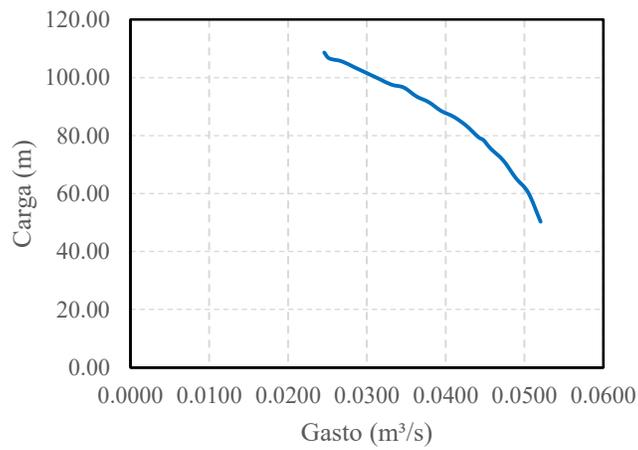


Figura 12. Curva Carga-Gasto para el Pozo 26.

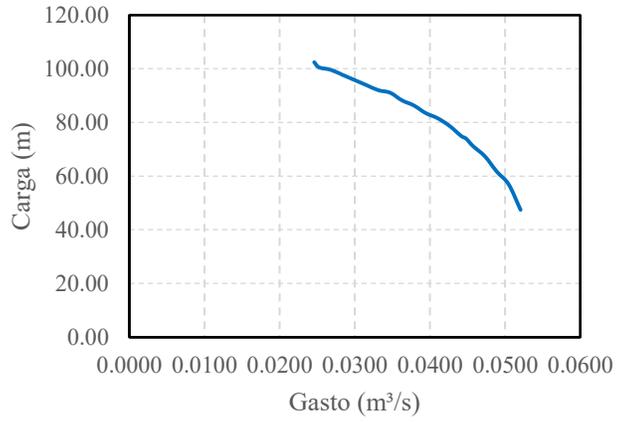


Figura 13. Curva Carga-Gasto para el Pozo 25.

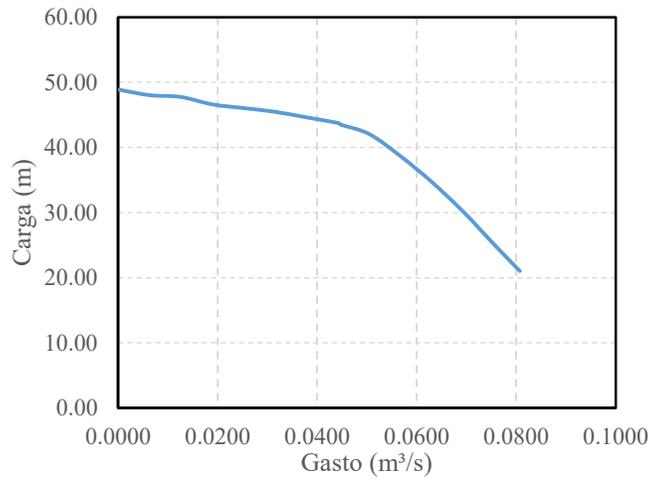


Figura 14. Curva Carga-Gasto para el Pozo 27.

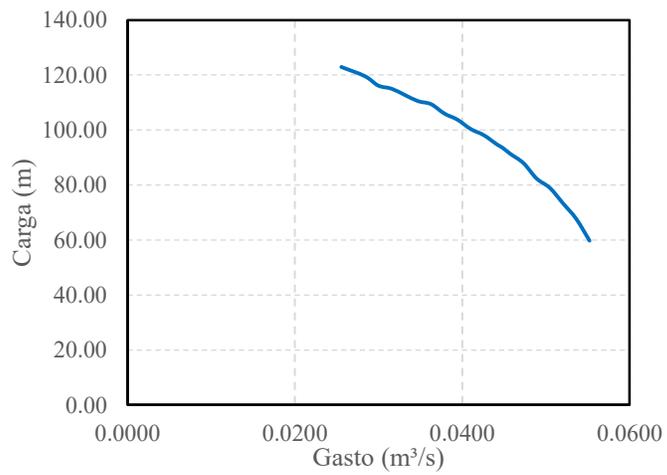


Figura 15. Curva Carga-Gasto para el Pozo 36.

### 7.3 Análisis del Paro Súbito Simultáneo del Sistema

Inmediatamente después del paro súbito de las bombas se generarán ondas de depresión en todas las tuberías de descarga de los pozos que se propagarán a partir de su punto de origen hasta el punto de descarga y viceversa hasta que el sistema alcance una nueva condición de equilibrio. Para evitar que la presión baje hasta valores que pongan en riesgo la tubería o el agua llegue a la presión de vapor y cree separación de columna, se debe limitar la amplitud de las ondas por supresión mediante la inyección del volumen del fluido almacenado en la cámara de aire, desplazado por el aire que se expande.

Posterior al efecto de presión negativa que el paro ocasiona, se presentan un pico de sobrepresión que podrá ocasionar falla de las tuberías y colapso en los equipos de bombeo, por lo que fue necesario implementar orificios diferenciales para disipar energía en el flujo que ingresa a las cámaras de aire. Estas cámaras de aire se dimensionaron mediante iteraciones de simulación y observación del comportamiento en las cargas para cada interconexión y en el ramal principal.

Consideraciones de diseño de las cámaras de aire:

- La distancia entre el nivel del terreno natural y la parte inferior de la cámara de aire es igual a un metro.
- El nivel del agua en las cámaras durante la operación a flujo establecido debe estar en el intervalo  $\pm 30$  cm, a partir del nivel de diseño.
- El nivel mínimo del agua en las cámaras durante el transitorio debe estar por lo menos 30 cm arriba de la cota inferior del cilindro.
- La velocidad en la tubería de la conexión de la cámara de aire al pozo debe estar en un rango de 0.7 a 4 m/s.
- Los diámetros de las cámaras de aire son de 48 o 60 pulgadas.

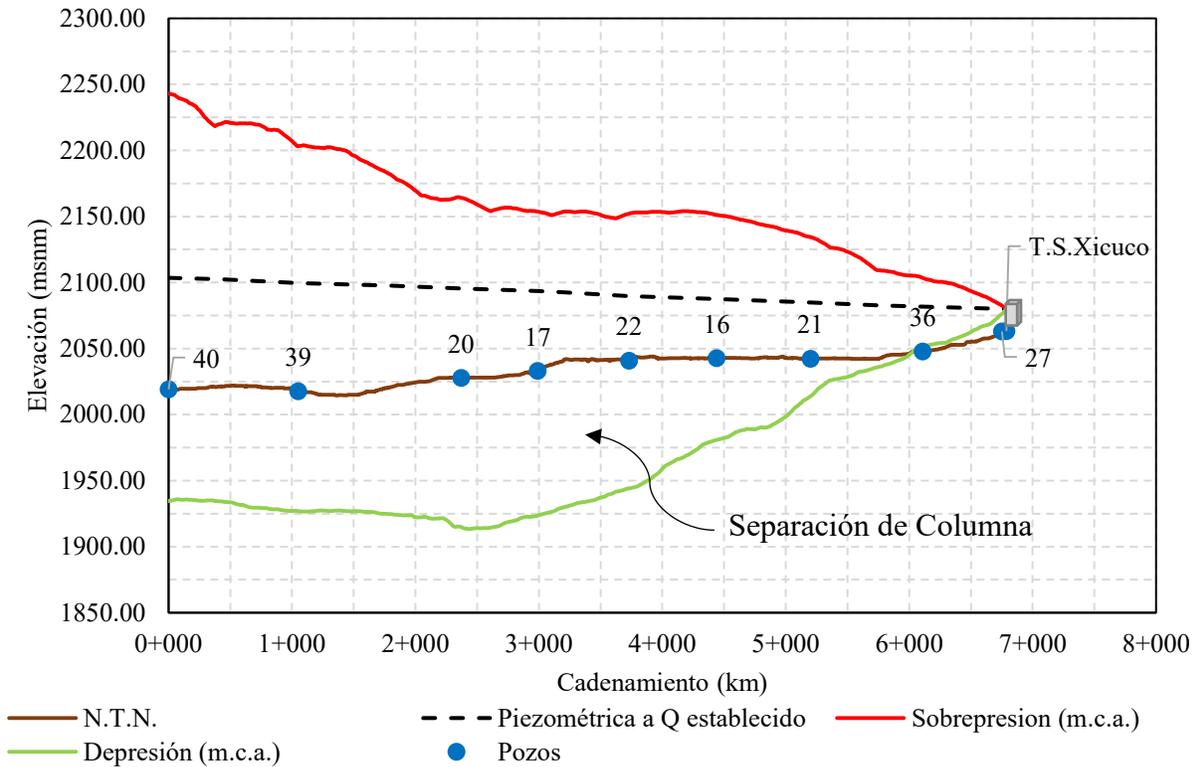


Figura 23. Envolventes de presiones máximas y mínimas sin dispositivos de control.

En la Fig. 22 se muestran las envolventes de presiones mínimas y máximas que se presentaron durante el transitorio generado por el paro súbito y simultáneo de los 16 equipos de bombeo sin ningún dispositivo de protección que pueda mitigar las ondas de presión máximas y mínimas, la piezométrica de operación a flujo establecido y la topografía del terreno del ramal principal del pozo 40 al Tanque Xicuco.

En toda la conducción podemos observar que se presentan supresiones mayores a las permisibles para que el fluido no alcance la presión de vapor. Si esto no se controla, puede producir la separación de la columna líquida, desajuste en juntas y la posibilidad de un colapso en la tubería.

La propuesta de localización de cámaras de aire se puede consultar en la figura 7, donde esquemáticamente se muestra que pozos cuentan con cámara de aire a 5 metros aguas abajo de su tren de descarga. La tabla 3 muestra las dimensiones y niveles de cada una de ellas.

### 7.3.1 Dispositivos Propuestos

A continuación, y de acuerdo a la Tabla 5. Dimensionamiento de cámaras de aire propuestas. se mostrarán los esquemas para cada una de las cámaras de aire propuestas dentro de la red de pozos.

ID	Cadenamient	Cota Inferior del Cilindro	Díámetro	Área	Volumen de Aire	Cota de agua en la cámara	H de aire	H de agua	Altura de Cámara	Relación de Esbeltez	Cota Superior de la Cámara
De la Cámara	o (km)	(msnm)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m <sup>3</sup> )	(msnm)	(m)	(m)	(m)		(msnm)
40	0+010	2020.22	1.52	3.63	5.00	2022.54	1.38	2.32	3.70	2.43	2023.92
39	0+005	2018.64	1.52	1.82	2.00	2020.74	1.10	2.10	3.20	2.10	2021.84
19	0+005	2016.00	1.52	1.82	2.00	2018.10	1.10	2.10	3.20	2.10	2019.20
17	0+005	2035.03	1.22	1.17	1.00	2036.37	0.86	1.34	2.20	1.80	2037.23
153	0+010	2043.00	1.22	1.17	1.00	2045.04	0.86	2.04	2.90	2.38	2045.90
22	0+005	2043.01	1.22	1.17	1.00	2044.35	0.86	1.34	2.20	1.80	2045.21
26	0+010	2031.00	1.22	1.17	1.00	2032.34	0.86	1.34	2.20	1.80	2033.20
23	0+005	2038.36	1.22	1.17	1.00	2039.70	0.86	1.34	2.20	1.80	2040.56

*Tabla 5. Dimensionamiento de cámaras de aire propuestas.*

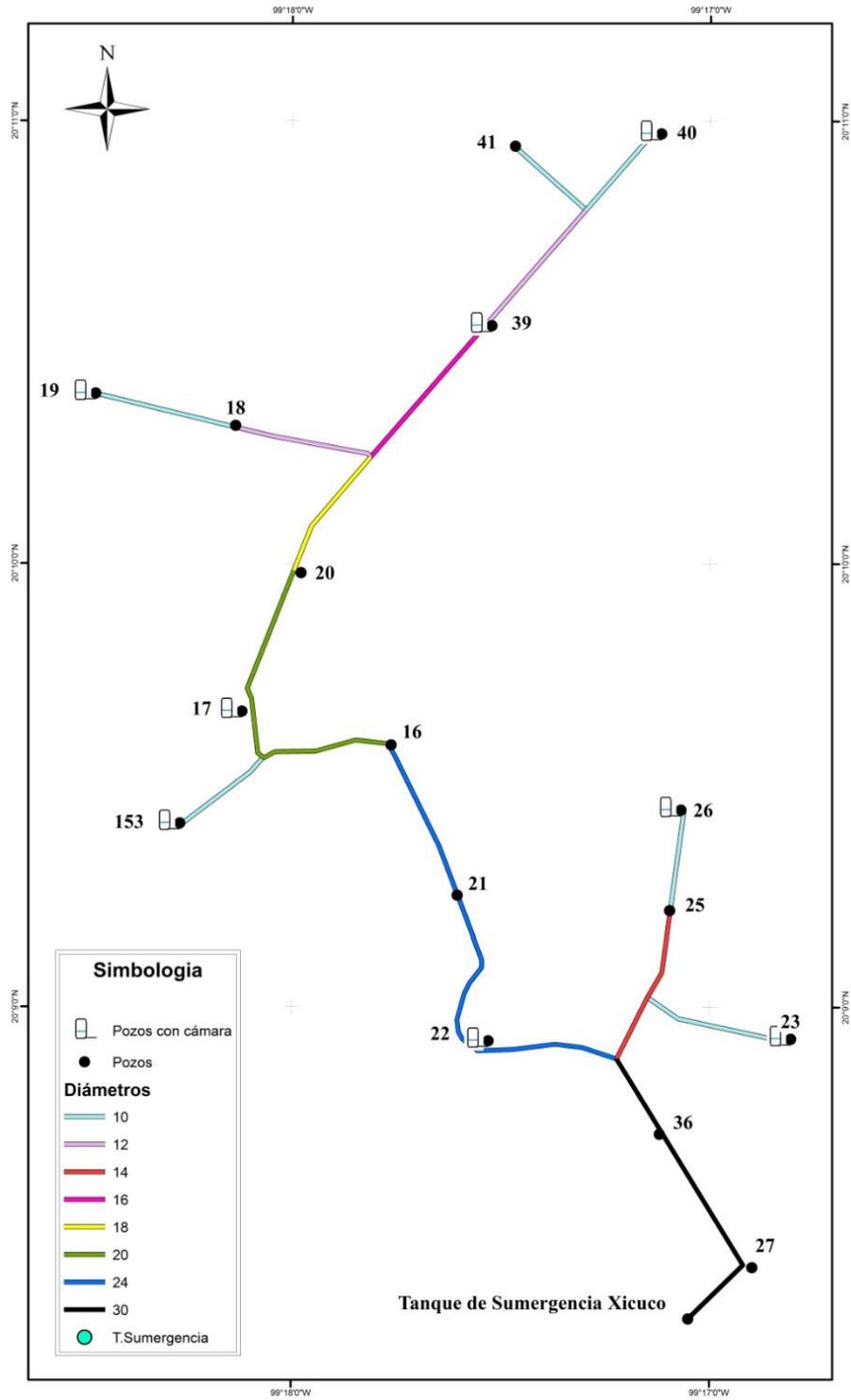


Figura 24. Ubicación de cámaras de aire en la red.

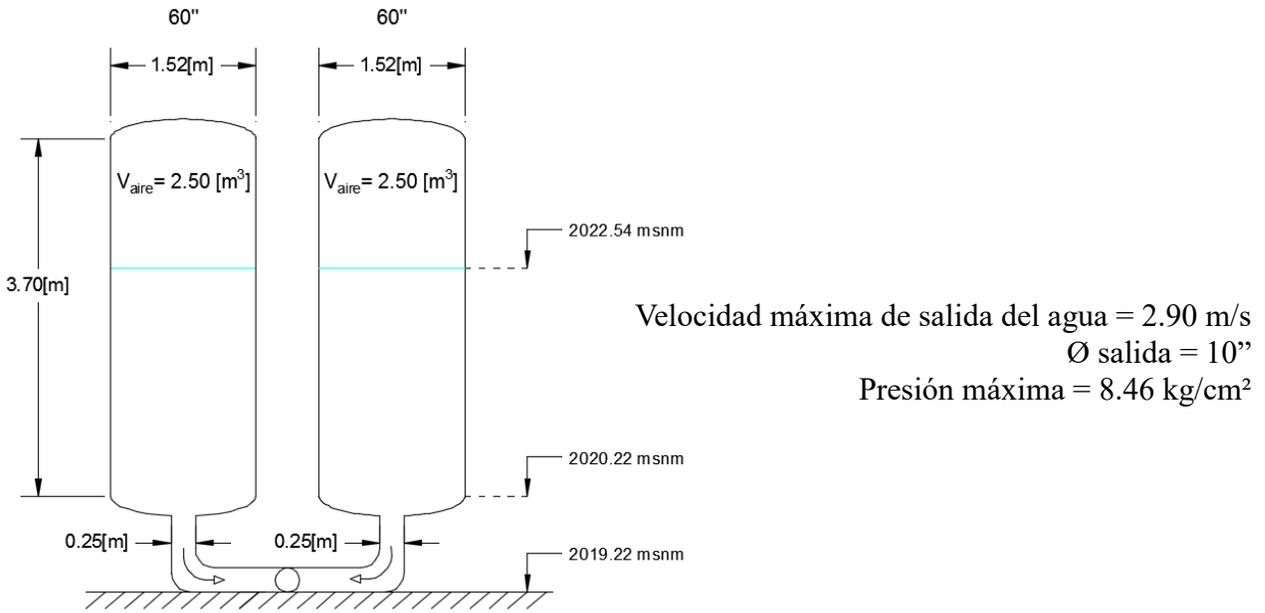


Figura 16. Características de las cámaras de aire correspondiente al Pozo 40

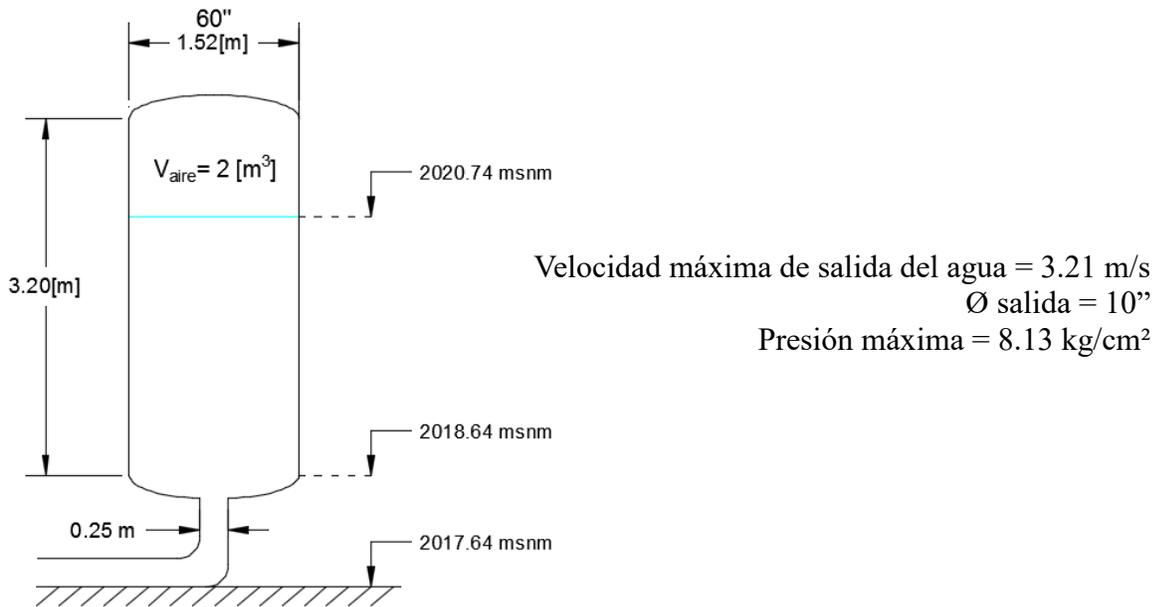
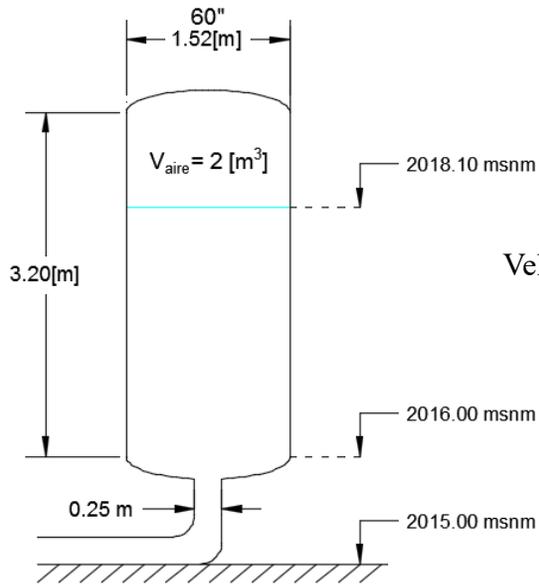
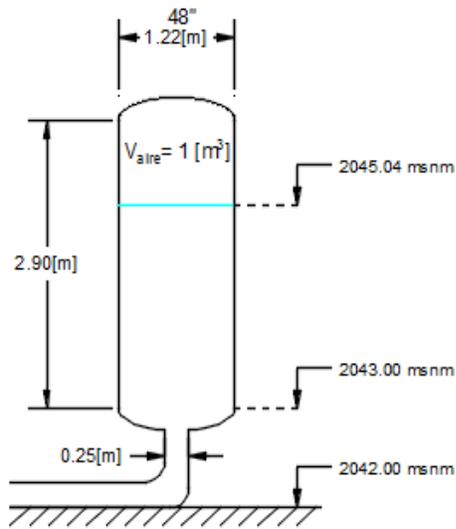


Figura 17. Características de las cámaras de aire correspondiente al Pozo 39



Velocidad máxima de salida del agua = 1.83 m/s  
 $\varnothing$  salida = 10"  
 Presión máxima = 8.80 kg/cm<sup>2</sup>

Figura 18. Características de las cámaras de aire correspondiente al Pozo 19



Velocidad máxima de salida del agua = 1.56 m/s  
 $\varnothing$  salida = 10"  
 Presión máxima = 6.63 kg/cm<sup>2</sup>

Figura 19. Características de las cámaras de aire correspondiente al Pozo 153

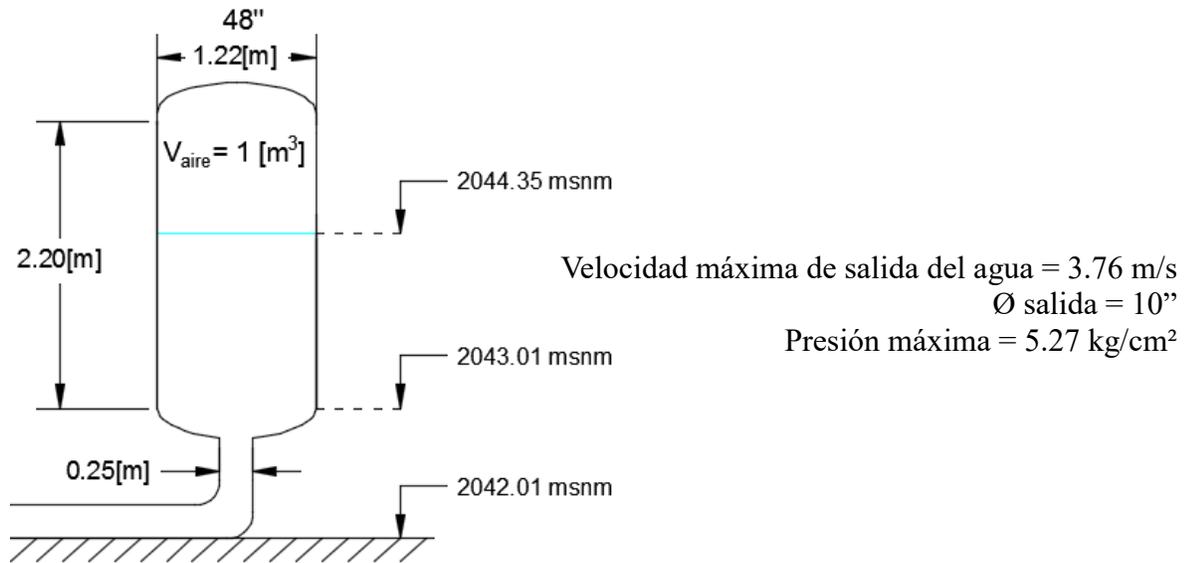


Figura 20. Características de las cámaras de aire correspondiente al Pozo 22

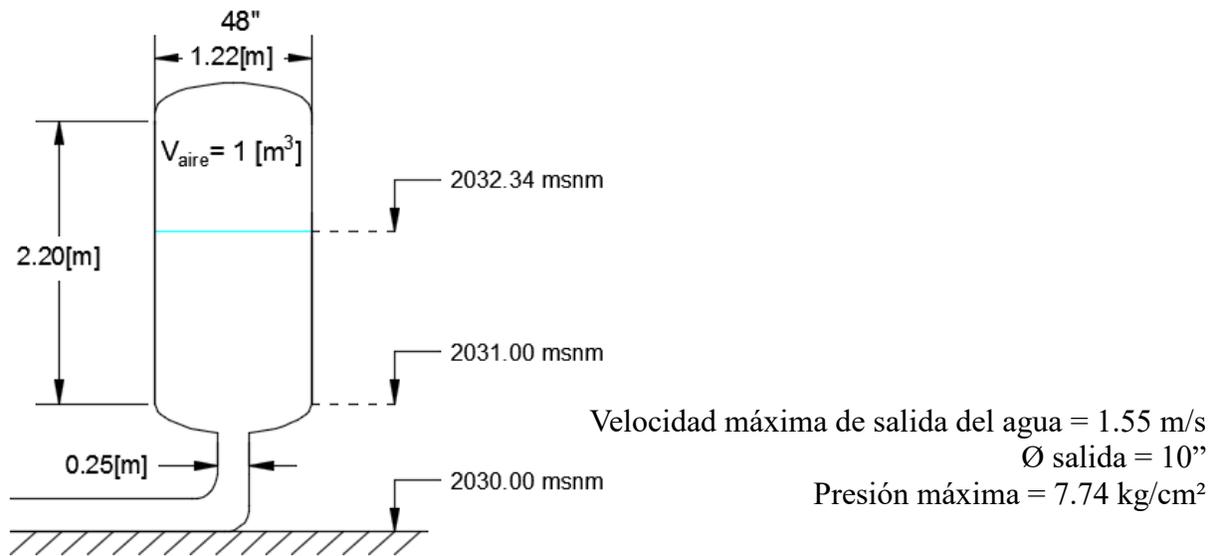
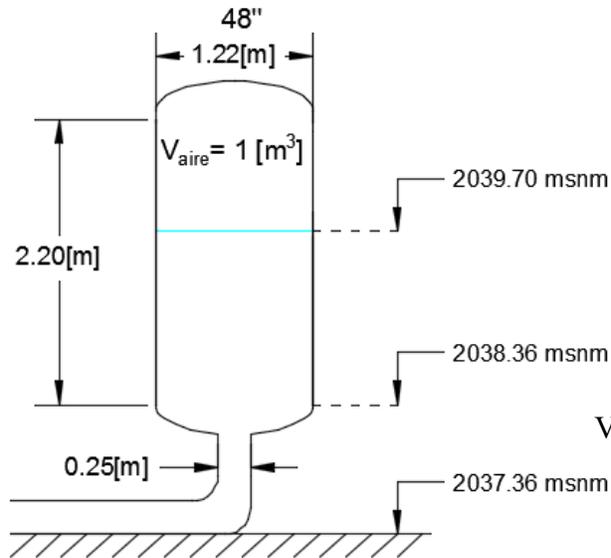
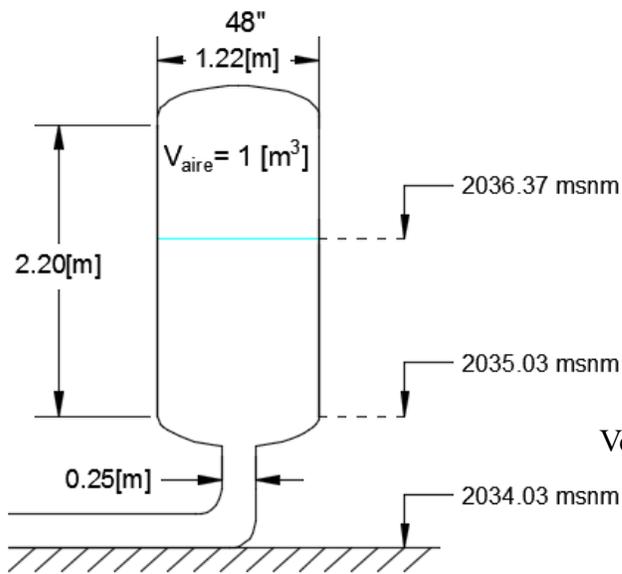


Figura 21. Características de las cámaras de aire correspondiente al Pozo 26



Velocidad máxima de salida del agua = 1.16 m/s  
 $\text{Ø salida} = 10''$   
 Presión máxima = 6.31 kg/cm<sup>2</sup>

Figura 22. Características de las cámaras de aire correspondiente al Pozo 23



Velocidad máxima de salida del agua = 3.25 m/s  
 $\text{Ø salida} = 10''$   
 Presión máxima = 5.89 kg/cm<sup>2</sup>

Figura 23. Características de las cámaras de aire correspondiente al Pozo 17

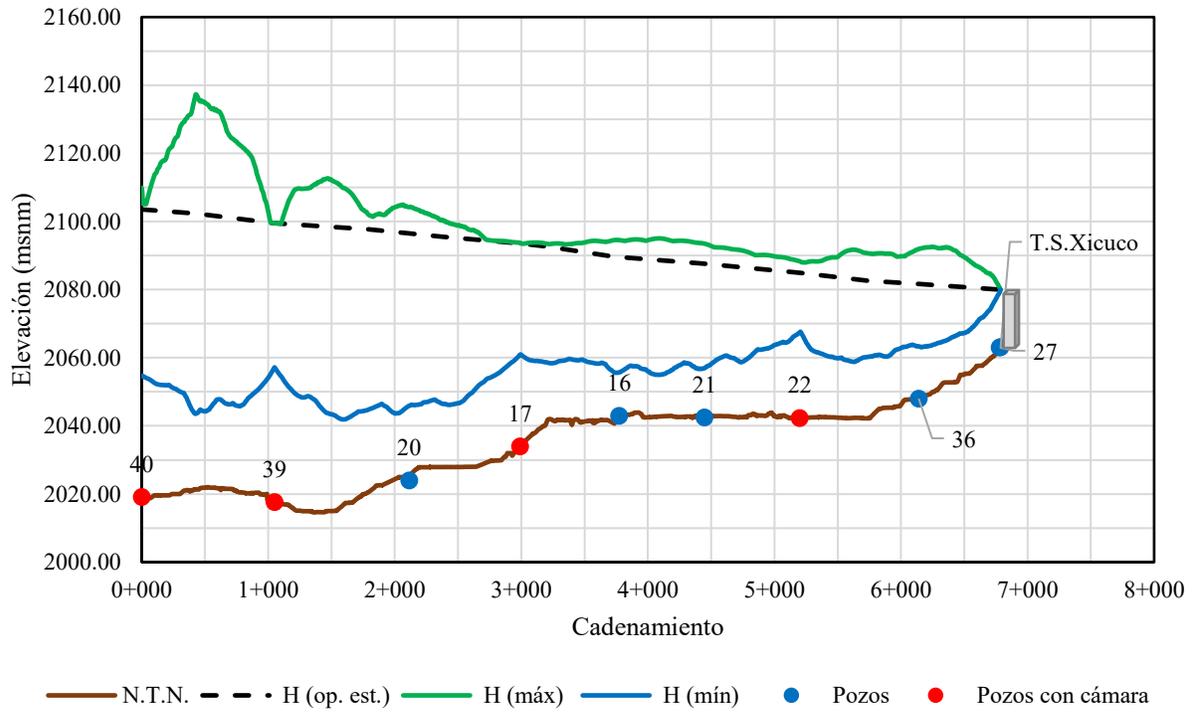


Figura 25. Envolturas de presiones máximas y mínimas del transitorio controlado del pozo 40 al tanque de entrega.

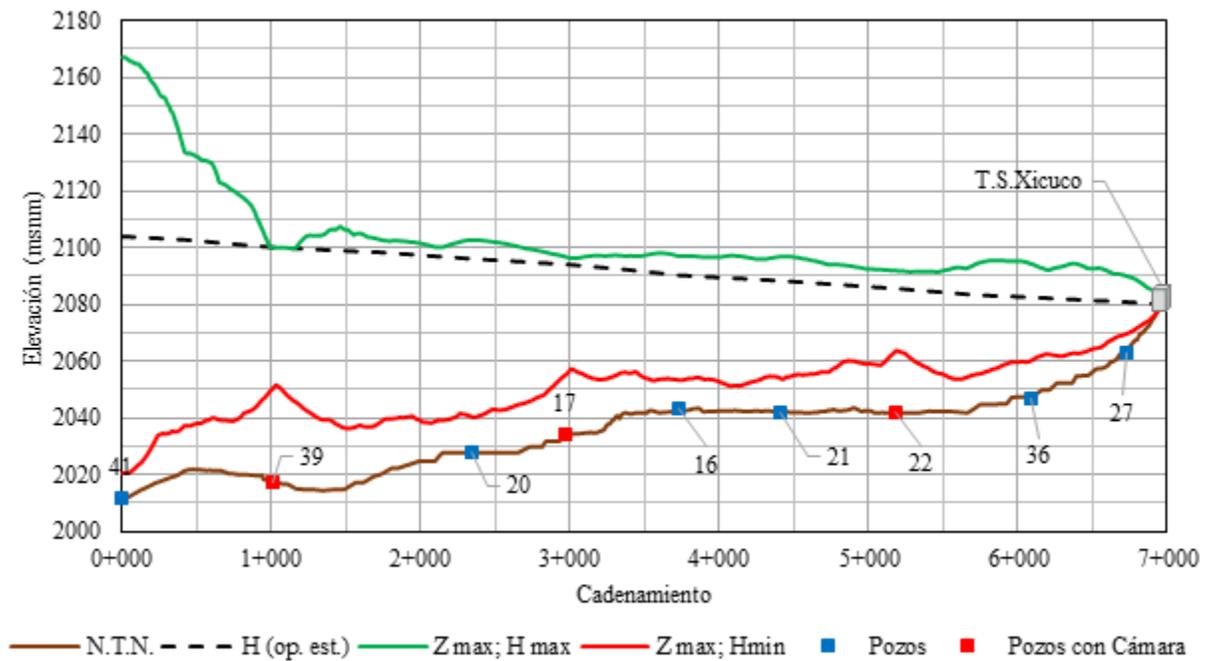


Figura 26. Envolturas de presiones máximas y mínimas del transitorio controlado del pozo 41 al tanque de entrega.

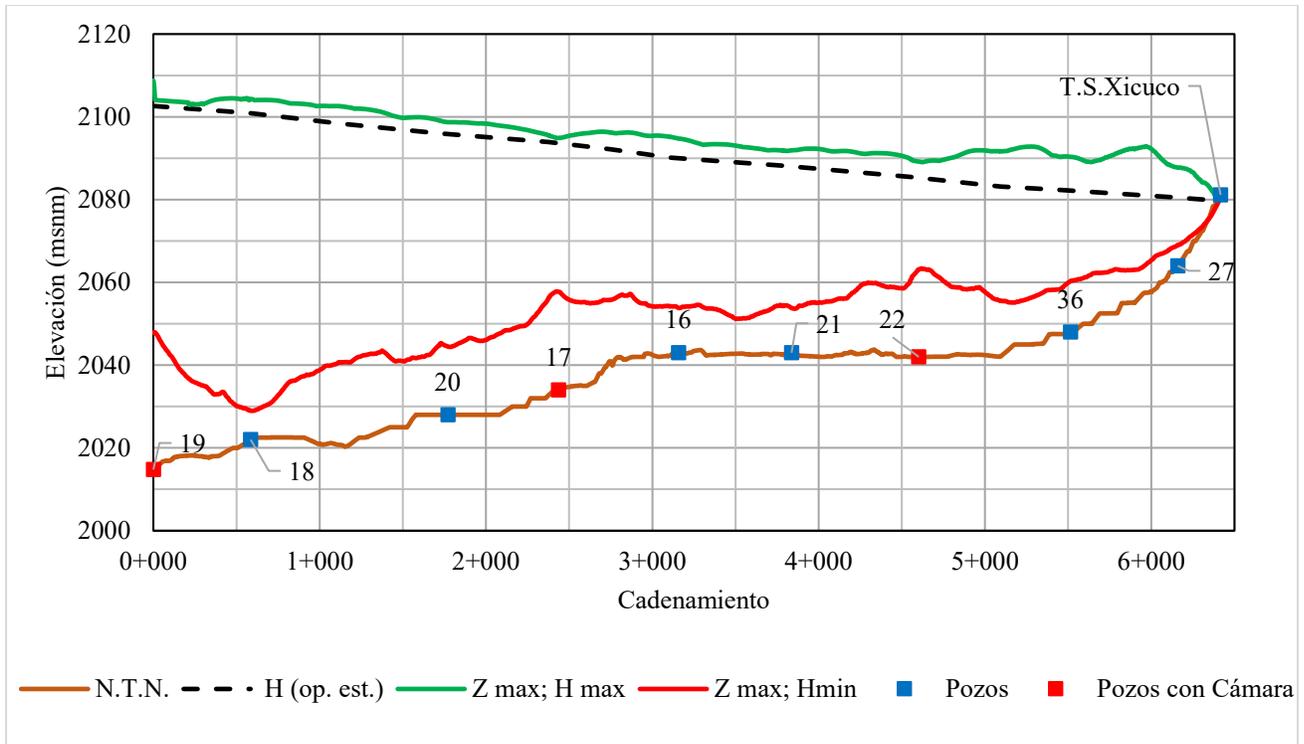


Figura 27. Envolturas de presiones máximas y mínimas del transitorio controlado del pozo 19j al tanque de entrega.

Se puede observar en la figura 24 que las envolturas de presión, tanto máxima como mínima, han sido controladas, tal que la línea no ha de correr riesgo de colapso, rotura o daños a los equipos de bombeo. La presión se ha reducido de un máximo de 22 bar a 12 bar, estando dentro del rango de resistencia de la tubería. Las presiones negativas en el caso del paro de equipos de bombeo sin protección, llegan a la presión de vapor, lo que podría dañar los sellos de las bombas o crear el colapso de cavidades a lo largo de la línea, dañando las paredes de la misma. En la figura 25 podemos observar el comportamiento de las presiones con y sin cámara de aire.

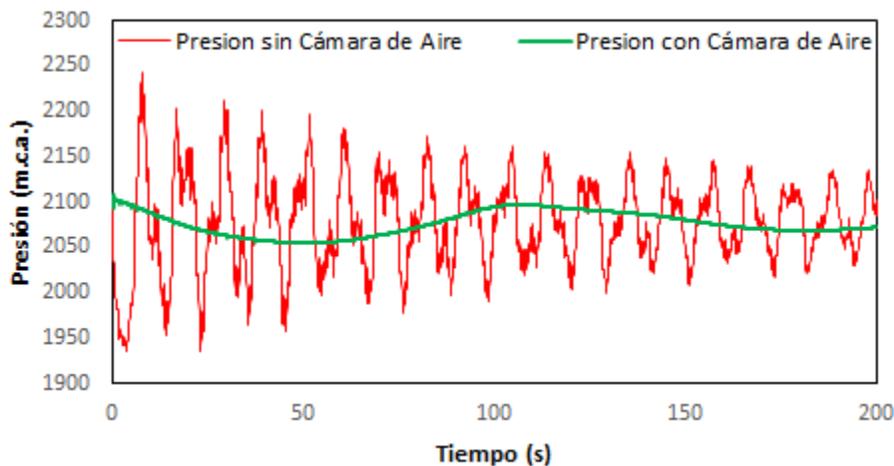


Figura 28. Variación de presiones a la descarga del pozo 40 ante el paro de equipos de bombeo.

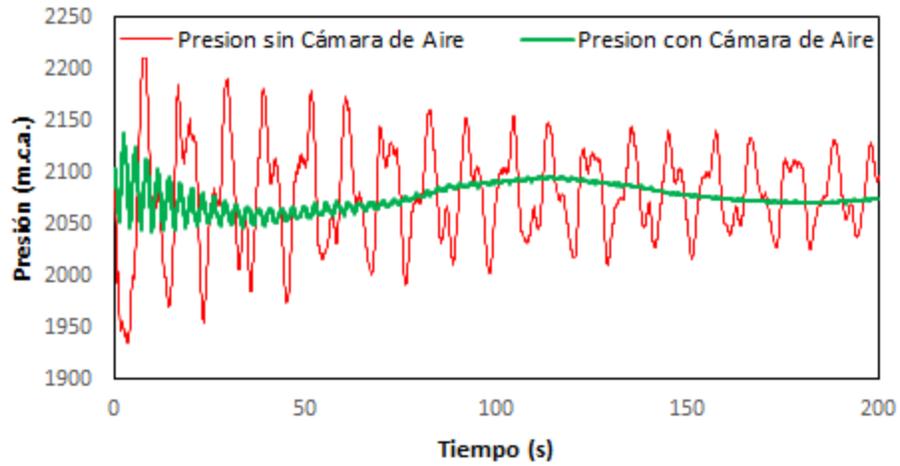


Figura 29. Variación de presiones a la descarga del pozo 41 ante el paro de equipos de bombeo.

La figura 28 muestra que, a pesar de que el equipo de bombeo no cuenta con cámara de aire a su descarga, éste recibe los efectos de las otras cámaras de aire colocadas en el sistema y las presiones máximas y mínimas son mitigadas.

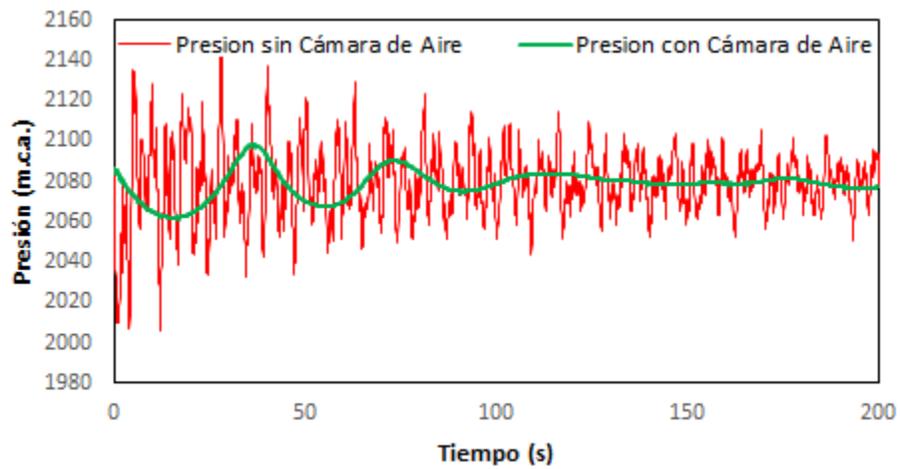


Figura 30. Variación de presión a la descarga del pozo 26 ante el paro de equipos de bombeo.

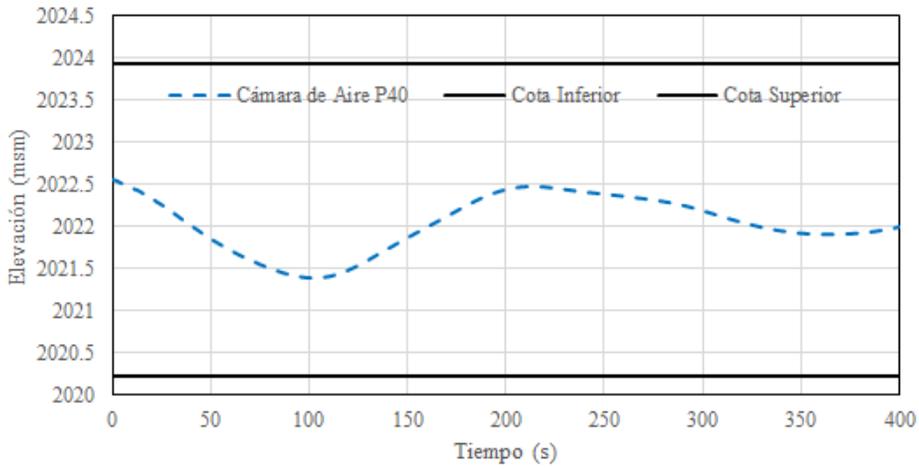


Figura 31. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 40 ante el paro de equipos de bombeo.

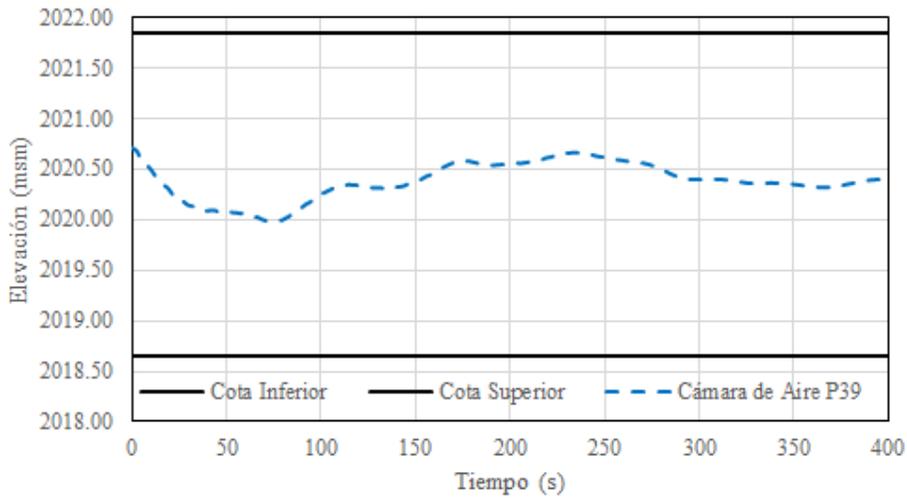


Figura 32. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 39 ante el paro de equipos de bombeo.

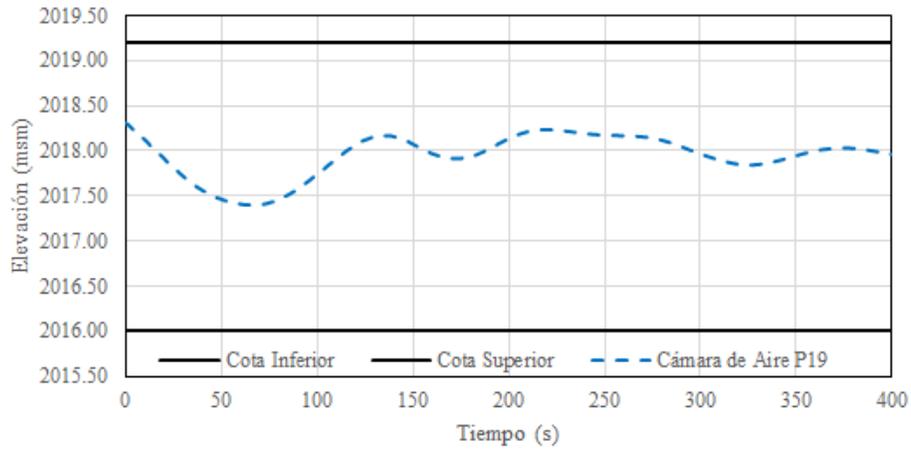


Figura 33. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 19 ante el paro de equipos de bombeo.

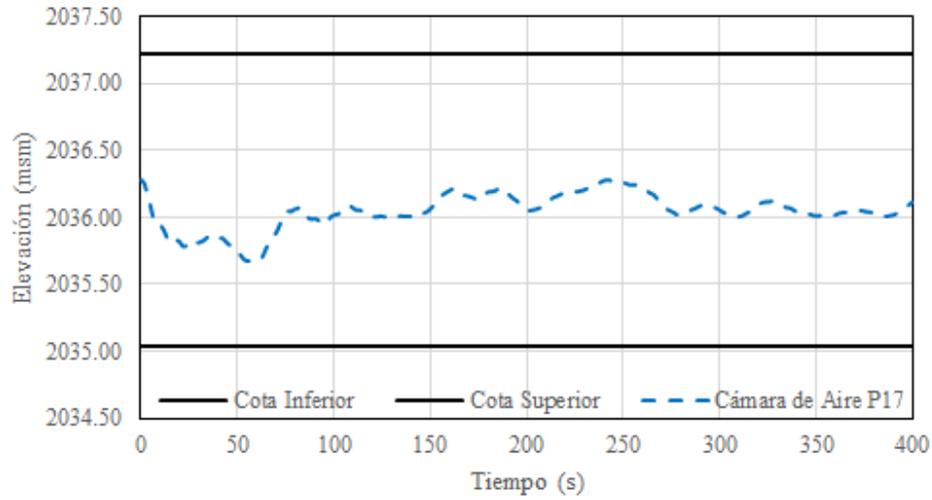


Figura 34. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 17 ante el paro de equipos de bombeo.

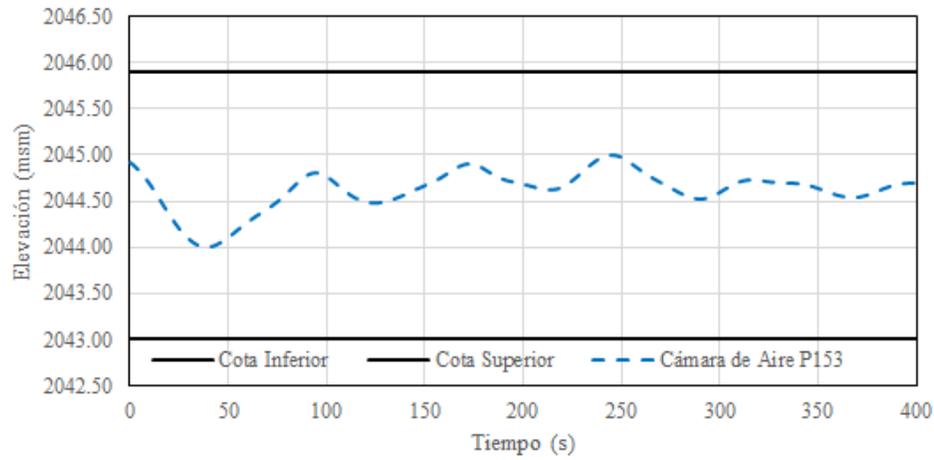


Figura 35. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 153 ante el paro de equipos de bombeo.

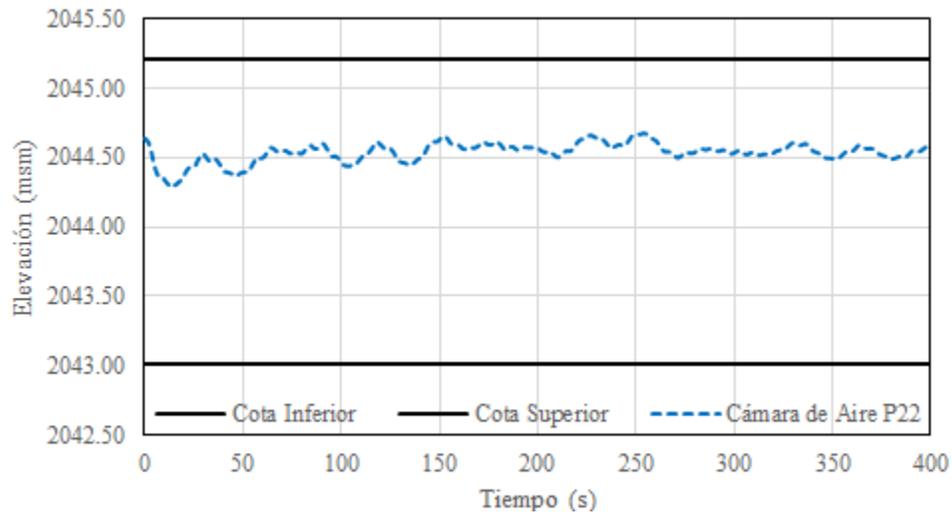


Figura 36. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 26 ante el paro de equipos de bombeo.

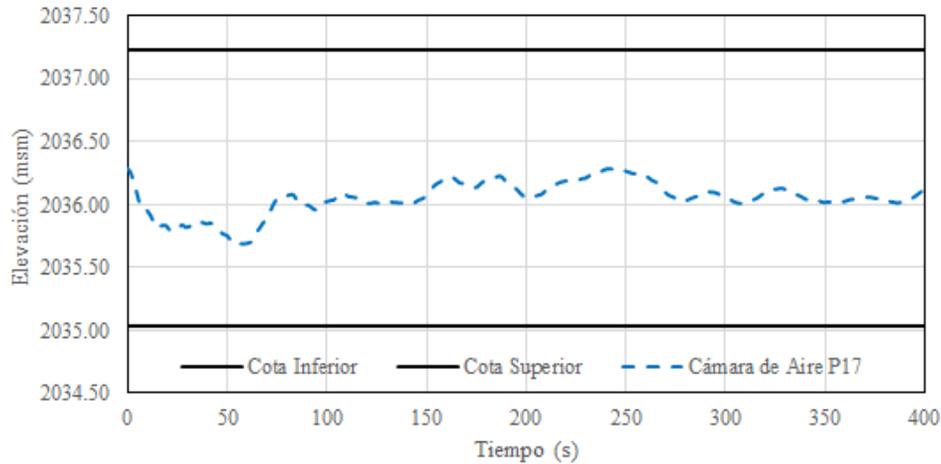


Figura 37. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 22 ante el paro de equipos de bombeo.

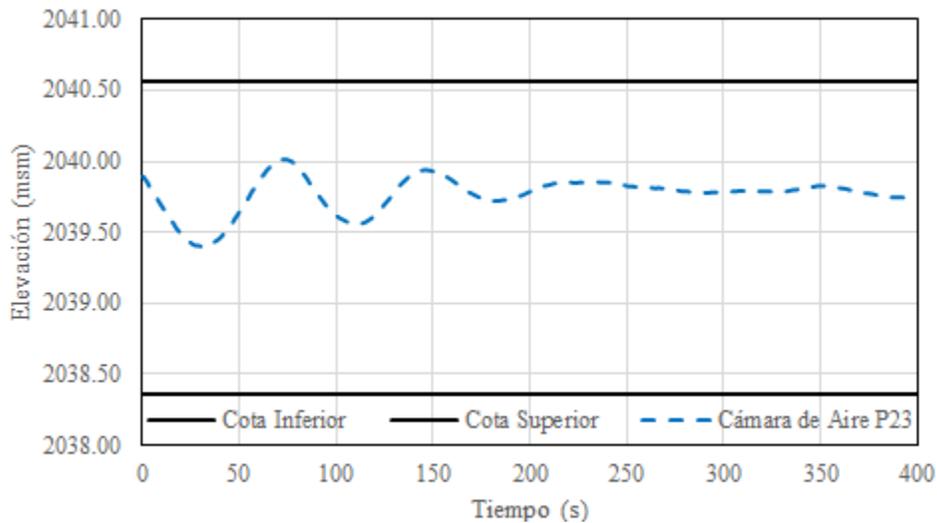


Figura 38. Oscilación en el nivel de agua en la cámara de aire 23 ante el paro de equipos de bombeo.

#### 7.4 Análisis del Arranque de los Equipos de Bombeo.

Como condición inicial al arranque en los equipos de bombeo, el tirante de agua contenido en las cámaras de aire (tabla 6) debe corresponder al valor final después del paro de equipos de bombeo en la red.

Después de modelar el arranque de las bombas, con una secuencia definida, deberán revisarse los niveles de aire en las cámaras para, de ser necesario, ajustarlos a los niveles definidos en la tabla 6 para protección de la red contra disparo de bombas. La secuencia propuesta se determinó en función a diversas iteraciones en la simulación del modelo, ajustando tiempo de arranque entre cada equipo, curvas carga-gasto y comportamiento de presiones en el sistema, quedando la secuencia como la siguiente:

<b>Orden de Arranque</b>	<b>Pozo</b>	<b>Instante de Arranque (s)</b>
1	27	0
2	36	40
3	23	90
4	25	150
5	26	200
6	22	250
7	21	300
8	16	350
9	153	400
10	17	450
11	20	500
12	18	550
13	19	600
14	39	650
15	41	700
16	40	750

*Tabla 6. Secuencia de arranque de equipos de bombeo en la red.*

Al simular el arranque de cada equipo con el intervalo de tiempo mencionado en la tabla 6, obtuvimos como resultado que las envolventes de presiones máxima y mínima tienen un comportamiento adecuado, aun en el instante en el que un equipo está trabajando en su punto de operación y otro equipo es encendido. Es importante mencionar que todos los equipos de bombeo arrancan a tensión plena.

Cuando una bomba arranca, la presión en la descarga aumenta, enviando una onda de presión positiva (la cual aumenta la presión) a lo largo de la conducción hasta el punto de entrega o descarga. El pico resultante puede colapsar la tubería si ésta no cuenta con la cédula que soporte dicha sobrepresión. Cuando la onda de presión positiva alcanza el punto final de la conducción se convierte en onda de presión negativa de regreso al punto inicial, induciendo el sistema a cavitación.

Los equipos de bombeo son los elementos que aportan la energía suficiente para vencer las pérdidas de carga locales y por fricción dentro de una conducción, así como también la diferencia de alturas entre los puntos entre los que se pretende conducir el líquido. Éstas fuerzan al fluido a circular en un determinado sentido. Las bombas más utilizadas en los sistemas de bombeo convencionales son las centrífugas y las axiales.

Después de un paro súbito en el sistema de pozos es necesario ponerlo en marcha nuevamente. Es sabido que este sistema cuenta ya con cámaras de aire que ayudaron a mitigar las presiones que se presentaron en durante el paro de los equipos de bombeo, por lo que el análisis de arranque contempla que la inclusión de las cámaras no deberá provocar perturbaciones o comportamientos indebidos en el sistema, así como también el comportamiento del aire en las cámaras deberá ser adecuado.

Un sistema hidráulico puede ser analizado en su arranque estando vacío o lleno, en este último escenario, que es el planteado para este análisis, deberá generarse la presión suficiente para acelerar el fluido que se encuentra dentro de la tubería. Cuando el flujo alcanza su valor óptimo, la presión mostrará un decremento hasta llegar al punto de la curva donde la bomba alcance el punto de operación.

Ser capaz de predecir el rendimiento de un bombeo durante su ciclo de arranque tiene distintas ventajas. Entre ellas, el tener arranques más fiables, torque de arranque óptimo y un riesgo mínimo de sobrecarga para el motor. Por lo tanto, el análisis de los sistemas de bombeo en su ciclo inicial es considerado como una buena práctica en la ingeniería que se ejecuta mediante la realización de cálculos de inicio utilizando modelos matemáticos precisos que determinarán presiones óptimas y gastos en el arranque. Estas bombas pueden impulsar un caudal mayor a medida que disminuye la resistencia o diferencia de altura que deben vencer.

El arranque de una bomba es una maniobra programada que ha sido diseñada para realizarse de manera paulatina, así que jamás debería producirse de manera abrupta, brusca 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. En este caso, como existen equipos de bombeos aislados y dispersos en planta, cada uno debe arrancar de tal manera que en conjunto no dañen al sistema, por lo que a partir de la curva descrita en la figura 4 se obtuvieron diversos polinomios de tercer grado que se necesitan para modelar el comportamiento de cada bomba y de toda la red funcionando simultáneamente.

$$H = a_0 + a_1Q + a_2Q^2 + a_3Q^3 \dots (18)$$

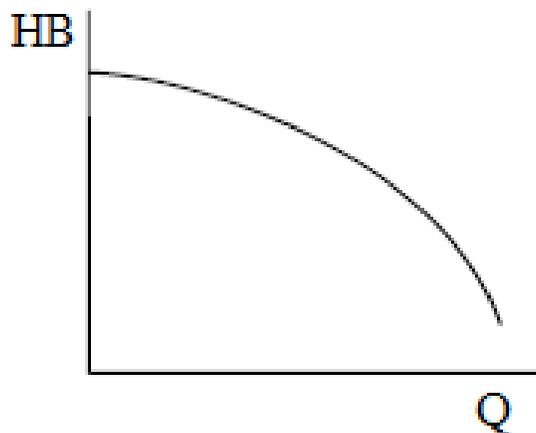


Figura 39. Curva tipo, Carga –Gasto.

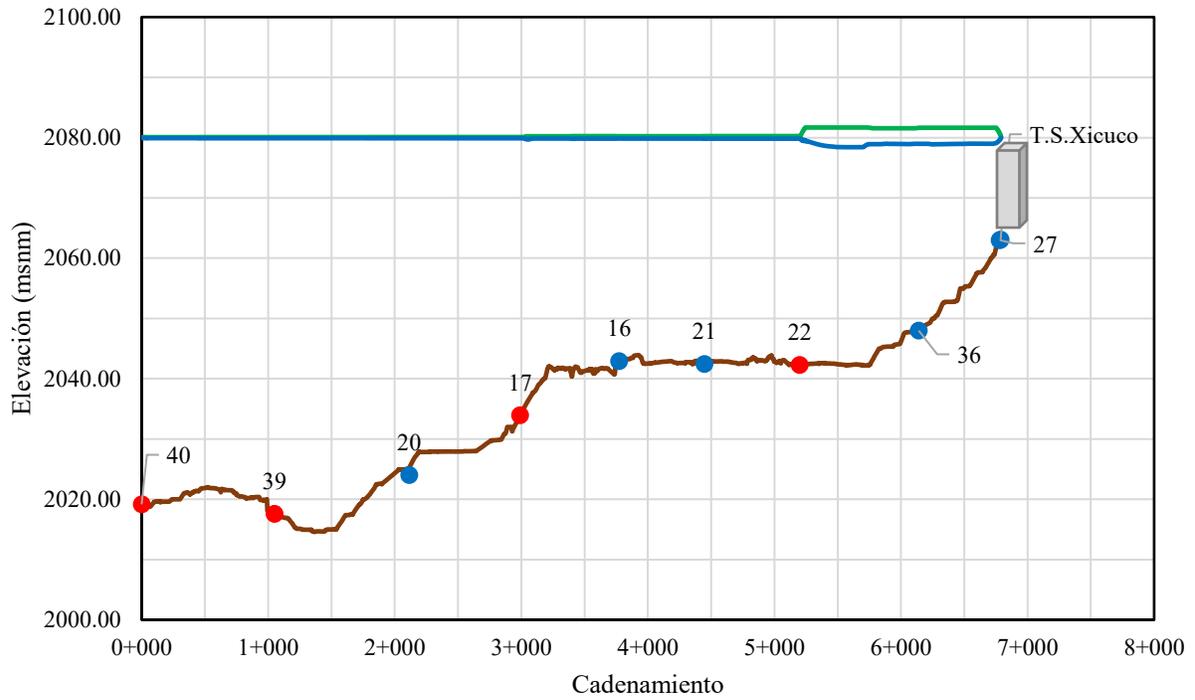


Figura 4041. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 27.

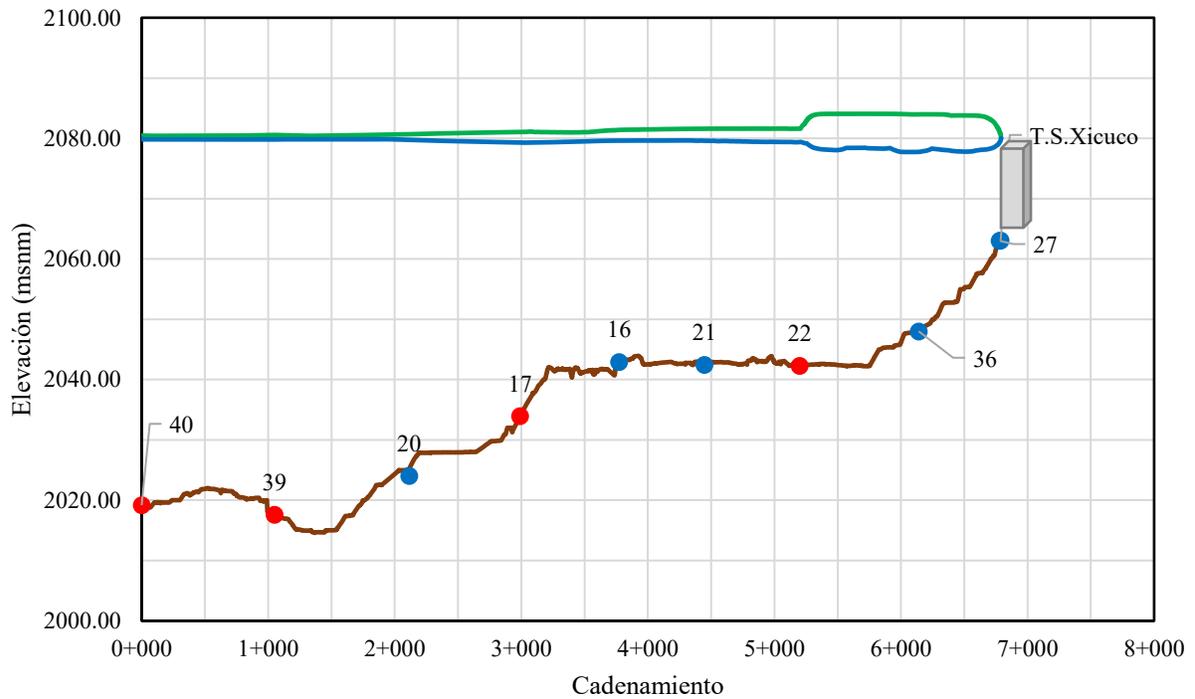


Figura 42. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 36.

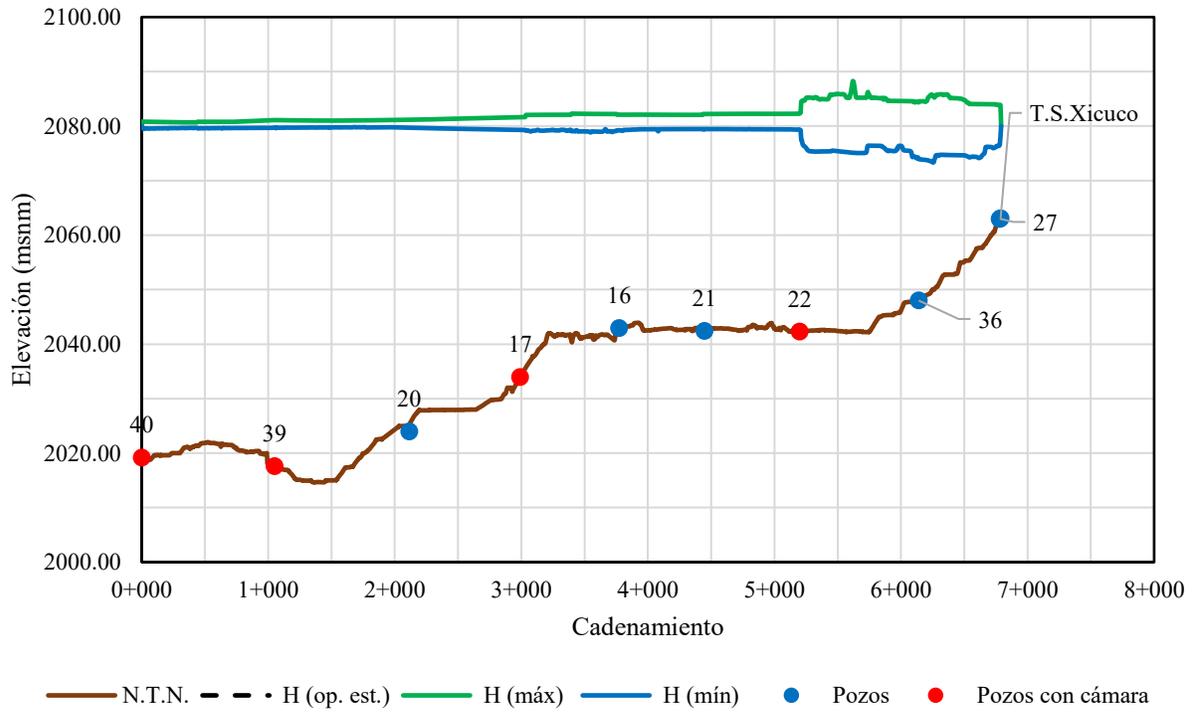


Figura 43. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22.

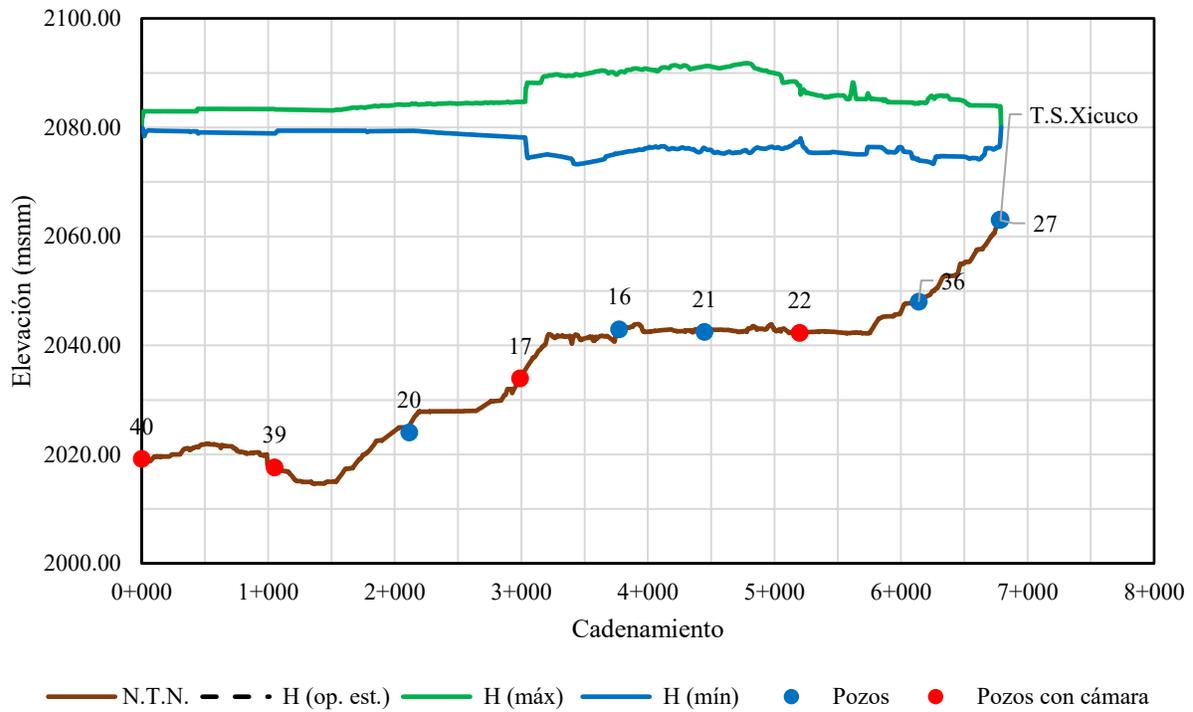


Figura 44. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22.

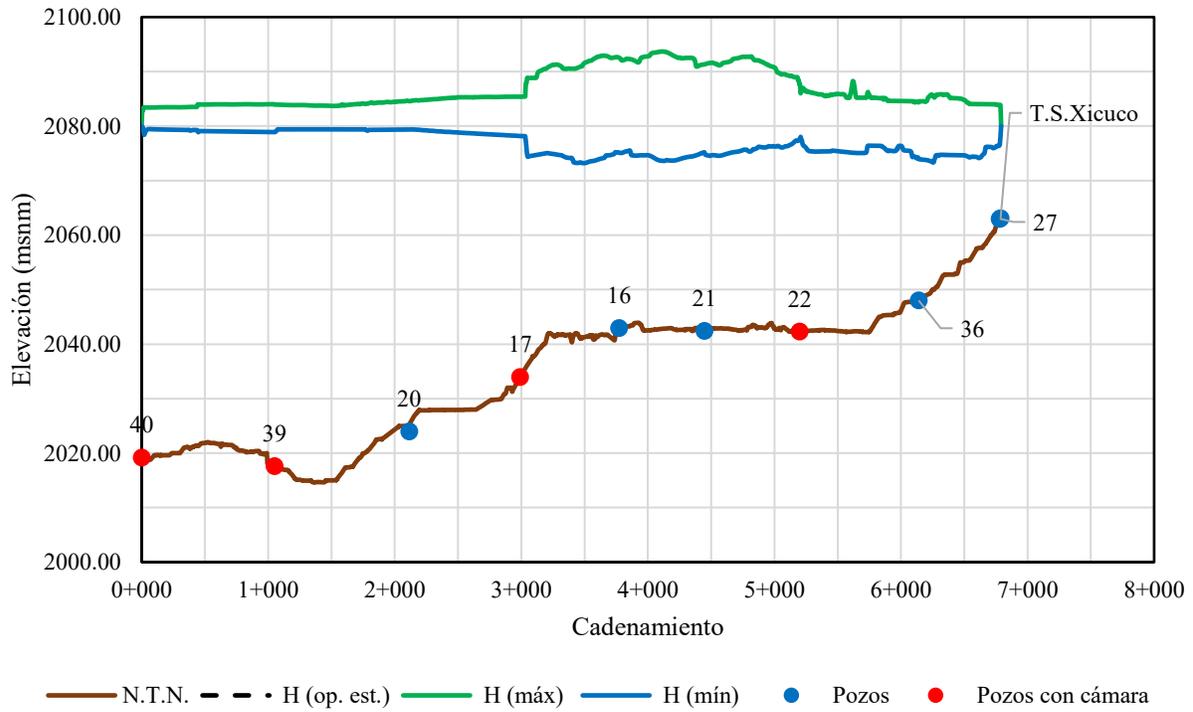


Figura 45. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22.

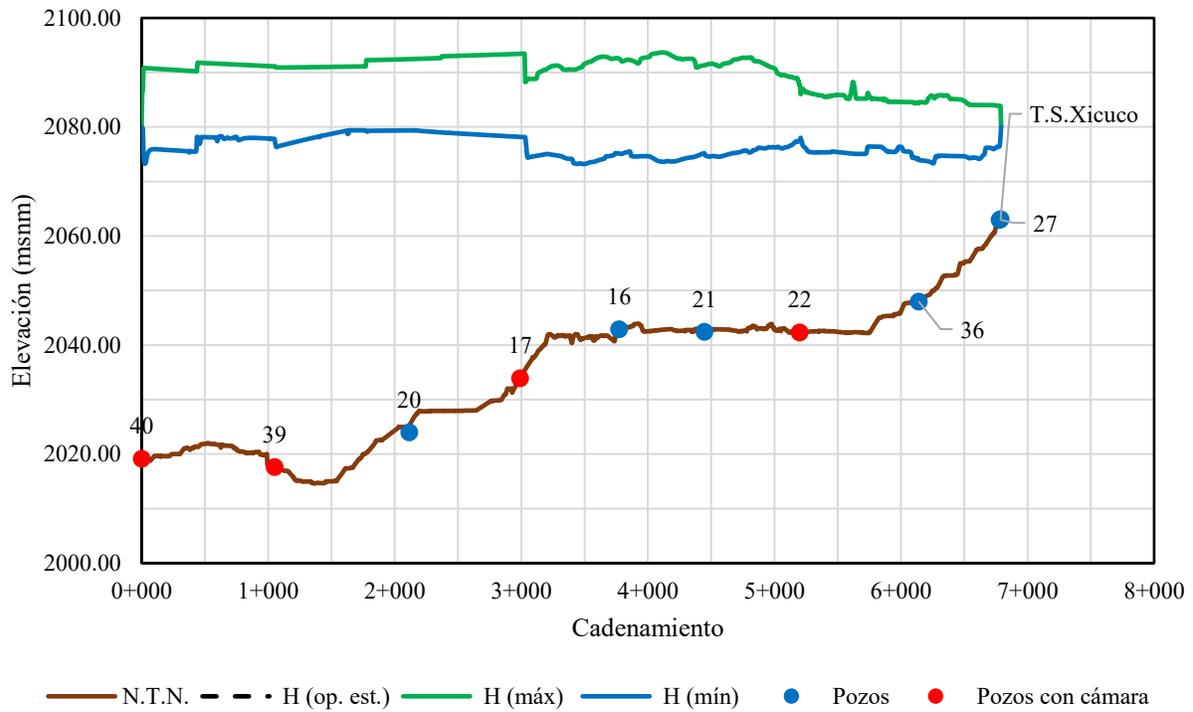


Figura 46. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22.

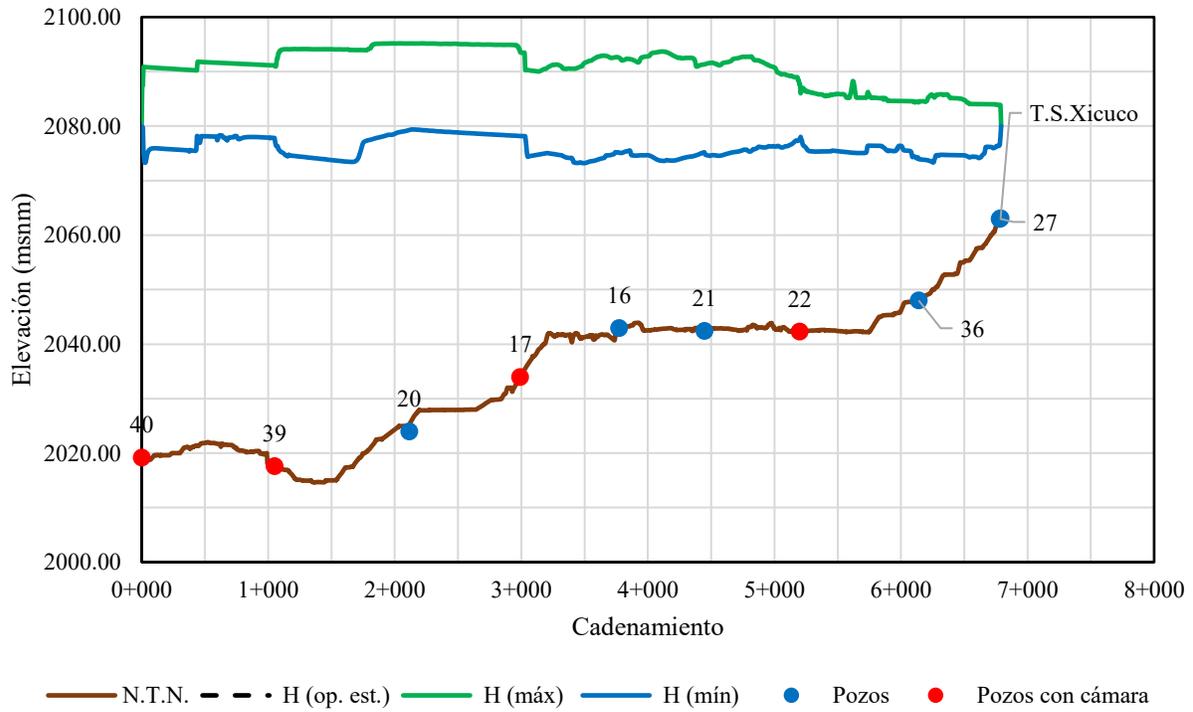


Figura 47. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22.

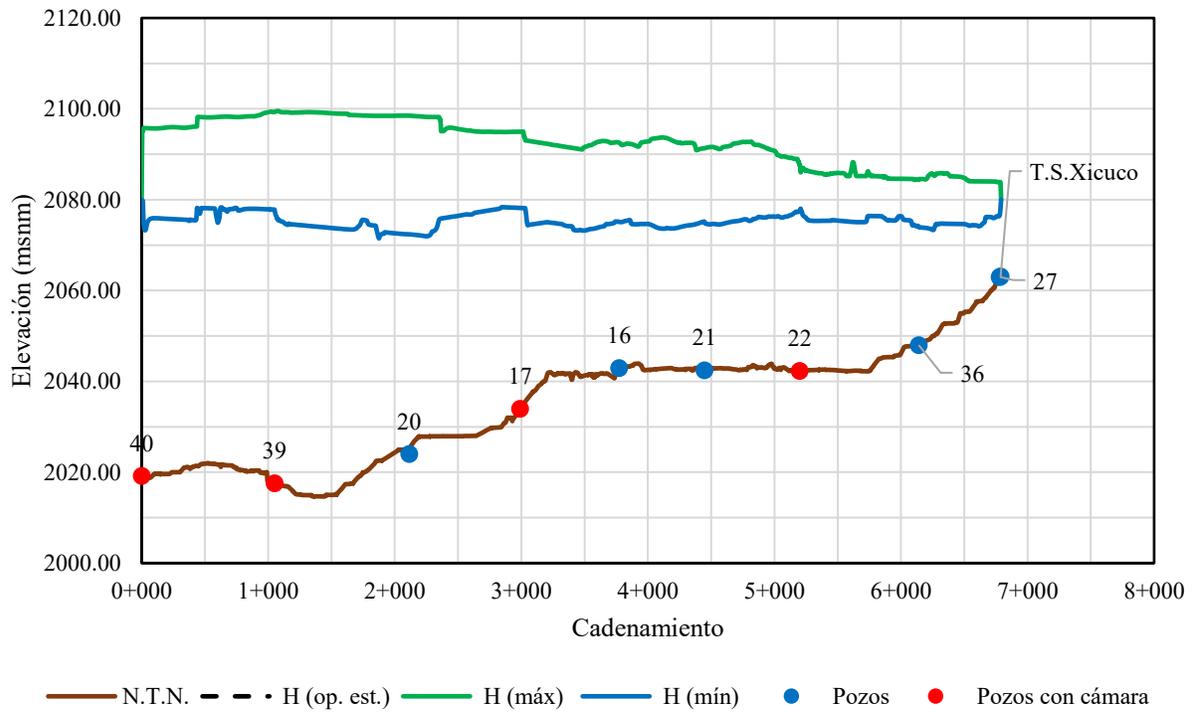


Figura 48. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22.

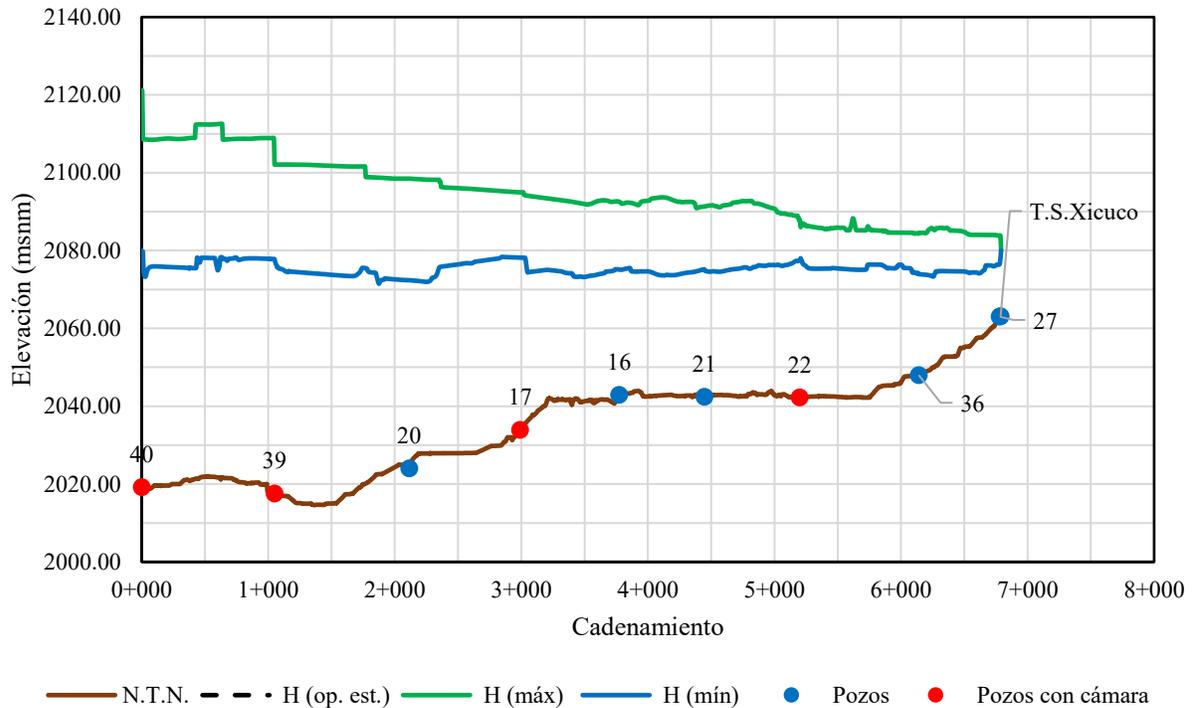


Figura 49. Comportamiento las presiones máximas y mínimas del perfil correspondiente al tramo del pozo 40 al tanque Xicuco al arrancar el equipo de bombeo 22.

Es posible observar que, al contar con cámaras de aire esparcidas en el sistema, estas protegen ante ambos escenarios que son, paro y arranque de equipos. Sin obstruir de alguna manera el arranque o generar alguna perturbación.

Con respecto a los puntos de observación mostrados en la figura 18 se presentan las presiones en los nodos. Las perturbaciones en las presiones no representan peligro alguno al sistema, incluso en las cámaras de aire estas oscilaciones en la presión se reflejan de una manera casi imperceptible. Esto es, la inclusión de cámaras de aire para mitigar el paro súbito no deberá interferir en el arranque de la red, siempre y cuando se exista un análisis sensible del comportamiento de las variables hidráulicas ante dicha maniobra.

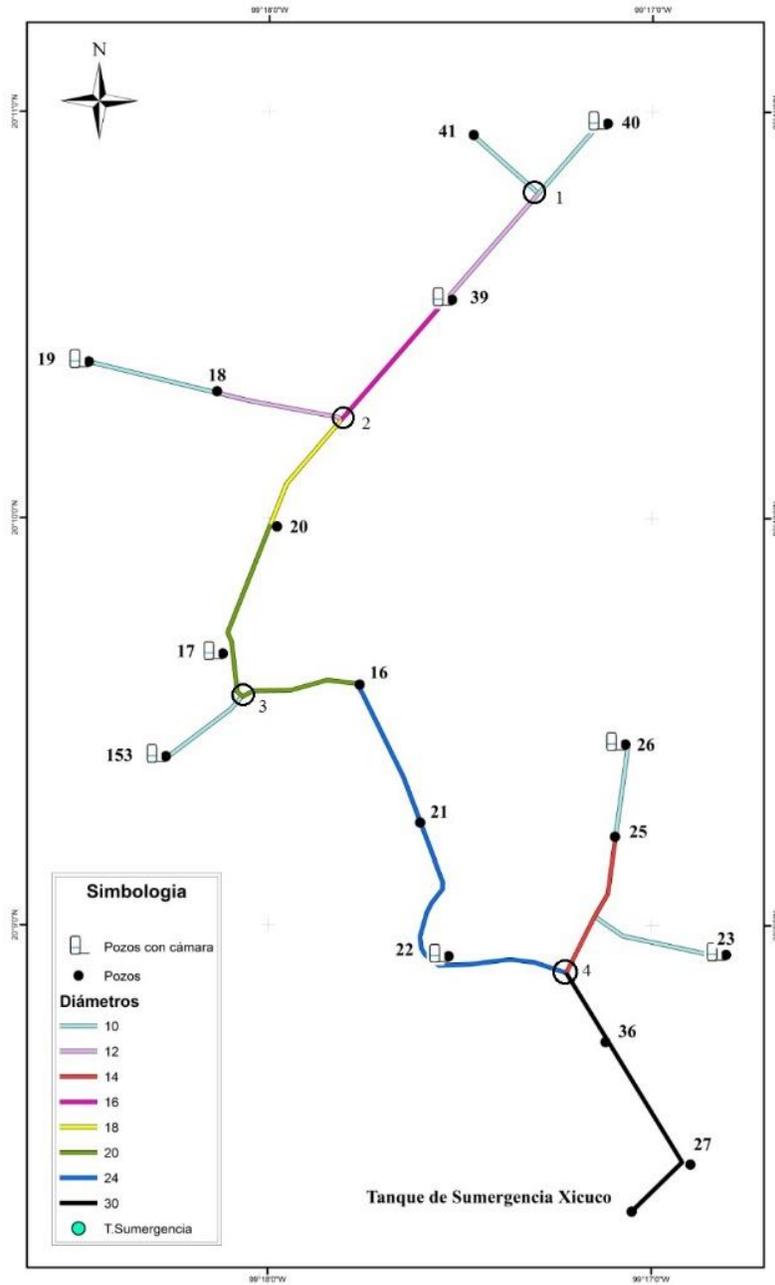
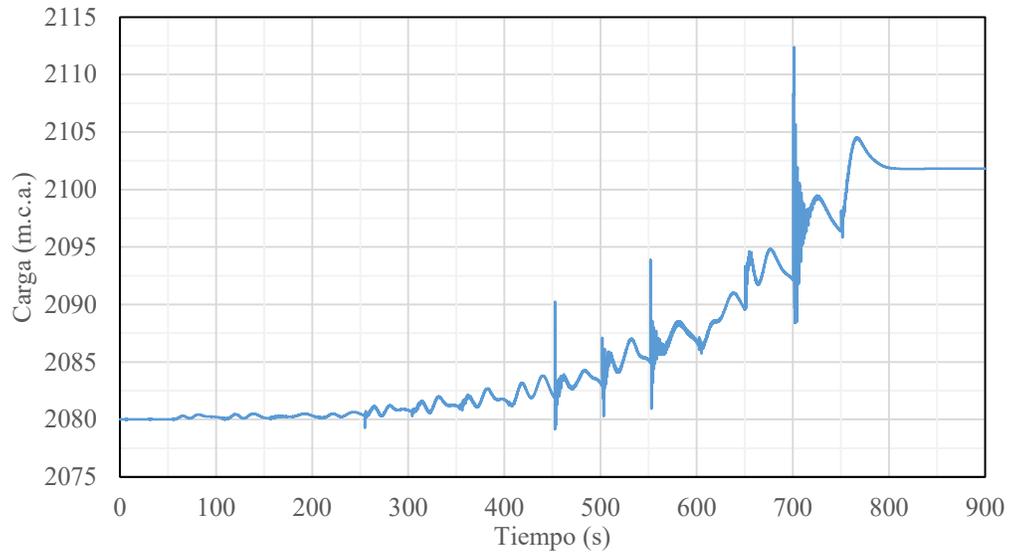
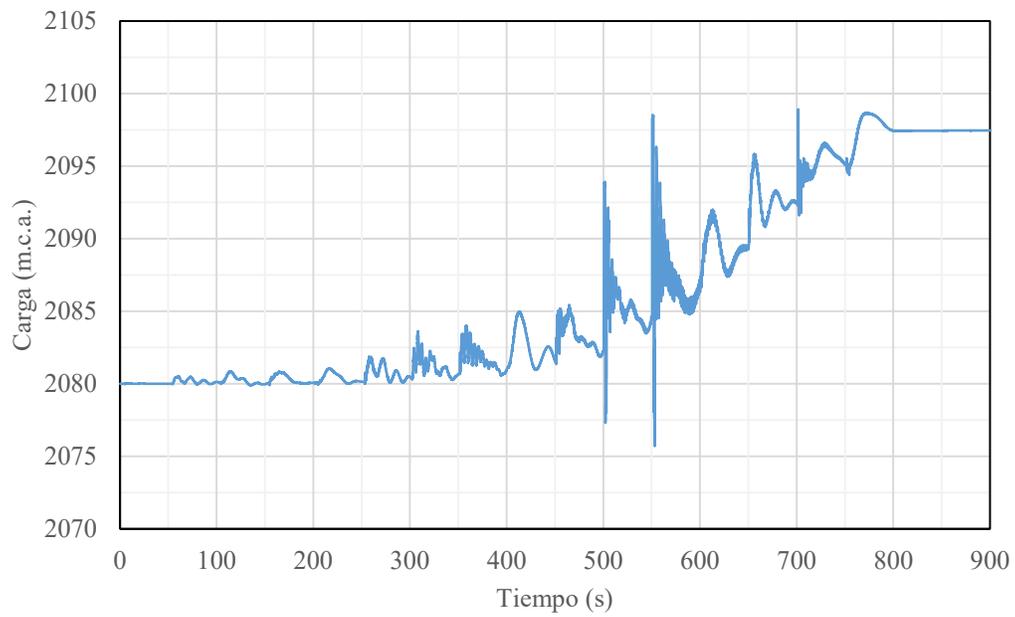


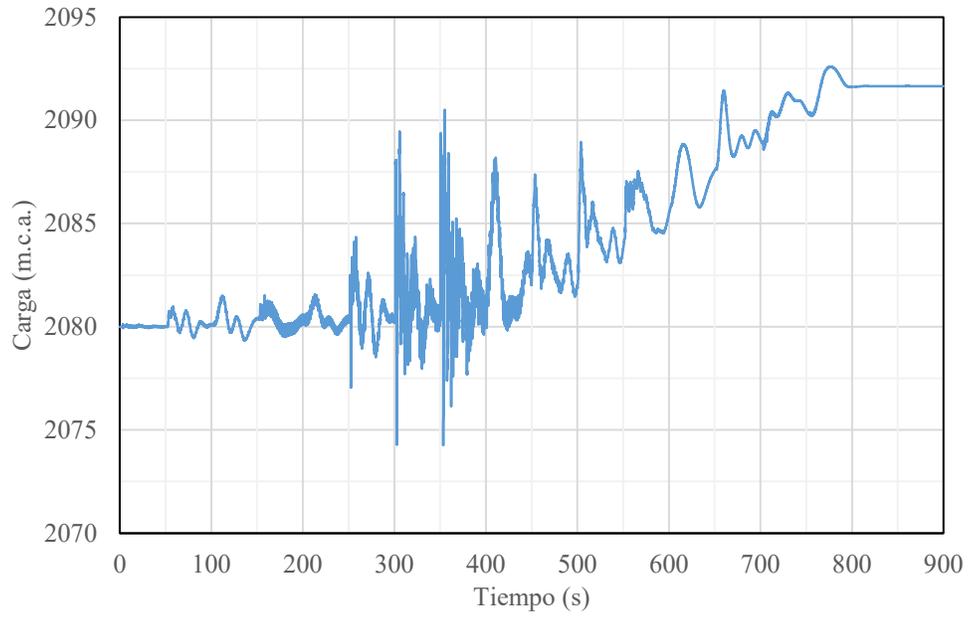
Figura 50. Puntos de observación de presión.



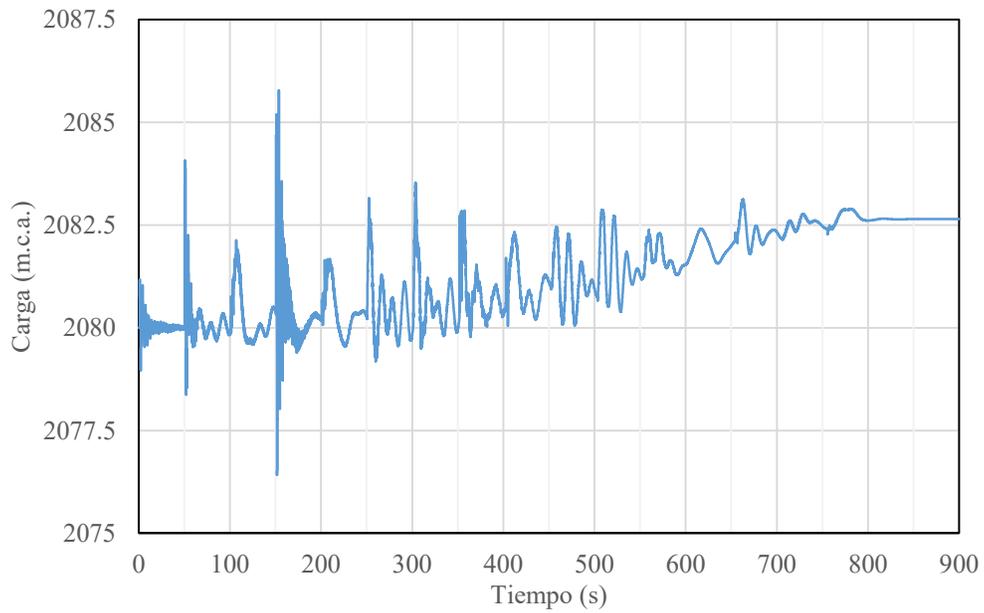
*Figura 51. Presiones en el Punto de Observación 1.*



*Figura 52. Presiones en el Punto de Observación 2.*



*Figura 53. Presiones en el Punto de Observación 3.*



*Figura 54. Presiones en el Punto de Observación 4.*

Cámara de Aire No.	H Max (m.c.a.)	Z Agua en la Cámara (msnm)	Nivel en la Descarga (msnm)	Pa/y (m)	Volumen de Aire en la Cámara al Inicio (m <sup>3</sup> )	Volumen de aire para Presión Máxima (m <sup>3</sup> )
40	2107.06	2022.54	2080.00	10.33	5.00	3.57
39	2101.05	2020.74	2080.00	10.33	2.00	1.54
19	2106.57	2018.10	2080.00	10.33	2.00	1.46
17	2094.16	2036.37	2080.00	10.33	1.00	0.79
153	2096.85	2045.04	2080.00	10.33	1.00	0.73
22	2086.02	2044.35	2080.00	10.33	1.00	0.88
26	2097.90	2032.34	2080.00	10.33	1.00	0.76
23	2092.48	2039.70	2080.00	10.33	1.00	0.80

Tabla 7. Variación del Volumen de Aire en las Cámaras en el momento de Sobrepresión Máxima.

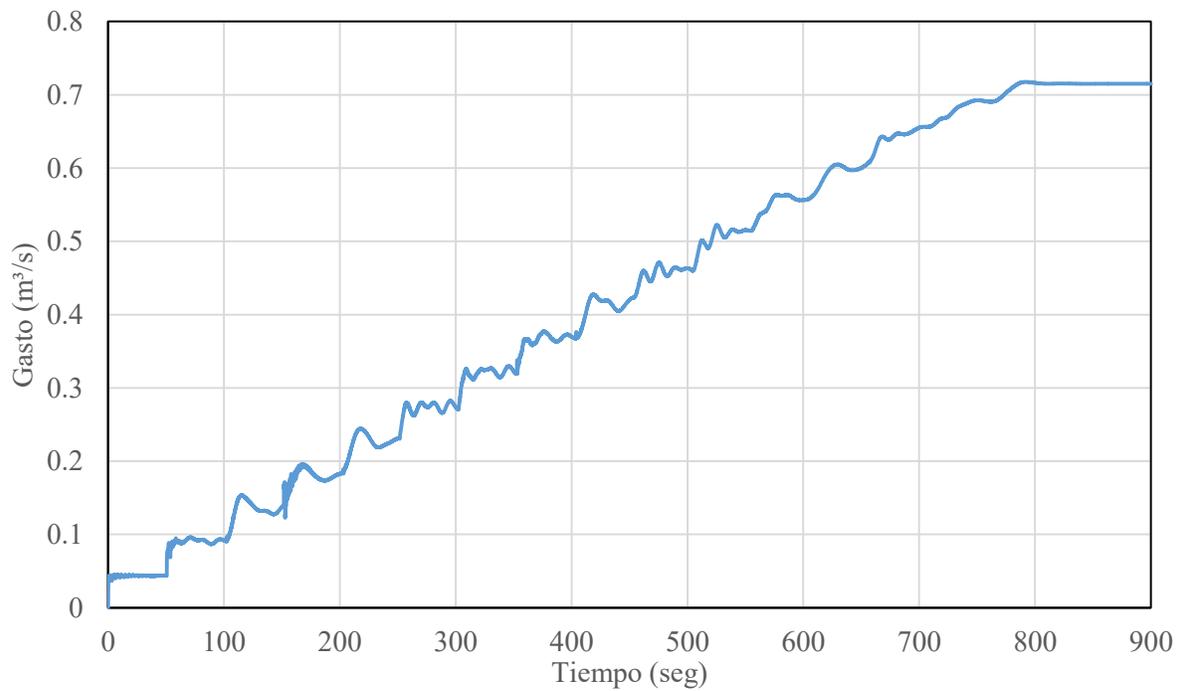


Figura 55. Gasto con respecto al tiempo al arranque secuencial de los equipos de bombeo en la red.

## 8. Conclusiones

Al modelar un sistema hidráulico de este tipo, compuesto por más de un equipo de bombeo y dispersos en el plano, es de suma importancia mencionar que la obtención de las condiciones de frontera es parte crucial para el desarrollo del análisis ya que de ello dependerá coherencia de resultados con la realidad. Por ejemplo: El modelo de elevaciones digital debe ser preciso, en este caso se utilizó información de un vuelo bajo con curvas de nivel a cada 2.5 metros. Por otro lado, los datos de hidrogeología se obtuvieron de un estudio extenso llevado a cabo en los últimos meses.

La topografía del terreno y el proyecto geométrico de la línea de conducción ayudarán a determinar criterios de las condiciones iniciales que se plantearán para mitigar el transitorio, como la ruta de las líneas de conducción para evitar escenarios topográficos adversos.

Por otro lado, parte crucial en un proyecto hidráulico es contar con la información precisa de los equipos electromecánicos y válvulas que se utilizarán. Partiendo de información proporcionada por proveedores, se logró obtener curvas de equipos de bombeo precisas para extraer los polinomios que reflejaran el comportamiento de la operación de la bomba para cada caso, ya que cada curva se ajustó a la carga de bombeo necesaria para cada ubicación de los equipos de bombeo

Como el arreglo de bombeo no es en serie, sino que cuenta con una distribución espacial variada, una vez calibrado el modelo a gasto establecido o flujo permanente y después de llevar a cabo diversas simulaciones con diferentes combinaciones de parámetros como, localización de cámaras, niveles de agua contenidos en las cámaras, curvas carga gasto de los equipos y volúmenes de aire iniciales dentro de cada cámara, se observaron resultados y se llegó a diferentes conclusiones.

Para un paro súbito y simultáneo de equipos de bombeo, la mejor opción para pasar de un transitorio rápido (Golpe de Ariete) a uno lento (Oscilación de Masa) en este escenario, son las cámaras de aire, dispositivos que actúan ante el cambio abrupto entre variaciones de presión en el sistema, tanto positivas, como negativas. Ya que existen otros dispositivos como las válvulas de alivio rápido que solo actúan ante sobrepresiones. Por otro lado, las válvulas anticipadoras de onda, que, a pesar de que actúan en ambos escenarios transitorios, su mantenimiento preventivo y correctivo es muy delicado y esto hace difícil su operación óptima.

El aire contenido en las cámaras es comprimido por incremento de la presión del agua en la tubería al arrancar las bombas, por lo que es necesario calcular las presiones transitorias que se generarán en un sistema con cámaras de aire al poner en operación dichos equipos y, en su caso, establecer los criterios de arranque que eviten poner en riesgo al sistema. Puede ser una secuencia de arranque con algunos segundos entre bomba y bomba, solo para esperar la estabilización de las condiciones de trabajo de cada una y así ir incorporándole al sistema el nuevo gasto que cada equipo va a proporcionar.

Después de llevar a cabo un análisis exhaustivo de ambos escenarios y propuestas de protección contra presiones máximas y mínimas, el orden de arranque de los equipos de bombeo puede darse en cualquier variación, ya sea, encender todos los equipos simultáneamente o en secuencia, ya que no se observaron cambios bruscos en los niveles de las cámaras, ni el sistema es perturbado por presiones que pudiesen dañar al mismo.

Así como tampoco se observaron variaciones en la presión que pudiesen colapsar la tubería, o dañar los equipos de bombeo. Las hipótesis tomadas en cuenta para este estudio, que influyen directamente en los resultados, como lo son que el tiempo de cierre de la válvula check es instantáneo y que la rampa de tensión es tomada en cuenta como si el equipo de bombeo comenzara a trabajar desde el primer instante a tensión plena, nos llevan a sensibilizar el análisis de resultados y todas las posibles combinaciones que se pueden lograr al modificar las condiciones de frontera. En este caso, todos esos criterios se probaron iterando con los diferentes posibles resultados para llegar al ideal, a medida de la información con la que se trabajó.

En ese sentido, se observó que no existen sobrepresiones o depresiones durante el arranque de equipos de bombeo, ya sea, arrancando equipo por equipo o todos simultáneamente, tal que no será necesario agregar protección adicional a la proporcionada para mitigar el paro de equipos de bombeo.

Se puede decir que, en un escenario de paro de equipos de bombeo seguido por un arranque de éstos, el sistema debe ser calculado para el escenario más desfavorable, que es el paro de equipos, así, el sistema estará preparado para recibir un arranque, tomando en cuenta que se hayan hecho las revisiones correspondientes como fue en este caso, donde ya existían dispositivos para un escenario transitorio y se estudió que beneficios o afectaciones causaron para otro tipo de transitorio.

La finalidad de este trabajo es trazar una ruta de análisis de fenómenos transitorios donde se contemplen los siguientes pasos en este orden:

1. Modelación a Flujo Permanente
2. Modelación de Paro de Equipos de Bombeo
3. Modelación de Arranque de Equipos de Bombeo después de un Paro

Así como también, brindar una herramienta de consulta para saber qué datos son necesarios para llevar a cabo un análisis hidráulico transitorio completo para dichos escenarios. Las directrices que se pretenden establecer en este documento, están respaldadas por el software Trans, el cual, ha sido probado y comparado, con mediciones reales de proyectos que se han modelado y después se han realizado con éxito a lo largo de toda la República Mexicana.



## 9. Bibliografía

1. Berezowsky, M. & Ramirez, H. (1988). *Cámaras de Oscilacion: Analisis y Diseño Hidráulico*. Mexico D.F: Insitituto de Ingeniería Universidad Nacional Autónoma de México.
2. Cafaggi Félix, Amalia Adriana, Rodal Canales E. A. y Sánchez Huerta, A. *Sistemas de Bombeo*. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2014.
3. Carmona R. (2002) *Modelo paramétrico para calcular dimensiones de tanques de oscilación y de cámaras de aire en sistemas de bombeo*” XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
4. Carmona P. Libia G y Carmona P. Rafael. *Manual del sistema de simulación de transitorios hidráulicos en tuberías a presión: TRANS*, versión 2010.1.0, Instituto de Ingeniería, UNAM. ISBN 970-32-1593-9.
5. Carmona P. Libia, Castillo H. Gabriel y Manzano R. Sandro. *Sistema de Captura y Generación de los Archivos de Entrada del Sistema Trans*. Desarrollado en el Instituto de Ingeniería, UNAM. Registro INDAUTOR en trámite.
6. Carmona P. Rafael y Carmona P. Libia. *Sistema de Simulación de Transitorios Hidráulicos en Conductos a Presión: Trans*. Registro INDAUTOR 03-2014- 121114054300-01.
7. Chaudry. H. (1979) *Applied Hydraulic Transients*. Nueva York: Van Nostran Reinhold Company
8. *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico - Administrativa XIII Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México*, CONAGUA, Edición 2013
9. Guarga, J & Abreu J. (1995) *Transitorios y Oscilaciones en Sistemas Hidráulicos a Presión*, Universidad de Coimbra, Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de la República Oriental de Uruguay.
10. Lesser y Asociados S.A. de C. V., *Estudios Técnicos de Geo hidrología, Calidad del agua, Tenencia de la tierra y Aspectos sociales en la Zona de Captación para el “Sistema Mezquital para el Abastecimiento de Agua en Bloque al Valle de México e Hidalgo”*, Comisión Nacional del Agua, 2012-2013.
11. Mancebo del Castillo, Uriel, *Teoría del Golpe de Ariete y sus Aplicaciones en Ingeniería Hidráulica* / México: Limusa, 1987.

12. Parmakian, J. (1955). *Waterhammer Analysis*. Nueva York: Prentice Hall.
13. Sotelo, Á. Gilberto, *Hidráulica General, Vol. 1 Fundamentos*, México, Editorial Limusa, 2009.
14. Streeter, W. (1978) *Fluid Transients*, British Library.
15. Thorley, A. (1991), *Fluid transients in pipeline systems*, British Library.
16. Zarco, J. (2000). *Método simplificado para el pre dimensionamiento de cámaras de aire*, Universidad Nacional Autónoma de México.