

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES
CARRERA Y DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



TRABAJO DE DIPLOMA

"Análisis del Comportamiento Hidráulico y Golpe Ariete en la
Conductora Ochoita-Dos Hermanas"

Autor: Mabolle Ameliah Maphika

Tutores: Ing. Alberto Díaz Barata

Ing. Omar Reyes Correa

2015

Dedicatoria.

Son muchas las personas que han intervenido de manera positiva en mi desarrollo tanto físico como intelectual, pero considero fundamental dedicar este trabajo:

A mi fallecido Abuelo Phokojoje Maphika.

A mi abuela Mamphephe Maphika.

A mi hermano Retselisitsoe Maphika.

A mi futuro esposo Tichaona Murambinda.

Por todo su cariño, apoyo, dedicación e interés, pero sobre todo, por servirme de inspiración en cada paso que doy.

Agradecimientos:

No existen palabras para agradecer el apoyo brindado por las personas que me ayudaron en la confección de este trabajo. A todas ellas sin excepción les agradezco infinitamente el tiempo dedicado. Quiero dejar constancia de particular agradecimiento a las siguientes:

- ❖ A Jehová por haber puesto su mano encima durante todos los años de la carrera protegiéndome y cuidándome sobre todo en la salud,*
- ❖ A la revolución Cubana junto con el Reino de Lesoto por darme esta oportunidad de estudiar y tener una carrera,*
- ❖ Ing. Omar Reyes Correa, el tutor del presente trabajo, por su dedicación, paciencia, experiencia y el amplio cúmulo de conocimientos brindados. Si no fuera por Ud. todo no iba a ser igual. Ud. Merece todo mi gratitud por haber ayudado en cuando hacía falta,*
- ❖ Profesor Ing. Alberto Dias Barata mi tutor, por aceptarme como su diplomante, y sobre todo por guiarme en la confección de este trabajo,*
- ❖ Todos mis profesores tanto de la UCLV como de la UO que juntos formaron un equipo para formarme en mi vida profesional,*
- ❖ A los compañeros de la Empresa de Investigación y Proyecto Villa Clara (EIPVC), a todas aquellas personas que de forma u otra aportaron su granito de arena,*
- ❖ A mis amigos en especial Keitumetse Letsela y compañeros del aula en particular Daimy Triana, quienes compartieron momentos buenos y malos conmigo, muchas gracias compadres, Uds. me hicieron mas fuerte todavía,*
- ❖ A mi abuelo. Que decir, a mi abuelo que en gloria esté, le agradezco infinitamente pues sé que siempre me ha apoyado y ha cumplido cada una de mis peticiones, muchas gracias donde quiera que estés,*
- ❖ A mi querida abuela, que desde que vine aquí, estuvo esperando por este día especial para mí,*
- ❖ A mis padres gracias por todo su apoyo y también por creer en mí,*
- ❖ A mi novio Tich, que siempre me ayudó y me apoyó en esta batalla de la vida profesional, si no fuera por ti, todo iba a ser muy difícil.*

Muchas Gracias!

PENSAMIENTOS:

“Los científicos exploran lo que existe, los ingenieros crean lo que nunca ha existido”.

Anónimo

“La universidad es donde se aprende como aprender.”

Sócrates (425 A.J.C)

RESUMEN

El sistema de abasto Ochoíta es una de las principales fuentes que garantizan el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Santa Clara, por lo que es necesario asegurar un funcionamiento adecuado de los diferentes objetos de obra que lo componen, para garantizar un mejor servicio de acueducto a la ciudad. El sistema de abasto parte de la fuente, constituida por aguas superficiales de la presa Minerva ubicada a 17km de la ciudad, la planta potabilizadora con una estación de bombeo, ubicada dentro de la misma instalación con capacidad de impulsión de 630 L/s, mediante la cual se impulsa el agua tratada hasta una chimenea de equilibrio ubicada en la Loma Dos Hermanas a través de una conductora de diámetro variable. El presente trabajo consiste en la elaboración de un modelo hidráulico, capaz de simular el comportamiento hidráulico actual de la conductora Ochoíta - Dos Hermanas y en específico lo referente a caudales, velocidades y presiones mediante el empleo del software WaterCAD V8 con el objetivo de comprobar la funcionalidad y compatibilidad de determinados dispositivos de protección para el Golpe de Ariete que pudiera producirse en la instalación bajo determinadas consecuencias. El análisis se realiza primeramente para el sistema sin protección y posteriormente se analiza el sistema considerando los dispositivos necesarios para garantizar una protección ante la ocurrencia del Golpe de Ariete.

ABSTRACT

The water supply system "Ochoita" is one of the principal sources of water supply for Santa Clara city, for which it is necessary to assure the well-functioning of different objects which form a system, to guarantee the best service of potable water. The water system is composed of, surface water from the dam "Minerva" located 17km from the town, water treatment plant together with a pump station with the capacity impulsion flow of 630L/s, through the impulsion of treated water until the tank on top of the hill, "Dos Hermanas" through a pipe with variable diameters. The present thesis consists in elaborating a hydraulic model, able to simulate the actual hydraulic behavior of the water pipe "Ochoita-Dos Hermanas" and in specific referring to the water flow, velocities and pressures through the software WaterCAD V8 with the objective of testing the functionality and the compatibility of protection apparatus from a hydraulic transient, which might occur in the installation through certain consequences. The analysis is first run when the system is unprotected then later analyzing the system considering the necessary apparatus to guarantee the protection before the event.

ÍNDICE:

<i>Dedicatoria</i>	1
<i>Agradecimientos</i>	2
<i>PENSAMIENTOS</i>	3
<i>RESUMEN</i>	4
<i>ABSTRACT</i>	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	8
1.1 Situación problemática	10
1.2 Planteamiento del problema	11
1.3 Campo de investigación	11
1.4 Objetivo general	11
1.4.1 Objetivos específicos	11
1.5 Hipótesis	11
CAPITULO II ESTADO DEL ARTE	12
2.1 Sistemas de abasto	12
2.2 Conducciona	12
2.2.1 Materiales utilizados	13
2.2.2 Características fundamentales del PEAD	14
2.3 Parámetros hidráulicos	15
2.3.1 Pérdidas menores	16
2.4 Válvulas	19
2.5 Análisis del transitorio hidráulico	20
2.5.1 Causas del inicio del transitorio	21
2.5.2 Breve descripción del fenómeno del transitorio	21
2.5.3 Importancia de la consideración del golpe de ariete en tuberías	22
2.5.4 Dispositivos para reducir el efecto del golpe de ariete	23
2.6 Modelos de análisis de sistemas de abastecimiento de agua	24
2.6.1 Software Bentley WaterCAD	24
2.6.2 Software Bentley HAMMER	26
CAPÍTULO III Modelación y Análisis Hidráulico de la Conducciona	27
3.1 Descripción de sistema	27
3.1.1 Características de la Conducciona	28
3.1.2 Estación de Bombeo	29

3.1.3 Depósito.....	31
3.2 Creación del modelo en WaterCAD	31
3.3 Cálculos hidráulicos.....	35
CAPÍTULO IV. ANALISIS DEL GOLPE DE ARIETE	40
4.1. Consideraciones teóricas.	40
4.1.1 Creación del modelo.	40
4.1.2 Selección del evento a simular.....	40
4.1.3 Estrategia a seguir en la modelación.....	42
4.2 Comportamiento del sistema sin dispositivos de protección.....	42
4.3 Análisis del sistema con los dispositivos de protección.	45
4.3.1 Dispositivos de control que se encuentran en el sistema.	45
4.3.2 Resultados del análisis del transitorio con dispositivos de control.	49
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	52
5.1 Conclusiones.....	52
5.2 Recomendaciones.....	52
BIBLIOGRAFÍA:.....	53
ANEXOS.....	55

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Una de las necesidades básicas del ser humano es el consumo de agua potable. La existencia de este vital líquido permite que se den grandes asentamientos cerca de los lugares donde se les facilite la obtención de tal recurso.

El suministro de agua potable es un problema que ha ocupado al hombre desde la Antigüedad. Ya en la Grecia clásica se construían acueductos y tuberías de presión para asegurar el suministro local. En algunas zonas se construían y construyen cisternas o aljibes que recogen las aguas pluviales. Estos depósitos suelen ser subterráneos para que el agua se mantenga fresca y sin luz, lo que favorecería el desarrollo de algas.

En Europa se calcula con un gasto medio por habitante de entre 150 y 200 L de agua potable al día aunque se consumen como bebida tan sólo entre 2 y 3 litros. En muchos países el agua potable es un bien cada vez más escaso y se teme que puedan generarse conflictos bélicos por la posesión de sus fuentes.

De acuerdo con datos suministrados por el programa de monitoreo del abastecimiento de agua potable patrocinado en conjunto por la OMS y UNICEF, el 87% de la población mundial, es decir, aproximadamente 5,900 millones de personas (marzo 2010), dispone ya de fuentes de abastecimiento de agua potable, lo que significa que el mundo está en vías de alcanzar, e incluso de superar, la meta de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) relativa al agua potable.

“El agua es un problema ya y va a ser un problema mucho más grave con el paso de los años, entre otras cosas por el cambio climático”, dijo Castro ante el plenario. También señaló que el abastecimiento de agua es uno de los problemas críticos en la población. A la crisis por salideros, mal sellado de las calles y demoras en la solución de averías, se suman dificultades con el acabado de las obras y el déficit de inversiones en el sector hidráulico.

Los sistemas de acueducto abastecen a más de 8.2 millones de personas y los mayores desniveles de suministro se presentan en las áreas rurales, donde solo el 38% de los pobladores reciben el servicio de la conexión interdomiciliaria. Un 6% de los cubanos reciben agua a través de carros cisternas.

Para el abasto humano las empresas del INRH sirven a 8 millones 240 mil personas, 900 mil son abastecidas por el MINAG y AZCUBA, cerca de otro millón por pipas y 800 mil acceden al agua cargándola a una distancia de 200-300 m. A pesar de las altas coberturas de agua, hay 200 mil personas en zonas urbanas sin acceso adecuado y en el sector rural 400 mil. Existen más de 1300 centros altos consumidores. Tres millones 100 mil personas abastecidas por otras formas consumen agua sin tratamiento. (INRH 2013).

En Cuba, muchos de los sistemas de abastecimiento de agua dejaron de catalogarse como eficientes. Esto se ha debido fundamentalmente, a las carencias económicas y materiales que fueron una consecuencia directa de la caída del campo socialista, y a la falta de financiamiento para el desarrollo de las infraestructuras en el país. La situación es de tal magnitud, que el organismo rector de los recursos hidráulicos INRH, no escapó sin daños a sus instalaciones.

Con el objetivo de solucionar esta alarmante situación, hace aproximadamente 8 años, se creó un programa de rehabilitación de redes. Como parte de dicho programa, se han realizado una serie de inversiones que han posibilitado la rehabilitación de algunos acueductos como: Pílon, Manzanillo y casi en su totalidad Santiago de Cuba.

1.1 Situación problemática:

Construir nuevos y modernos sistemas de abastecimiento de agua, así como también lograr rehabilitar los ya existentes requiere de la ejecución de proyectos e inversiones, por lo que resulta necesario desarrollar investigaciones profundas más aún cuando se trata de buscar alternativas para mejorar este servicio con el objetivo de satisfacer las necesidades de la población.

La modelación hidráulica aplicada a los sistemas de abastecimiento de agua, constituye una herramienta poderosa para conocer el comportamiento hidráulico de dichos sistemas bajo determinadas condiciones, pudiendo ser empleada para conocer el estado técnico de los sistemas, realizar diseños y estrategias de operación con una visión integral del problema, así como recomendar el orden correcto para realizar labores de rehabilitación y planificación de inversiones con el propósito de que estas resulten los más efectivas y eficaces posible.

La conductora Ochoita – Dos Hermanas con sus dispositivos de protección anti-ariete, forma parte del sistema de abastecimiento de la ciudad de Santa Clara. Dentro del programa de rehabilitación de redes hidráulicas en la provincia de Villa Clara, se está dando prioridad al sistema de abastecimiento de la ciudad de Santa Clara que constituye su capital provincial.

A pesar de su importancia, la información que actualmente se tiene sobre el funcionamiento y el estado técnico de algunos componentes del sistema es pobre, debido fundamentalmente a la falta de estudios e investigaciones científicas que avalen concretamente el estado de las conducciones, y la magnitud de las fugas que actualmente se tienen en el sistema.

Desde hace varios años científicos dedicados a la investigación de los sistemas de abastecimiento han creado modelos matemáticos poderosos, que han sido implementados en varios software de computación, con el objetivo de conocer el estado técnico real de los sistemas de abastecimiento de agua. Afortunadamente en Cuba se cuenta con estas tecnologías y el personal calificado para manejarlas, y poder tomar decisiones seguras basadas en los resultados de estos programas. Por los argumentos brindados anteriormente, se considera que la elaboración de un modelo de análisis hidráulico nos permitirá evaluar el comportamiento del sistema, aportando además información valiosa para

minimizar el trabajo en futuros proyectos de rehabilitación, que constituye un problema importante y sin resolver totalmente en el país.

1.2 Planteamiento del problema:

Desde la etapa de diseño y ejecución de la conductora Ochoita – Dos Hermanas que forma parte del sistema de abastecimiento de la ciudad de Santa Clara, no se han empleado herramientas informáticas que permitan conocer y analizar su comportamiento hidráulico durante la etapa de operación.

1.3 Campo de investigación:

Modelación y análisis hidráulico de sistemas de abastecimiento de agua.

1.4 Objetivo general:

Crear un modelo que permita conocer el comportamiento hidráulico de la conductora bajo determinadas condiciones de operación, para la validación de su diseño y construcción que incluye la solución para amortiguar el golpe de ariete.

1.4.1 Objetivos específicos:

1. Recopilación de la información necesaria sobre la conductora Ochoita - Dos Hermanas.
2. Efectuar la modelación hidráulica de la conductora Ochoita - Dos Hermanas empleando el software profesional Bentley WaterCAD.
3. Análisis del Golpe de Ariete en la conductora, para el caso de un transitorio hidráulico provocado por un fallo súbito de energía eléctrica, analizando el comportamiento del sistema sin protección y con los dispositivos de protección que actualmente se encuentran instalados.

1.5 Hipótesis:

Es posible conocer el comportamiento hidráulico de la conductora Ochoita – Dos Hermanas desarrollando un modelo de simulación basado en el empleo del software profesional Bentley WaterCAD.

CAPITULO II ESTADO DEL ARTE

2.1 Sistemas de abasto.

Se denomina sistema de abasto de agua al conjunto de tuberías, instalaciones y accesorios destinados a conducir las aguas requeridas por una población, desde su lugar de existencia natural o fuente hasta el hogar de los usuarios (Cabrera, 1997).

Elementos que componen un sistema de abastecimiento.

Generalmente los sistemas de abastecimiento de agua potable están compuestos por los siguientes elementos:

- ❖ Fuentes de suministro.
- ❖ Equipos de bombeo.
- ❖ Tanques cisternas.
- ❖ Conductoras.
- ❖ Redes de distribución.
- ❖ Elementos complementarios.
- ❖ Plantas Potabilizadoras. (*)

(*) En dependencia de la calidad de las aguas de la fuente de abasto será necesario colocar en ocasiones una planta potabilizadora como elemento del sistema de abastecimiento.

2.2 Conectora:

La conectora es la tubería que conduce el agua desde la fuente de abasto hasta el tanque o hasta el inicio de la red de distribución.

Según García, (2012), pueden clasificarse:

1- Atendiendo al origen de la energía disponible para transportar el flujo:

- Conductoras de gravedad: Son aquellas en las que el agua fluye por una diferencia de nivel entre dos puntos del sistema.
- Conductoras de bombeo: En este caso es necesario imprimirle una energía adicional al fluido (bombeo) para vencer una diferencia de nivel adversa entre dos puntos del sistema.

2- Atendiendo al régimen de circulación del flujo:

- Conductora a presión: En las que el fluido circula a presión en todo momento dentro del conducto.
- Conductora libre: Son aquellas en las que el flujo circula en una sección parcialmente llena del conducto a lo largo de este.
- Conductora mixta: Son aquellas en las que el fluido circula a presión por un tramo del conducto y libre por otro.

2.2.1 Materiales utilizados:

En los conductos a presión los materiales más utilizados son:

- Acero.
- Hierro Fundido (Hofo).
- Asbesto Cemento.
- Hormigón Armado.
- Termoplásticos.

Acero.

Se emplean generalmente en diámetros mayores de 36" ó 42". Son apropiados para cruzar puentes donde alta resistencia y bajo peso son deseados. También se usan en los tramos de conductoras que cruzan en forma aérea, las cañadas o ríos, apoyadas en pilares de hormigón.

No resisten fácilmente presiones externas; para resistir mejor esas cargas externas, se construyen a veces en forma corrugada. Si son enterrados se deterioran rápidamente; por eso son ideales para estar expuestos y de ese modo son accesibles a la inspección y a la reparación. Las juntas se hacen por soldaduras o por remaches que pueden ser transversales, longitudinales o en espiral. (Pérez, L. 2005).

Materiales termoplásticos.

La introducción de los materiales termoplásticos como el polietileno (PE), para la producción de tuberías ha creado un interés creciente en su aplicación a los sistemas de conducción y distribución de agua por su ligereza, bajo coeficiente de rugosidad, costos competitivos respecto a otros tipos de tuberías, durabilidad y facilidad de instalación (Alonso, 2012).

En las rehabilitaciones de acueductos que actualmente lleva a cabo el país el material de preferencia para las tuberías es el Polietileno de Alta Densidad (PEAD), por consiguiente la propuesta de diseño del trabajo será mediante el empleo de este material.

2.2.2 Características fundamentales del PEAD.

El polietileno de alta densidad constituye la materia prima más extendida para la fabricación de las tuberías y accesorios que se utilizan con más frecuencia en las redes de acueducto y alcantarillado del país.

A continuación se presentan las principales características del PEAD con 10 mPa de resistencia mínima esperada a los 50 años (PE 100), ver tablas 2.1 y 2.2 de los anexos.

Obtención.

El PEAD, materia prima utilizada en la fabricación de las tuberías, se produce a partir de la polimerización del etileno y es el fruto de un largo proceso de investigación y desarrollo llevado a cabo por los fabricantes de polímeros en sus laboratorios e institutos especializados. El resultado ha sido un producto que presenta excelentes propiedades físico químicas, como son su resistencia a la rotura y a la tensión, y su moldeabilidad (Herrera, 2012).

Vida útil.

La estructura molecular de los polímeros que se utilizan en la fabricación de estas tuberías garantiza que éstos mantengan sus propiedades mecánicas, con un amplio margen de seguridad que cubre, al menos, 500 000 horas de servicio ininterrumpido, a su presión nominal y a una temperatura de 20°C. (Instructivo de PEAD 3ra Versión, INRH, 2013)

Rango de producción.

En la República de Cuba las tuberías de PEAD se producen en tres fábricas (Holguín, Ciego de Ávila y La Habana) que cumplen con las normas nacionales e internacionales establecidas para obtener este tipo de producto (Instructivo de PEAD 3ra versión, INRH, 2013).

Resistencia a la rotura.

La resistencia del polímero debe ser probada llevando a cabo pruebas de presión en muestras de tuberías. Para ello, de acuerdo a las normas ISO, se realiza una prueba hidrostática de larga duración sometiendo a la muestra a una tensión y temperatura determinadas (Instructivo de PEAD 3ra. versión, INRH, 2013).

Para este trabajo, se va a analizar una conductora de bombeo a presión, que es de acero hasta donde termina la estación de bombeo, y luego es el material PEAD, por sus buenas características ya mencionadas.

2.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos más importantes para las tuberías son:

- Nodos de entrada y salida.
- Diámetro.
- Longitud.
- Coeficiente de rugosidad (para determinar pérdidas).
- Estado (abierto, cerrado o con una válvula).

Los principales parámetros que podemos obtener son:

- Caudal.
- Velocidad.
- Pérdidas.
- Variación de la velocidad de reacción (a lo largo de su longitud).
- Variación de la calidad del agua (a lo largo de su longitud).

Las pérdidas de carga en la conducción debido a la rugosidad de las paredes de la tubería pueden cuantificarse utilizando tres métodos diferentes (Bosch, 2011):

- Método de Hazen-Williams.
- Método de Darcy-Weisbach.
- Método de Chezy-Manning.

El método de Hazen-Williams es el más utilizado en el ámbito anglosajón. No se puede usar con otro líquido que no sea agua y fue desarrollada originalmente únicamente para régimen turbulento.

El método de Darcy-Weisbach es el más exacto teóricamente. Se puede aplicar para cualquier líquido en cualquier régimen que se encuentre.

El método de Chezy -Manning es el más utilizado para conductos funcionando en lámina libre.

2.3.1 Pérdidas menores.

Las pérdidas menores (o pérdidas locales) se deben a la resistencia que ofrece el flujo al pasar por accesorios y válvulas. La importancia de incluir éstas pérdidas depende de la distribución en planta de la red y el grado de exactitud requerido.

Las pérdidas menores se calculan multiplicando el coeficiente de pérdida (k) por la energía cinética de entrada en la tubería, es decir,

$$h = k \frac{v^2}{2g}$$

Donde

h = pérdida de carga, en (mca).

k = coeficiente de pérdida, adimensional.

v = velocidad media del flujo, en (m/s)

g = aceleración de la gravedad, en (m/s²)

La Tabla 2.12 muestra los coeficientes de pérdidas menores de algunos tipos de accesorios y válvulas, ver anexos.

En este caso, el método de Hazen-Williams, es el que se utilizó para este trabajo, considerando que es el más utilizado en la práctica y que además está incluido en el *software* WaterCAD, siendo su fórmula la siguiente:

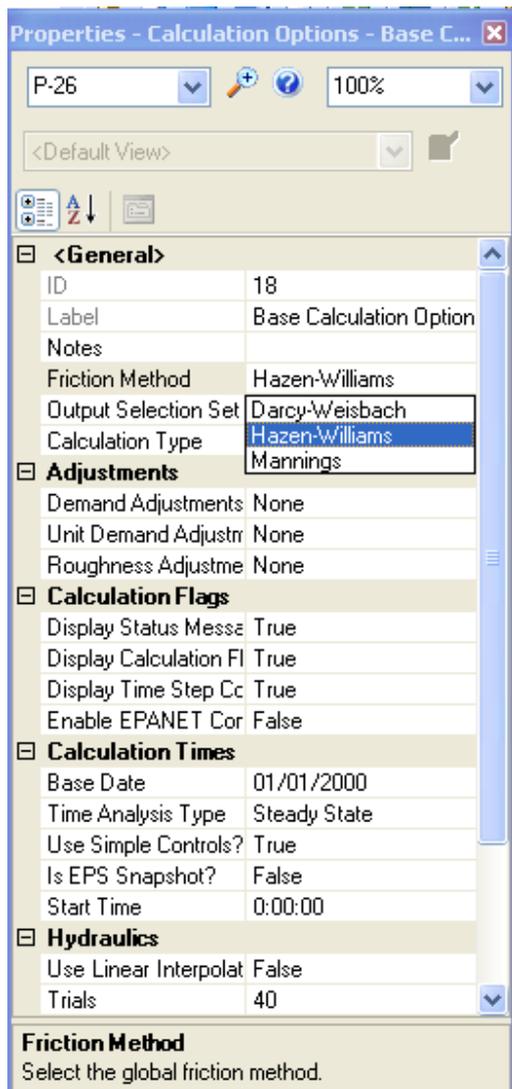


Figura 1. Método para las pérdidas.

$$h = \left(\frac{279064,57 \cdot Q}{C \cdot d^{2,63}} \right)^{1,85185} * L$$

Donde:

h= pérdida de carga, en (m).

C = coeficiente de rugosidad, adimensional.

Q = caudal, en (L/s)

d = diámetro de la tubería, en (mm)

L= longitud de la tubería, en (m)

2.4 Válvulas.

Las válvulas limitan la presión y el caudal en puntos específicos de la red, las cuales pueden estar completamente abiertas o cerradas (como serían las válvulas de retención), (Bosch, 2011):

Sus principales parámetros característicos son:

- Nodos de entrada y salida.
- Diámetro.
- Consigna (tarado).
- Estado.

Los diferentes tipos de válvulas que incluye WATERCAD son (Bentley, WaterCAD):

- Válvulas Reductoras de Presión (VRP en inglés PRV).
- Válvulas Sostenedoras de Presión (VSP en inglés PSV).
- Válvulas de Rotura de Carga (VRC en inglés PBV).
- Válvulas Controladoras de Caudal (VCQ en inglés FCV).
- Válvulas Reguladoras por Estrangulación (VRG en inglés TCV).
- Válvulas de Propósito General (VPG en inglés GPV).

Las VRP limitan la presión en su extremo aguas abajo para que no exceda de un valor de consigna prefijado, siempre y cuando la presión aguas arriba sea superior a ésta. Si la presión aguas arriba es inferior a la de consigna, entonces la válvula permite el paso del caudal sin restricciones. Por otra parte, si la presión aguas abajo resultara superior a la fijada, entonces la válvula cierra para impedir el flujo inverso.

Las VSP tratan de mantener una presión mínima de consigna aguas arriba, siempre y cuando la presión aguas abajo sea inferior a ella. Si la presión aguas abajo fuera superior a la de consigna, entonces la válvula abre el paso al flujo sin restricciones. Por otra parte, si la presión aguas abajo fuera superior a la de aguas arriba, entonces la válvula cierra para impedir el flujo inverso.

Las VRC fuerzan a que la caída de presión en la válvula al pasar el flujo a través de ella, tome siempre un valor de consigna constante prefijado. El flujo puede discurrir en ambos sentidos por la válvula.

Las VCQ limitan el caudal a través de la válvula a un valor de consigna prefijado. El programa emite un mensaje de advertencia si el caudal no puede alcanzar el valor prefijado sin aporte de presión aguas arriba de la válvula.

Una VRG simula una válvula parcialmente cerrada, ajustando adecuadamente el valor del coeficiente de pérdidas menores. Usualmente los fabricantes proporcionan la relación entre el grado de cierre de la válvula y el coeficiente de pérdidas resultante.

Las VPGs se utilizan para representar una línea con un comportamiento diferente y una relación caudal pérdidas que no abarcan las fórmulas hidráulicas estándar. Se utilizan para modelizar turbinas, pozos de aspiración o válvulas para reducir el caudal y controlar el flujo inverso.

2.5 Análisis del transitorio hidráulico.

El transitorio hidráulico (Golpe de Ariete) es una condición temporal de flujo y presión que ocurre en un sistema hidráulico entre un estado estacionario inicial y un estado estacionario final, cuando la velocidad cambia rápidamente como respuesta a la incorrecta o accidental operación de los dispositivos de control del flujo (por ejemplo el cierre rápido de una válvula o el paro de un equipo de bombeo), la compresibilidad del fluido y la elasticidad de la tubería provocan ondas de presión que se propagan a través del sistema. Si las magnitudes de estas ondas de presión y la resultante variación del flujo son lo suficientemente grandes y los dispositivos de control del transitorio no son los adecuados, puede ocurrir el fallo de los componentes del sistema (por ejemplo la explosión de una tubería) (Bosch, 2011).

2.5.1 Causas del inicio del transitorio.

Un transitorio hidráulico puede iniciarse debido a cualquier cambio que se produzca en el fluido en sí, o a un cambio repentino en las fronteras del sistema presurizado incluyendo (Pérez, 2005).

- Cambio en las propiedades del fluido, tales como: una disminución de la presión debido a la rápida abertura de una válvula de alivio, la propagación de un pulso de presión, calentamiento o enfriamiento en sistemas industriales, mezcla con sólidos u otros líquidos que afecten la densidad, peso específico y viscosidad del fluido, cavitación y entrada o salida de aire del sistema.
- Cambios en las fronteras del sistema: tales como la abertura o el cierre rápido de una válvula, la explosión o el colapso de una tubería y la parada de una bomba.

2.5.2 Breve descripción del fenómeno del transitorio.

Para describir el fenómeno del transitorio, se tomará como ejemplo el caso en que las bombas se detienen bruscamente debido a un fallo en el fluido eléctrico. Cuando esto ocurre, la bomba deja de suministrar energía, por lo que la rasante piezométrica cae rápidamente en la bomba y las bajas presiones se propagan aguas abajo hacia el tanque. En los puntos más elevados pueden ocurrir presiones por debajo de la atmosférica (carga mínima del transitorio), pero el tanque mantiene la presión aguas abajo según su nivel de agua, aceptando o supliendo el gasto con frecuencia durante el evento del transitorio.

El pulso de presión es reflejado hacia la bomba, pero al llegar se encuentra con una válvula de check cerrada, que lo refleja como una sobrepresión hacia el tanque (carga máxima del transitorio). Eventualmente la fricción atenúa la energía del transitorio y el sistema alcanza el estado estacionario final: una rasante piezométrica estática puesto que la bomba se ha detenido y el flujo hacia el tanque es cero. En la Figura 2 se muestra un esquema que ilustra este fenómeno (Bosch, 2011).

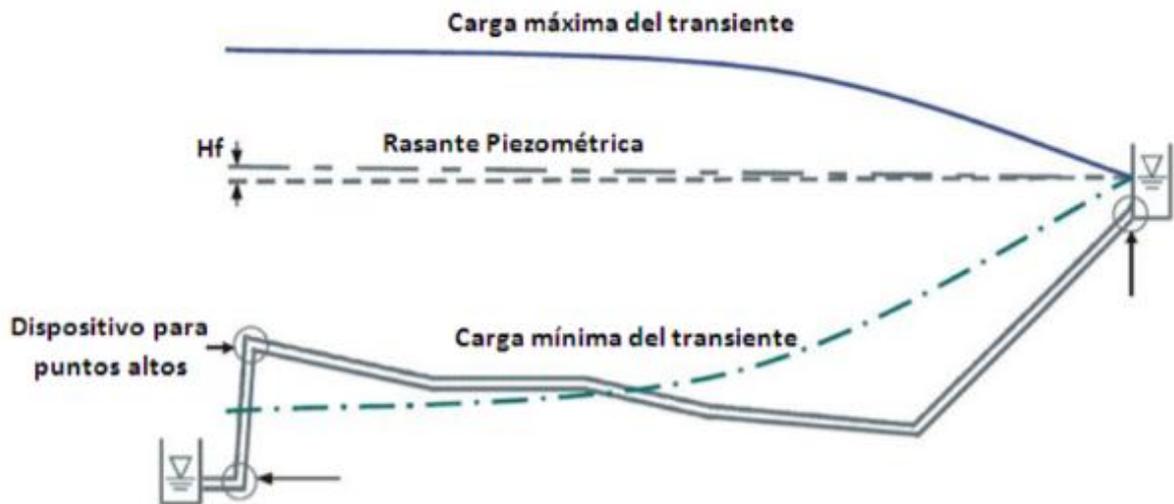


Figura 2. Esquema que ilustra el fenómeno del transitorio hidráulico.

2.5.3 Importancia de la consideración del golpe de ariete en tuberías.

La importancia que se le debe dar al fenómeno del golpe de ariete en todo sistema hidráulico es vital, para que puedan esperar resultados satisfactorios más aún poder contar con una vida útil apreciable del sistema.

Como se dijo en anteriormente que el fenómeno es de naturaleza no permanente (transitorio) y por tanto, de régimen variable implica que la tubería ya no será rígida y el líquido que fluye por él es comprensible, esto puede mostrarse, por ejemplo, en un sistema de bombeo en donde, al interrumpirse el suministro de energía, produce un paro simultáneo de las bombas, de aquí la importancia de un diseño y cálculo adecuado que garantice un golpe de ariete no excesivo que malogre las tuberías (Villamarin, 1991).

Añadiendo más sobre la importancia de este fenómeno se puede notar que es palpable no solo la presencia de altas presiones desarrolladas, sino el acompañamiento de ruidos excesivos. De hecho, también se imponen consideraciones en el diseño acerca de la fatiga y corrosión como resultado de la cavitación; el rompimiento del control del circuito hidráulico (Villamarin, 1991).

2.5.4 Dispositivos para reducir el efecto del golpe de ariete.

- Volantes de inercia
- Chimeneas de equilibrio
- Tanques hidroneumáticos
- Válvulas de alivio rápido
- Válvulas anticipadoras de onda
- Ventosas
- Válvulas de retención

Tanque hidroneumático (Calderín)

Consiste en un recipiente metálico parcialmente lleno de aire que se encuentra comprimido a la presión manométrica. Existen modelos en donde el aire se encuentra aislado del fluido mediante una membrana, con lo que se evita su disolución en el agua.

El calderín amortigua las variaciones de presión debido a la expansión prácticamente adiabática del aire al producirse una depresión en la tubería, y posteriormente a la compresión, al producirse una sobrepresión en el ciclo de parada y puesta en marcha de una bomba. Su colocación se realiza aguas debajo de la válvula de retención de la bomba. Se instala en derivación y con una válvula de cierre para permitir su aislamiento.

Este tipo de tanque sirve tres funciones principales (DOH, 2011):

1. Entregar el agua según un rango de presión seleccionada para que la bomba de agua no funcione sin parar.
2. Prevenir que una bomba no empiece de nuevo cada vez que el sistema de distribución haga una pérdida menor de agua.
3. Reducir al mínimo los golpes de ariete.

El tanque de presión mantiene el rango de ciclo de bombeo requerido para evitar que se sobrecaliente el motor de la bomba y produce una falla prematura del motor.

Los tanques hidroneumáticos funcionan mejor con un colchón de aire de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ de la capacidad total del tanque. Este colchón disminuye mientras el agua absorbe aire y el tanque pierde su capacidad de presurizar el sistema. Para evitar que pierda su capacidad de presurizar el sistema, debe haber un sistema automático para rellenar el volumen de aire. La adición de aire de forma manual no es la mejor manera para asegurar el funcionamiento propio a largo plazo.

2.6 Modelos de análisis de sistemas de abastecimiento de agua.

En la actualidad existen diversos programas computacionales para el análisis de redes de distribución. La gran mayoría de ellos cuentan con el Método del Gradiente Hidráulico como base de su algoritmo de cálculo. Dentro de estos programas (algunos de código abierto y algunos comerciales) se encuentran:

- EPANET
- WaterCAD
- WaterGEMS
- H2O Map
- GESTAR
- ROKO
- EpaRed
- CONAGUA

Para el análisis de la conductora del acueducto “OCHOITA” se utilizará el software Bentley WaterCAD, software multiplataforma para el análisis hidráulico de sistemas de abastecimiento de agua.

2.6.1 Software Bentley WaterCAD:

El software WaterCAD fue originalmente desarrollado por la Empresa Haestad Methods, Inc. con base en Watertown, CT (USA). Esta empresa fue adquirida por Bentley Systems a mediados del año 2004, adquisición a partir de la cual el producto comenzó a denominarse comercialmente como Bentley WaterCAD.

WaterCAD es producto cuyo lanzamiento se realizó a comienzos del siglo XXI y es un software posterior al producto WaterGEMS de la misma casa de software. Para muchos expertos, WaterCAD es fundamentalmente un licenciamiento del mismo. En este sentido, es un software cuyo usuario objetivo es la empresa operadora de abastecimientos, entes reguladores y/o importantes proyectos de consultoría.

Bentley WaterCAD cuenta no solo con una solución robusta para la modelación hidráulica, sino también con herramientas avanzadas y módulos de calibración hidráulica, optimización de bombeos y diseño optimizado usando algoritmos genéticos. Entre las características más importantes del software se encuentran:

- Cuenta con las herramientas del administrador de escenarios, las cuales brindan gran flexibilidad mediante el uso de diferentes combinaciones de alternativas. Tanto los grupos de alternativas como de escenarios, pueden ser administrados de manera jerárquica bajo una estructura parental (padre e hijo).

Da la posibilidad de realizar una calibración hidráulica a través del módulo Darwin Calibrator. Esta herramienta basada en una implementación de algoritmos genéticos, puede gestionar múltiples situaciones específicas de demandas y condiciones de frontera de una jornada de medición de datos.

- WaterCAD a través del módulo Darwin Designer ofrece una herramienta para diseño optimizado de redes y/o rehabilitación, permitiendo desarrollar análisis de: Costo Mínimo, Máximo Beneficio y Análisis Multi-Objetivo entre costos y rendimiento hidráulico.
- Presenta herramientas de análisis extendido como: análisis de segmentación y estado crítico, análisis de incendio, análisis de vaciado uni-direccional, análisis de costos de energía e integración a Bentley HAMMER para el análisis de transitorios hidráulicos.

- El módulo de análisis crítico (Criticality Analysis) permite soportar las labores operativas y evaluar el impacto de fallos en el sistema por roturas o labores de mantenimiento, cuantificando el impacto en el servicio que conlleva el aislamiento de tramos. Lo que distingue a WaterCAD es la capacidad de realizar este análisis considerando la localización exacta y el estado de las válvulas de aislamiento del sistema.

2.6.2 Software Bentley HAMMER.

Bentley HAMMER es un software que se especializa en el análisis del transitorio hidráulico, la localización de problemas en el sistema y la determinación de las estrategias apropiadas para el control de este fenómeno.

El motor de cálculo de Bentley HAMMER para el análisis dinámico de transitorios hidráulicos está basado en el Método de las Características (MOC). Los principales investigadores del fenómeno del transitorio están de acuerdo en que el Método de las Características, es el más adecuado para resolver rigurosamente las ecuaciones de continuidad y momentum del fenómeno tanto en sistemas simples como complejos.

Este software permite simular el impacto de una amplia variedad de equipos destinados a proteger el sistema frente a los efectos del Golpe de Ariete. El usuario puede seleccionar más de 20 dispositivos y ejecutar un número ilimitado de escenarios de operación, para desarrollar y definir la estrategia más adecuada encaminada a la mitigación de la sobrepresión.

Por otra parte, presenta herramientas de análisis y visualización de datos que permiten capturar el rápido movimiento del fenómeno del transitorio, determinar su impacto en el sistema, y seleccionar el equipo más adecuado para la protección del mismo.

CAPÍTULO III Modelación y Análisis Hidráulico de la Conectora.

3.1 Descripción de sistema

Sistema Minerva:

La presa Minerva se encuentra a 17 km de la ciudad de Santa Clara, su volumen de agua ha sido destinado para el riego y para el abasto a la población y las industrias. Este sistema bombea en la actualidad un total de 900 L/s hasta el tanque rompedor de presiones de 180 m³ de capacidad ubicado en la Loma La Jutía, desde donde por gravedad se conduce el agua hasta un registro distribuidor, donde se derivan las aguas hasta la industria textil "Desembarco del Granma" y la UCLV por dos conductoras respectivamente, las cuales son reguladas por válvulas para hacer pasar los gastos. Por una tercera el resto del gasto llega a la potabilizadora Ochoita que es el caso de estudio. De estos 900 L/s, son destinados para la ciudad 715 L/s de los cuales llegan a la planta potabilizadora para su tratamiento e impulsión hacia la ciudad aproximadamente 630 L/s. En la Figura 3 se muestra una imagen satelital donde se pueden observar los distintos componentes del sistema.

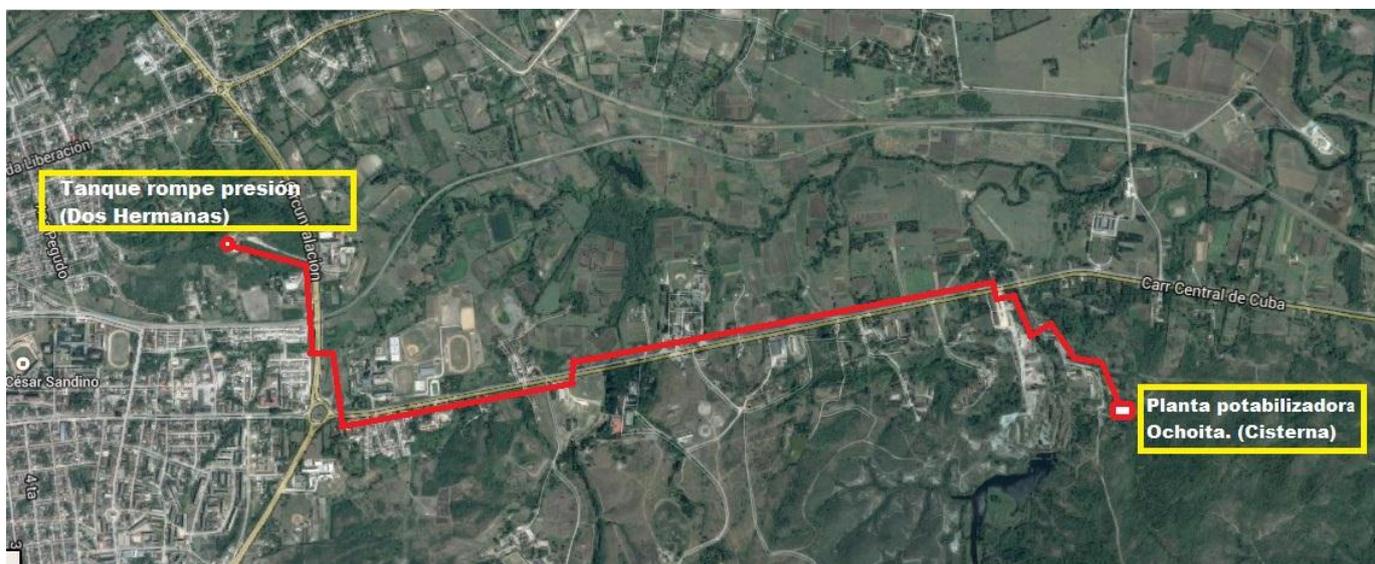


Figura 3. Imagen satelital del sistema Ochoita

3.1.1 Características de la Conductor

De la cisterna de aguas claras se bombea hasta la elevación donde está ubicado el tanque rompe presión a través de un conducto de 4.9 km de longitud, el cual 20 m es de acero de 500 mm de diámetro dentro del estación de bombeo y el resto de 4.7 km es de PEAD de 800 mm de diámetro.

A continuación se presentan las características fundamentales de este conducto de acero.

- Diámetros interiores: 360, 250 y 200 mm
- Longitud por unidad: 1 m
- Cantidad de unidades: 25
- Longitud total: 25 m

Las características de la conductora PEAD son:

- Diámetro exterior: 800 mm
- Diámetro interior: 705,2; 723,8 y 742,0 mm (de acuerdo a la presión sobre corona)
- Clase de la tubería: PN-1.0; 0.8 y 0.6 mPa respectivamente.
- Material: PEAD con acople por termofusión.
- Longitud: 1211; 3114 y 458,53 m correspondientemente.

A la salida de la estación de bombeo existen tramos de PEAD de considerable longitud y diámetros como son los casos de los tramos: Nudo 6-Válvula de aire 6 (1,06 km y 705,2mm de diámetro), Válvula de aire 6 – Nudo 13 (1,22 km y 723,8 mm de diámetro), Nudo 13 - Nudo 53 (147 m y 723,8 mm de diámetro), Nudo 53 - Nudo 23 (1,90 m y 723,8 mm de diámetro), Nudo 23 - tanque rompe presión (358,53 m y 742,0 mm de diámetro).

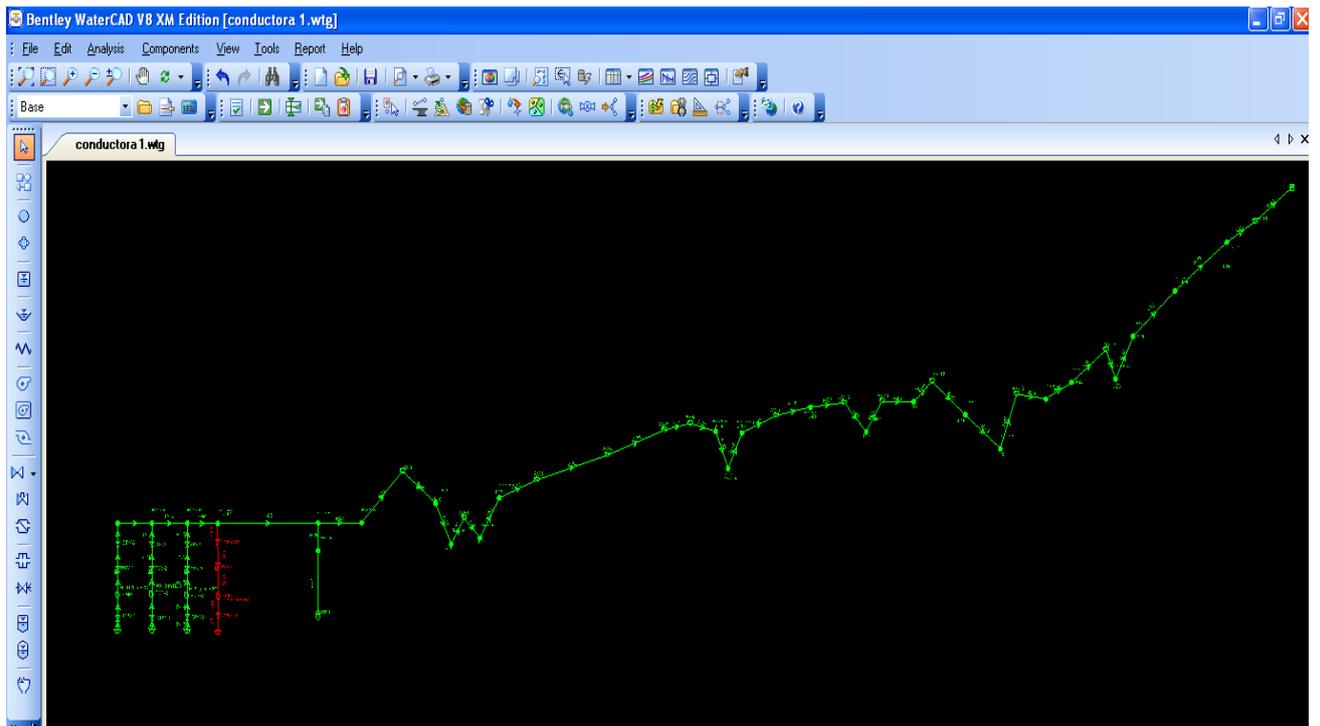


Figura 4. Modelo de la conductora en WaterCAD.

3.1.2 Estación de Bombeo

La estación de bombeo de la Planta Potabilizadora Ochoíta cuenta con cuatro equipos de bombeo instalados, de los cuales, tres de ellos permanecen en funcionamiento durante las 24 h/d y el cuarto actúa como rotación y reserva de la operación.

Las bombas instaladas presentan carga positiva en la succión y lo hacen directamente de la cisterna de aguas claras de la planta potabilizadora, donde el nivel de agua puede alcanzar desde 0.80 m por encima del eje de succión de las bombas, como valor normal para la succión de éstas, hasta 2.32 m como valor máximo, siendo 102.90 y 104.43 m las cotas absoluta para el nivel de aguas normales y el nivel de aguas máximas de la cisterna respectivamente.

Las bombas son de SALMSON tipo ASP 200CS, con una eficiencia $\eta = 85\%$ y una velocidad de rotación $n = 1750$ rpm, trabajando en su punto de operación con un caudal $Q = 207$ L/s y una carga $H = 91$ mca, accionadas por motores eléctricos.

Tabla 1. Características de la estación de bombeo.

Características	U/M	Valor
Nivel máximo en la succión	m	104.43
Nivel normal en la succión		102.90
Cota eje de tubería		102.11
Momento volante (GD^2)	kg*m ²	56.2
Velocidad de rotación nominal	rpm	1750
Potencia	kW	250

$$GD^2 = 600 \left(\frac{P}{n} \right)^{1,435}$$

Donde:

GD^2 – Momento volante en kg*m²

P- Potencia en HP

n- velocidad en rpm

$$P = \frac{\gamma * Q * H_b}{1000 * \eta}$$

Donde:

P- Potencia en kW

γ - Peso específico del agua

H_b - carga de la bomba en m

η - eficiencia de la bomba

3.1.3 Depósito.

El sistema de abasto Ochoita no cuenta en la actualidad con un tanque de distribución que regule la entrega y consumo de agua, aspecto que redundaría en la deficiencia y baja calidad del servicio en la entrega de agua a la ciudad. En su lugar se encuentra colocada en la loma Dos hermanas, detrás de la Escuela Vocacional de Arte y en el extremo final de la conductora, una chimenea de equilibrio que cumple la función de romper la carga de bombeo y suministrar el agua al sistema por gravedad.

3.2 Creación del modelo en WaterCAD

Para comenzar a trabajar con el software WaterCAD. El primer paso fue tomar todos los puntos característicos del perfil de la conductora Ochoita. Estos puntos característicos incluyen las cotas de la rasante de tubería en sus puntos más bajos y altos y donde cambie la presión nominal y el diámetro de la conductora. La longitud de los tramos es la diferencia entre las estacionadas.



Figura 5. Plano de la conductora Ochoita.

Luego, se comienza a ubicar los distintos elementos que servirán para modelar la estación de bombeo desde la cisterna en el sistema, estos elementos son:

1. Reservorio. Es un nudo de almacenamiento especial, donde existe una superficie de agua libre, y la carga hidráulica es la elevación de dicha superficie sobre el nivel del mar. Con este elemento se representó la cisterna aguas claras de la fuente de abasto.
2. Bombas. Son elementos que agregan carga al sistema a medida que el agua pasa a través de ellas. Cada bomba se define en el modelo a través de la opción Pump Definitions (definiciones de la bomba), donde se entran datos como las curvas características del equipo, la potencia y eficiencia del motor.

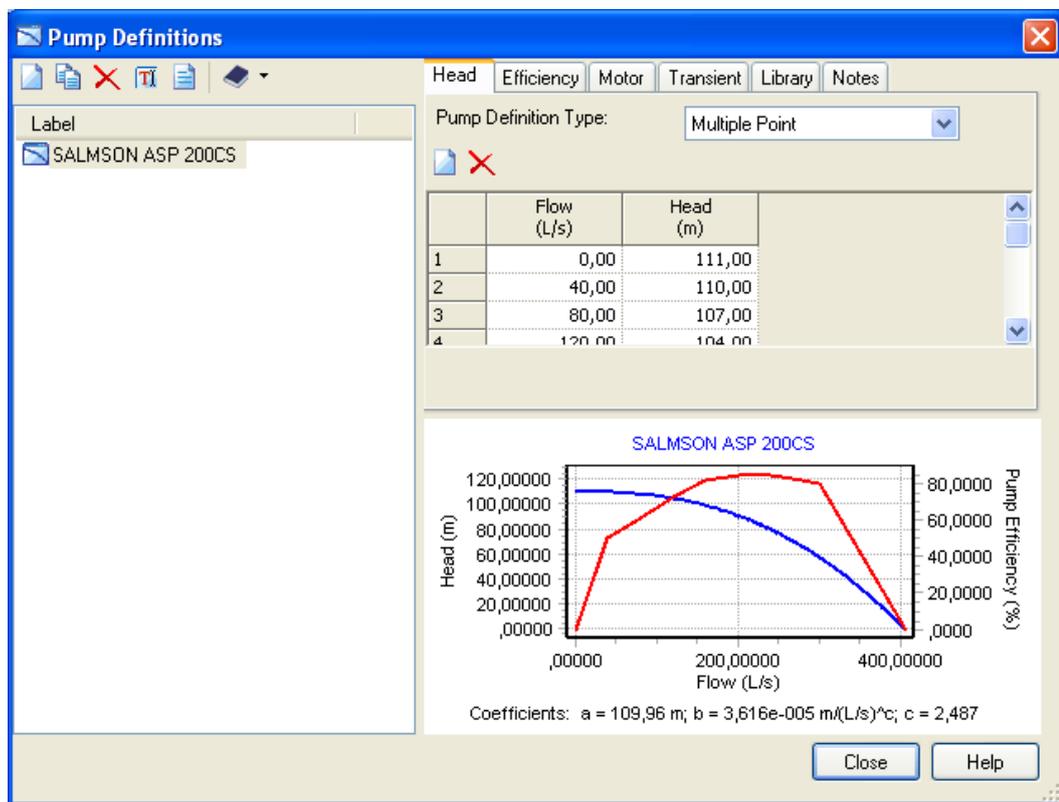


Figura 6. Cuadro de diálogo de definición del equipo de bombeo.

3. Válvulas

Entre la bomba y el reservorio, hay una válvula de cierre de tipo compuerta de diámetro nominal de 350 mm y una reducida de 360 mm a 200 mm de diámetro para conectar a la bomba. La longitud entre cada pieza es de 1 m para simular el comportamiento de la bomba. De la bomba sigue siendo una tubería de acero soldable hasta un nudo que une la tubería de 500 mm de diámetro. Entre la bomba y el mismo nudo están ubicadas; una expansión de 200 mm a 250 mm

de diámetro, una válvula de sostención de presión de tipo globo del diámetro 250 mm, además una válvula de cierre de tipo compuerta de 250 mm de diámetro nominal y una expansión de 250 mm a 360 mm de diámetro.

Las tres líneas de bomba que sale de la cisterna están conectadas a una tubería de 20 m de longitud de 500 mm de diámetro.

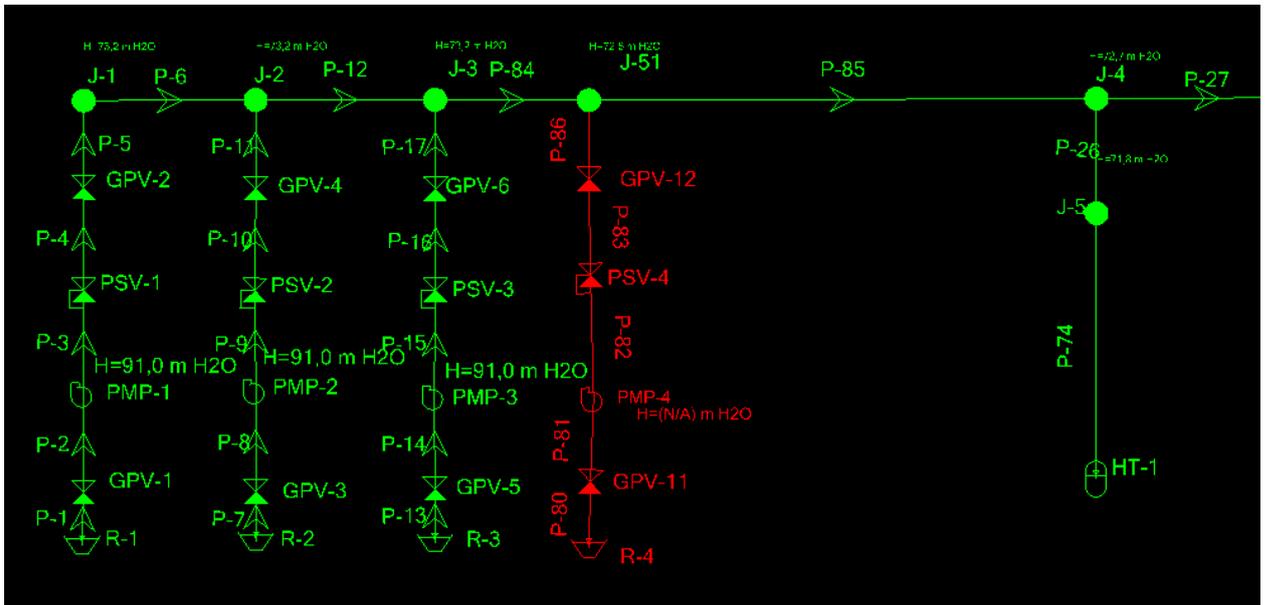


Figura 7. Modelo de la estación de bombeo.

Tabla 2. Resultados de las Bombas.

Label	Elevation (m)	Pump Definition	Status	Intake Grade (m)	Discharge (L/s)	Pump Head (m)
PMP-1	102.19	SALMSON ASP 200CS	On	104.35	207.39	89.04
PMP-2	102.19	SALMSON ASP 200CS	On	104.35	207.39	89.04
PMP-3	102.19	SALMSON ASP 200CS	On	104.35	207.39	89.04
PMP-4	102.19	SALMSON ASP 200CS	Off	(N/A)	(N/A)	(N/A)

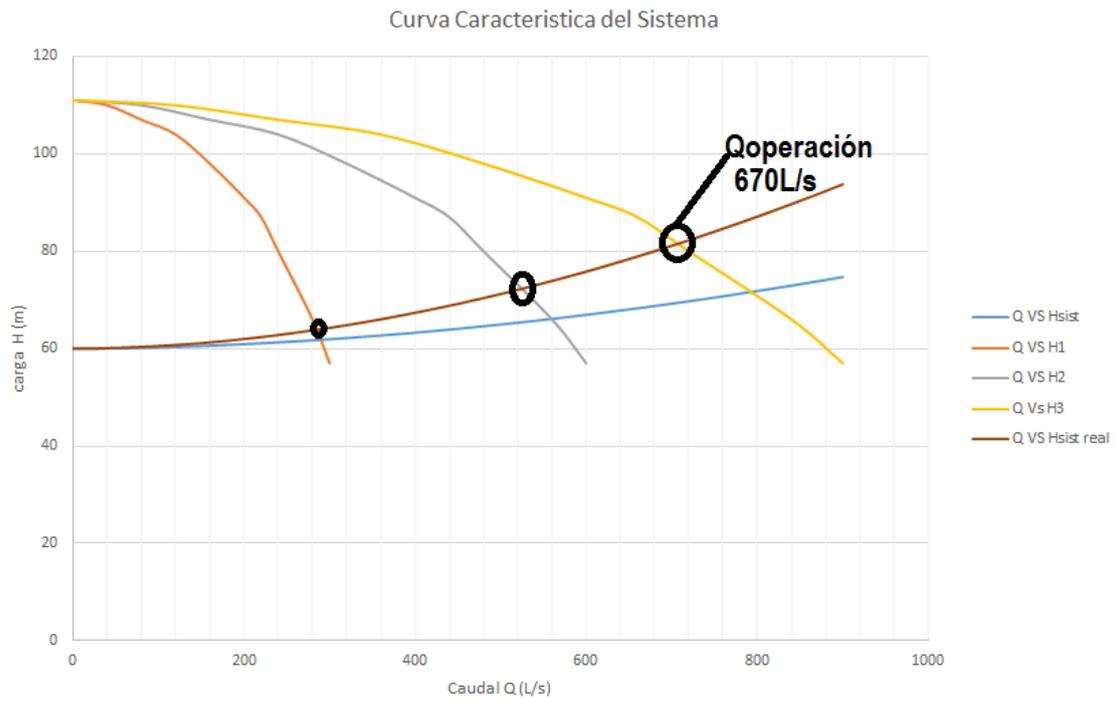


Figura 8. Curva Característica del Sistema.

En la figura anterior, se puede ver el punto de operación de las bombas, siendo las curvas de Q vs H1, H2 y H3 representativas de 1, 2 y 3 bombas respectivamente. Mientras que las curvas Q vs Hsist y Q vs Hsist real vienen dadas al considerar las pérdidas menores que ocurren en la instalación.

Se puede apreciar que según la figura el punto de operación está en aproximadamente 670 L/s, el cual es mayor que el que dio el programa que es de 622 L/s. La diferencia viene dada a que cuando se calcularon las pérdidas en la válvula de globo, el coeficiente de pérdida que se utilizó fue el de la válvula completamente abierta, mientras que en la modelación se hizo una estrangulación en las válvulas.

Depósitos:

Como se ha explicado anteriormente, en el sistema, existe un tanque rompe presión. De este depósito hay que definir ciertos parámetros para entrarlos como datos en el modelo, estos datos se muestran en la tabla.

Tabla 3. Datos del depósito.

Datos del Modelo	Tanque el rompe de presión
Cantidad	1
Geometría	circular
Elevación de la base (m)	164
Nivel mínimo (m)	164.5
Nivel máximo (m)	164.6
Nivel inicio (m)	164.5

3.3 Cálculos hidráulicos.

Pérdidas en los accesorios:

Las pérdidas en los accesorios (válvulas de compuerta) fueron calculadas a través de la fórmula:

$$h = k \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h = pérdida de carga, en (mca).

k = coeficiente de pérdida, adimensional.

v = velocidad media del flujo, en (m/s)

g = aceleración de la gravedad, en (m/s²)

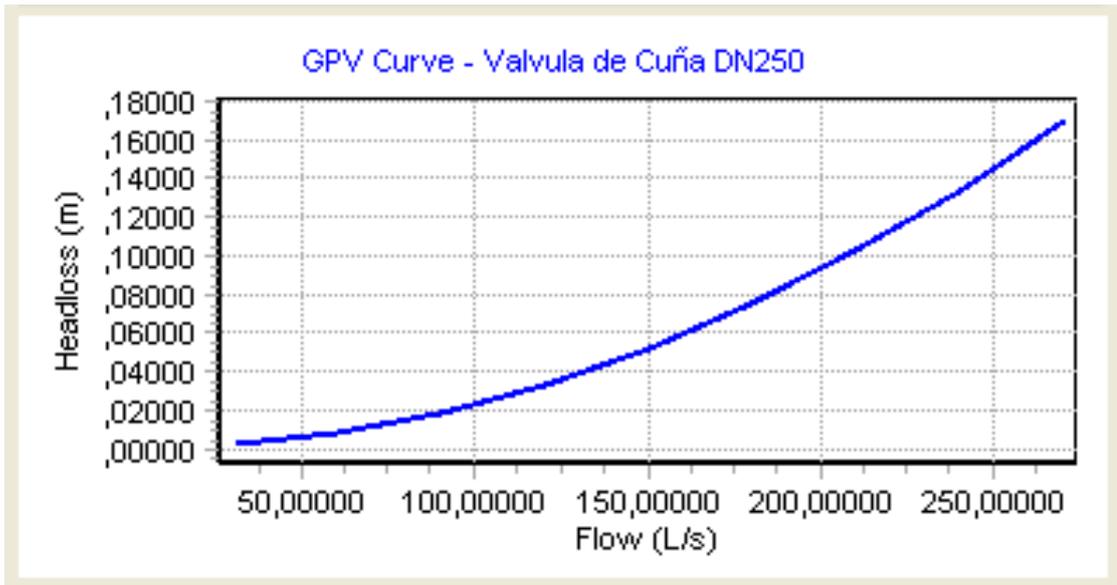


Figura 9. Curva de pérdidas en la válvula de compuerta DN 250 mm.

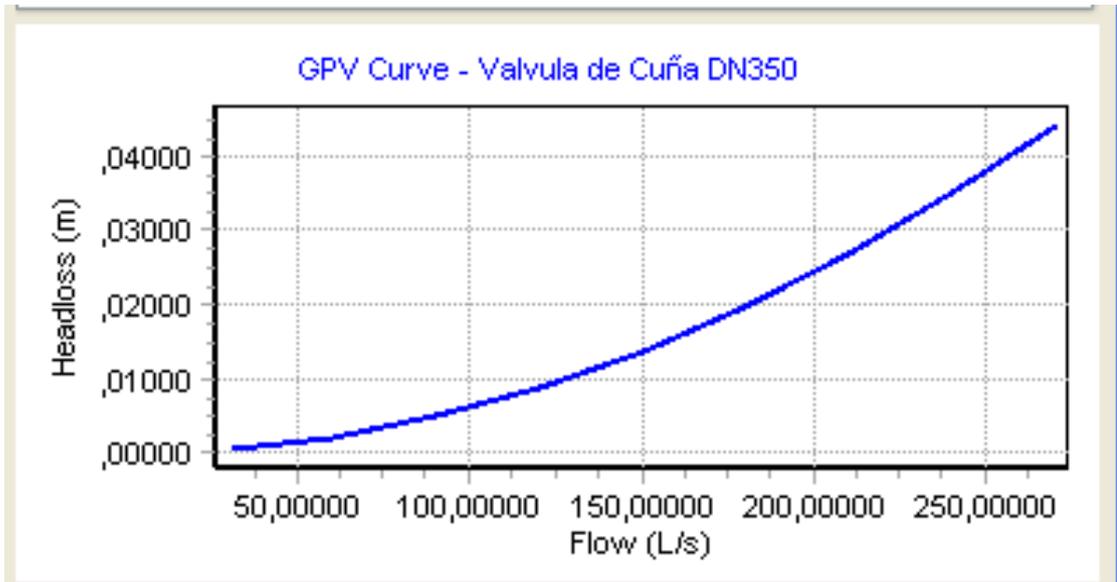


Figura 10. Curva de pérdidas en la válvula de compuerta DN 350 mm.

Para las pérdidas en las reducciones y expansiones, a la tubería se le asigna una reducción o expansión según el caso, con una relación $\frac{D_{\min}}{D_{\max}}$ para obtener pérdidas menores en esa tubería.

Asignación de las Rugosidades al Modelo:

Una vez colocadas las tuberías en el modelo, es necesario adicionarles una serie de datos tales como: longitud (en caso de que el usuario quiera definirla, de lo contrario, toma un valor automático según la escala del dibujo), diámetro y material. En el caso del material, es muy importante definir el parámetro C de Williams-Hazen, que caracterizará la rugosidad de las tuberías. Cuanto más cercanos a la realidad sean los datos de entrada del modelo, más sencillo será el proceso de calibración del mismo.

Tabla 4. Resumen de los resultados en los tramos de tubería.

Id	Label	Start Node	Stop Node	Diameter (mm)	Material	Hazen-Williams C	Minor Loss	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Headloss Gradient (m/m)	Length (User Defined) (m)
37	P-26	J-6	J-5	350,0	Steel	100,0	1,280	0,00	0,00	0,000	2,00
51	P-1	R-1	GPV-1	360,0	Steel	100,0	0,000	207,39	2,04	0,017	1,00
52	P-2	GPV-1	PMP-1	350,0	Steel	100,0	0,070	207,39	2,16	0,036	1,00
53	P-3	PMP-1	PSV-1	250,0	Steel	100,0	0,030	207,39	4,22	0,125	1,00
54	P-4	PSV-1	GPV-2	250,0	Steel	100,0	0,000	207,39	4,22	0,098	1,00
55	P-5	GPV-2	J-1	360,0	Steel	100,0	0,030	207,39	2,04	0,023	1,00
58	P-6	J-1	J-2	500,0	Steel	100,0	0,000	207,39	1,06	0,003	3,10
59	P-12	J-2	J-3	500,0	Steel	100,0	0,000	414,79	2,11	0,012	3,10
65	P-7	R-2	GPV-3	360,0	Steel	100,0	0,000	207,39	2,04	0,017	1,00
66	P-8	GPV-3	PMP-2	350,0	Steel	100,0	0,070	207,39	2,16	0,036	1,00
67	P-9	PMP-2	PSV-2	250,0	Steel	100,0	0,030	207,39	4,22	0,125	1,00
68	P-10	PSV-2	GPV-4	250,0	Steel	100,0	0,000	207,39	4,22	0,098	1,00
69	P-11	GPV-4	J-2	360,0	Steel	100,0	0,030	207,39	2,04	0,023	1,00
76	P-13	R-3	GPV-5	360,0	Steel	100,0	0,000	207,39	2,04	0,017	1,00
77	P-14	GPV-5	PMP-3	350,0	Steel	100,0	0,070	207,39	2,16	0,036	1,00
78	P-15	PMP-3	PSV-3	250,0	Steel	100,0	0,030	207,39	4,22	0,125	1,00

79	P-16	PSV-3	GPV-6	250,0	Steel	100,0	0,000	207,39	4,22	0,098	1,00
80	P-17	GPV-6	J-3	360,0	Steel	100,0	0,030	207,39	2,04	0,023	1,00
85	P-27	J-6	J-7	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	5,00
90	P-28	J-7	AV-2	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	80,00
92	P-29	AV-2	J-8	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	293,58
94	P-30	J-8	J-9	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	22,42
96	P-31	J-9	AV-4	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	24,00
98	P-32	AV-4	J-10	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	60,00
100	P-33	J-10	J-11	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	35,50
102	P-34	J-11	AV-5	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	24,50
104	P-35	AV-5	AV-6	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	520,00
106	P-36	AV-6	AV-7	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	464,96
114	P-37	AV-7	AV-8	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	622,04
116	P-38	AV-8	J-12	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	73,00
118	P-39	J-12	J-13	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	60,00
120	P-40	J-13	J-14	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	80,00
126	P-45	AV-10	J-16	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	68,00
128	P-46	J-16	AV-11	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	112,00
130	P-47	AV-11	J-17	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	80,00
132	P-48	J-17	AV-12	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	20,00
134	P-49	AV-12	J-18	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	120,00
136	P-50	J-18	J-19	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	80,00
138	P-51	J-19	AV-13	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	20,00
156	P-52	AV-13	J-20	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	65,30
158	P-53	J-20	J-21	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	29,70
160	P-54	J-21	AV-14	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	165,00
162	P-55	AV-14	J-22	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	43,00
164	P-56	J-22	J-23	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	142,10
170	P-59	AV-15	T-1	742,0	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,44	0,002	100,00
188	P-74	J-5	HT-1	350,0	Steel	100,0	0,220	0,00	0,00	0,000	5,00
191	P-43	AV-9	J-15	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	29,00
192	P-44	J-15	AV-10	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	591,00
194	P-57	J-23	J-24	742,0	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,44	0,002	308,43
195	P-58	J-24	AV-15	742,0	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,44	0,002	50,00

199	P-80	R-4	GPV-11	360,0	Steel	100,0	0,000	(N/A)	(N/A)	(N/A)	1,00
201	P-81	GPV-11	PMP-4	350,0	Steel	100,0	0,070	(N/A)	(N/A)	(N/A)	1,00
203	P-82	PMP-4	PSV-4	250,0	Steel	100,0	0,030	(N/A)	(N/A)	(N/A)	1,00
205	P-83	PSV-4	GPV-12	250,0	Steel	100,0	0,000	(N/A)	(N/A)	(N/A)	1,00
207	P-84	J-3	J-4	500,0	Steel	100,0	0,080	622,18	3,17	0,038	3,21
208	P-85	J-4	J-6	500,0	Steel	100,0	0,080	622,18	3,17	0,029	10,59
209	P-86	GPV-12	J-4	350,0	Steel	100,0	0,030	(N/A)	(N/A)	(N/A)	1,00
212	P-41	J-14	J-53	705,2	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,59	0,002	67,00
213	P-42	J-53	AV-9	723,8	PEAD	145,0	0,000	622,18	1,51	0,002	293,00

De la tabla anterior se puede observar que las velocidades en la conductora son aceptables ya que cumple con la norma según el Instructivo de PEAD 3ra versión (2013) en la tabla que aparecen en el anexo 2 que dice que no deben superar 3m/s en aguas limpias. También se puede ver que las pérdidas de carga según la fórmula de Williams-Hazen que utiliza el software, son muy pequeñas. Se puede concluir que se acepta el modelo desde el punto de vista del análisis hidráulico, entonces se procede con el análisis de transitorio hidráulico.

Rasante Piezométrica

Es la presión en cada nodo, obtenida sumando la elevación (z) a la presión de agua en mca. A continuación se muestra los resultados según el WaterCAD:

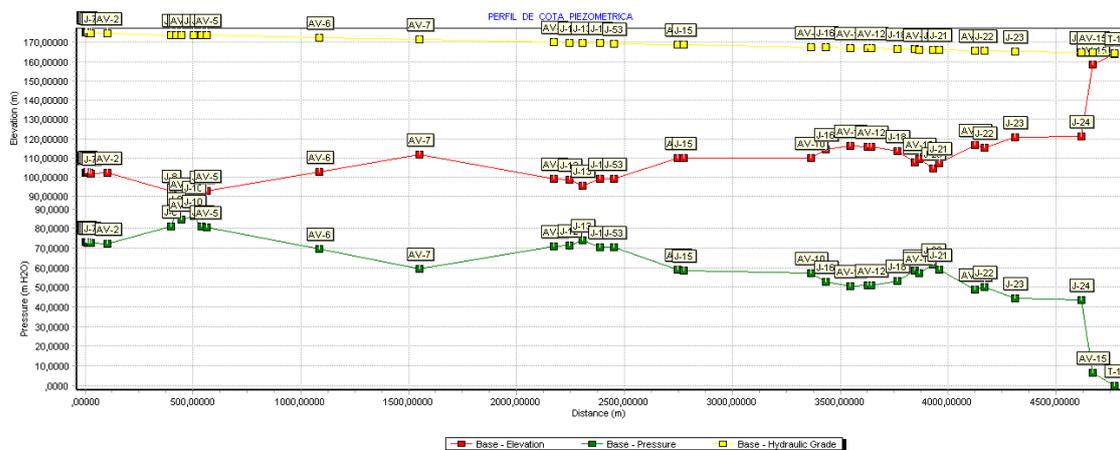


Figura 11. Rasante Piezométrica.

CAPÍTULO IV. ANALISIS DEL GOLPE DE ARIETE

En el capítulo anterior se modeló y analizó el comportamiento hidráulico en el software Bentley WaterCAD, la conductora de abasto de agua “Ochoita”, con el objetivo de tener un modelo confiable que fuera capaz de simular el comportamiento del sistema bajo cualquier condición. En esta modelación sin embargo, no se incluyeron los dispositivos de control del fenómeno del Golpe de Ariete. Esta exclusión se hizo con la intención de analizar el transitorio hidráulico con otro software llamado Bentley HAMMER, que se dedica especialmente al análisis de este fenómeno.

4.1. Consideraciones teóricas.

4.1.1 Creación del modelo.

Según se ha explicado anteriormente el software que se utilizó para modelar la conductora de abasto de agua “Ochoita” fue el Bentley WaterCAD y para analizar el fenómeno del transitorio hidráulico se empleará el Bentley HAMMER. Como sus nombres lo indican, estos programas pertenecen a la misma familia y por lo tanto son totalmente compatibles. Esto quiere decir que si ya se tiene el sistema modelado en WaterCAD con todos los datos de las bombas, presiones, rugosidad de las tuberías, etc.; lo único que se debe hacer es importar desde el Bentley HAMMER, el modelo que se hizo en WaterCAD con todos sus datos; de esta forma ya se tiene el modelo en el software listo para ser analizado.

4.1.2 Selección del evento a simular.

Cualquier cambio que se produzca en el caudal o la presión, en cualquier punto del sistema puede ocasionar un transitorio hidráulico. Si este cambio es gradual, las presiones resultantes del transitorio puede que no sean severas. Sin embargo si el cambio del flujo es rápido, la presión del transitorio resultante puede ocasionar una sobrepresión.

Existen una gran cantidad de posibles causas que pueden provocar un cambio brusco en las condiciones de un sistema de tuberías, incluyendo: fallas en el fluido eléctrico, rotura de tuberías, y un rápido cierre o abertura de válvula. Estos cambios pueden ocurrir por causas naturales, mal funcionamiento de los equipos o errores del operador. Es muy importante considerar las diferentes formas en que un transitorio hidráulico puede ocurrir en un sistema y modelarlas.

En este trabajo se simulará el impacto de un fallo eléctrico que dura varios segundos. Se asume que la electricidad es interrumpida rápidamente y sin previo aviso, por lo que todas las bombas se apagan bruscamente. El propósito de este tipo de análisis es determinar hasta qué punto el sistema y sus componentes pueden resistir las presiones resultantes del transitorio para el caso más crítico.

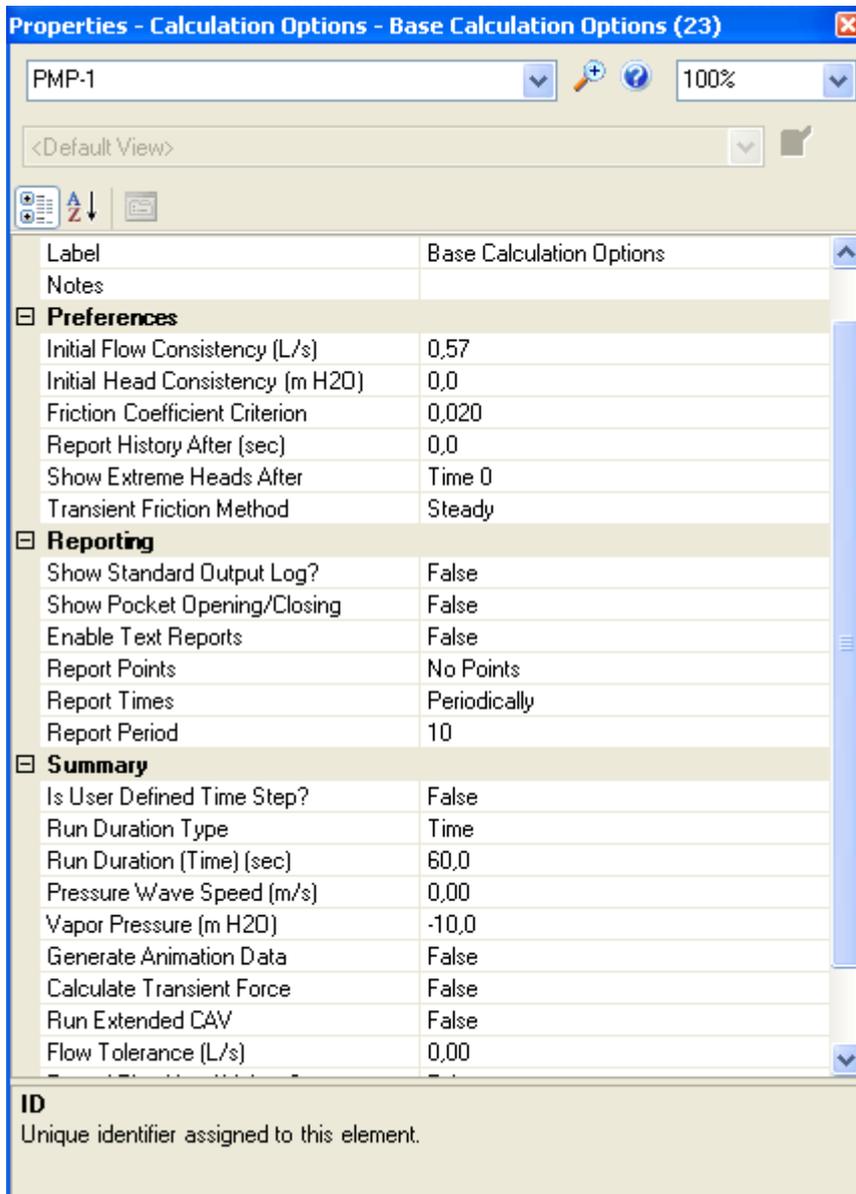


Figura 12. Tiempo de análisis.

4.1.3 Estrategia a seguir en la modelación.

Según las recomendaciones del propio software utilizado, para la realización de un adecuado análisis del transitorio se deben seguir los siguientes pasos:

1. Analizar el sistema como fue diseñado (sin ningún equipo de protección) para determinar su vulnerabilidad al evento del transitorio.
2. Seleccionar y modelar los equipos de protección para controlar las presiones producto del transitorio.
3. Presentar los resultados que expliquen su estrategia de protección y algunas recomendaciones.

4.2 Comportamiento del sistema sin dispositivos de protección.

Tal como se explicó en el epígrafe anterior, el primer paso para realizar un adecuado análisis del fenómeno del transitorio en el sistema, es determinar su comportamiento ante este evento sin dispositivos de protección. Para los efectos de la modelación, esto implica que en este momento se simula el transitorio tal y como se importó el modelo del WaterCAD, sin sufrir ningún cambio.

Como se dijo anteriormente el evento a simular es un fallo en el fluido eléctrico que provoca que todas las bombas se apaguen, por lo tanto el problema real está en toda la conductora, desde la cisterna hasta el tanque rompe presión.

A continuación en la Tabla 5 se muestran los resultados de las presiones y cargas máximas y mínimas obtenidas después de la simulación del sistema, sin dispositivos de protección.

Tabla 5. Resultados de la simulación del transitorio sin dispositivos de protección.

Grupo	Nodo	Presión (mH2O)	Max. Presión (mca)	Min. Presión (mca)
Estación de bombeo	J-1	73,1	95,2	22,5
	J-2	73,1	95,2	22,5
	J-3	73,1	95,1	22,5
	J-6	72,6	95,0	22,6
	J-5	(N/A)	(N/A)	(N/A)
Conductora	J-7	72,7	95,1	22,7
	J-9	80,9	102,8	32,0
	J-10	87,8	109,7	39,0
	J-12	86,5	108,0	37,9
	J-13	81,2	102,7	32,8
	J-18	71,1	88,2	27,4
	J-19	74,0	90,7	30,4
	J-20	70,4	86,6	27,0
	J-25	52,8	58,4	18,6
	J-27	51,0	54,0	20,1
	J-29	53,0	54,1	24,5
	J-30	58,4	58,7	31,3
	J-32	61,5	61,6	36,2
	J-33	58,8	58,9	34,2
	J-35	50,1	50,2	30,6
	J-36	44,4	44,5	28,9
	J-23	58,6	71,7	16,8
	J-37	43,6	43,7	38,1
	J-4	72,5	94,6	22,1
	J-21	70,2	85,8	27,1
J-8	72,1	94,6	22,3	
J-11	84,7	106,5	35,9	

	J-14	80,7	102,2	32,4
	J-15	69,6	90,7	22,9
	J-16	59,5	79,3	14,1
	J-17	70,9	88,5	27,1
	J-22	58,8	72,1	16,8
	J-24	57,3	63,8	22,0
	J-26	50,6	54,5	18,3
	J-28	51,0	53,7	20,4
	J-31	56,9	57,0	30,2
	J-34	48,8	48,9	28,2
	J-38	6,3	6,4	2,6

De la tabla anterior se puede deducir que el modelo sin protección, es sumamente vulnerable, ya que en la mayoría de las tuberías, las presiones máximas sobrepasan las presiones nominales de las tuberías ya mencionadas en el capítulo anterior, es por eso que hay diferencia entre las presiones del agua y las presiones máximas.

El resultado del análisis anterior es completamente lógico, ya que en el diseño original de la conductora "Ochoita - Dos Hermanas", están incluidos los dispositivos necesarios para el control del transitorio.

En las figuras 13 se muestra de forma gráfica el comportamiento del sistema elaborado para condiciones transitorias. En estos perfiles se muestran además las envolventes de presiones de agua (línea verde) presiones máximas (línea amarilla) y mínimas (línea azul).

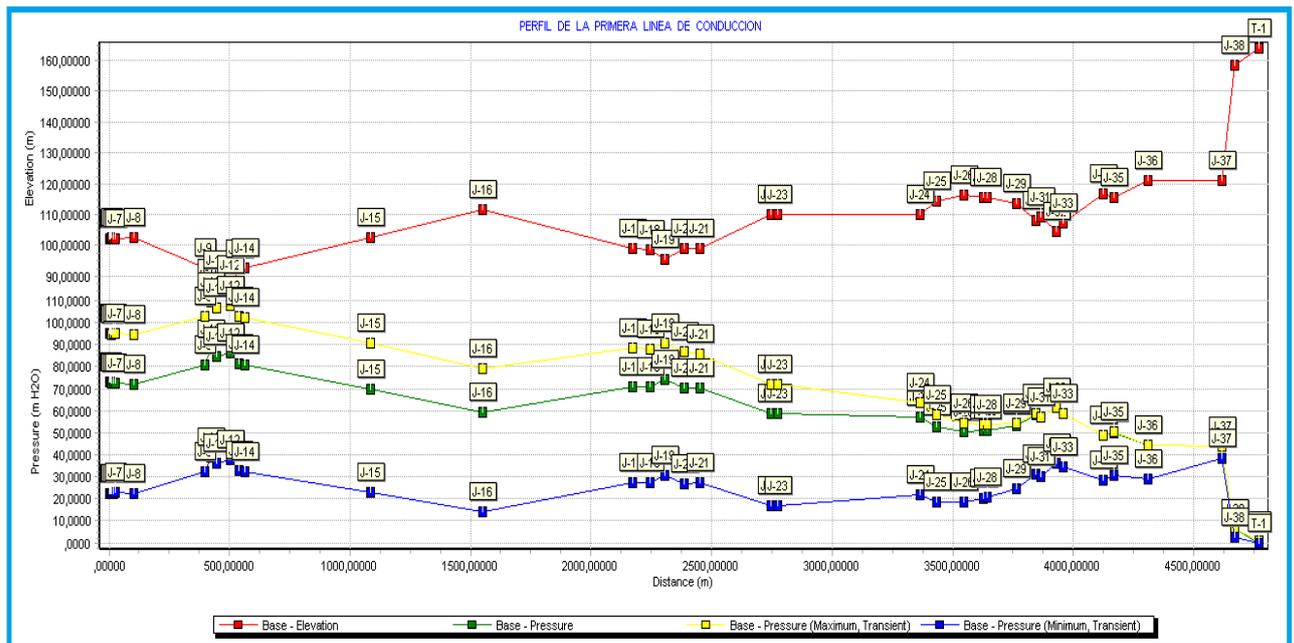


Figura 13. Condiciones transitorio sin dispositivo.

4.3 Análisis del sistema con los dispositivos de protección.

Como es de suponer el análisis del sistema con los dispositivos de protección, se hará con los que existen actualmente en el sistema, de esta forma se podrá saber si dichos dispositivos son eficientes desde el punto de vista teórico en el control del transitorio hidráulico.

4.3.1 Dispositivos de control que se encuentran en el sistema.

En el sistema de la conductora “Ochoita” se encuentran los siguientes dispositivos:

1. Válvulas de Aire
2. Tanque hidroneumático



Figura 14. Tanque hidroneumático que se encuentra en la estación de bombeo.

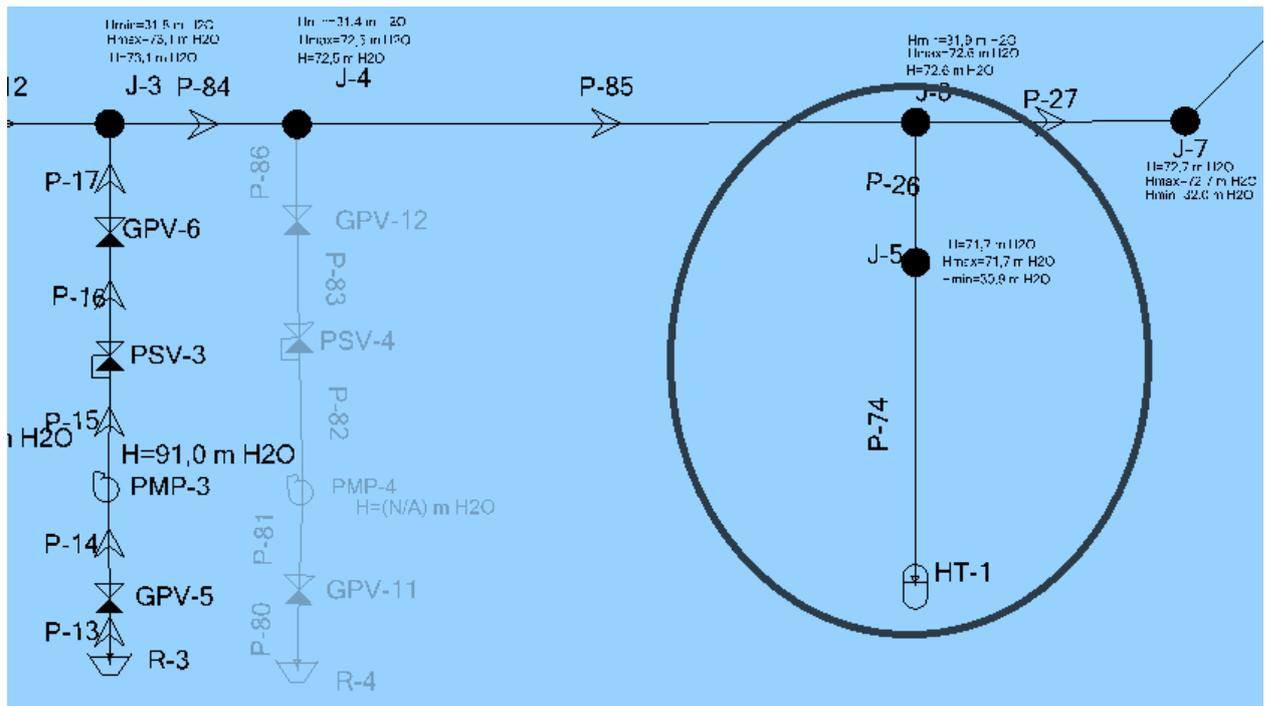


Figura 15. Ubicación del tanque hidroneumático dentro de la estación de bombeo.

Un tanque hidroneumático es un recipiente a presión que contiene agua y un volumen de aire que es mantenido a través de un compresor. Cuando las bombas se apagan y la presión y el flujo disminuyen, el aire en la cámara se expande como resultado de la caída de presión y el agua entra en el sistema (Figura 15).

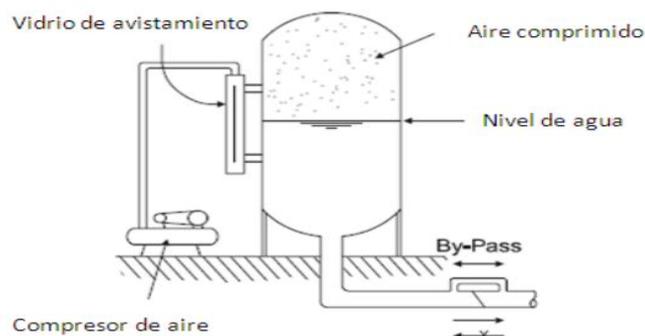


Figura 16. Esquema de un tanque hidroneumático.

Los datos que se deben entrar de los tanques se muestran en la Figura 16.

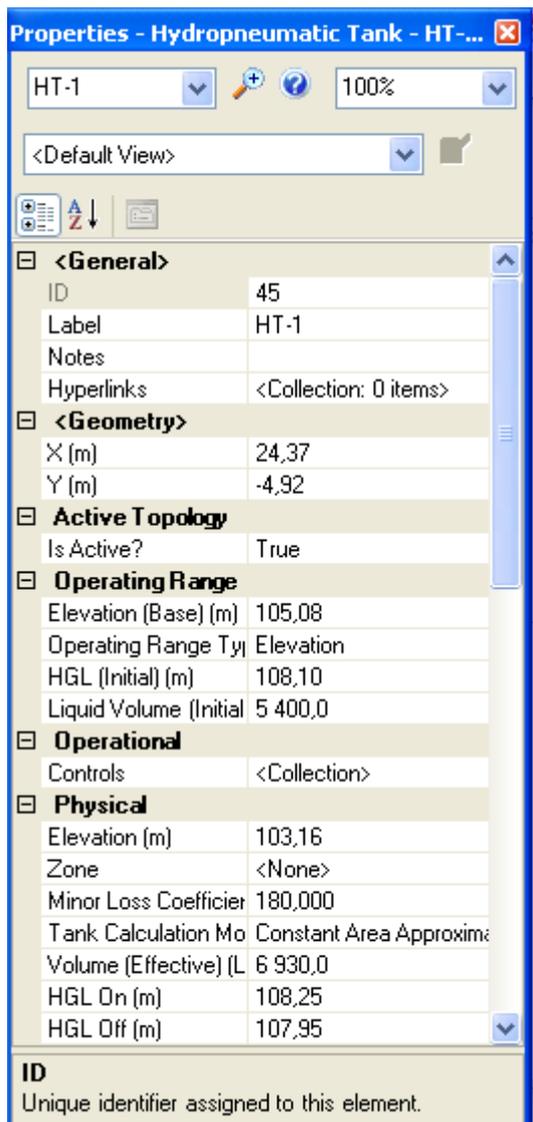


Figura 19. Datos de los tanques hidroneumáticos.

Una vez definidos los dispositivos de control que se van a introducir en el modelo, se pasa al análisis del transitorio bajo estas condiciones.

4.3.2 Resultados del análisis del transitorio con dispositivos de control.

- Con Válvulas de aire

Del análisis del transitorio con las válvulas de aire se obtuvo el gráfico que muestra el comportamiento del sistema con los dispositivos de protección. En estos perfiles se muestran las envolventes de presiones de agua (línea verde) presiones máximas (línea amarilla) y mínimas (línea azul).

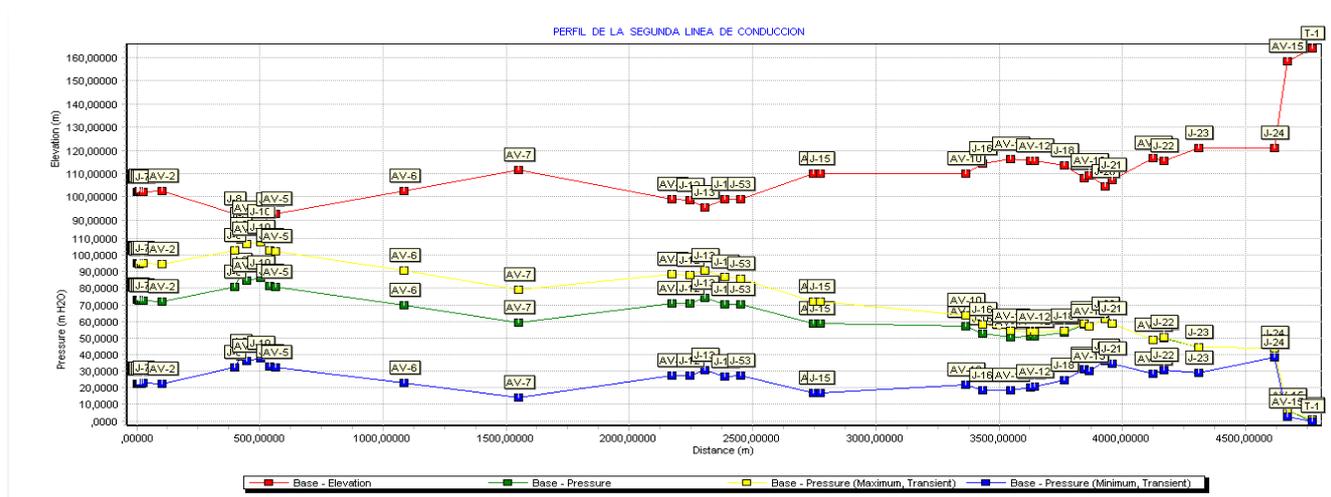


Figura 20. Condiciones transitorio con válvulas de aire.

Como se puede ver en la figura anterior, después de colocar las válvulas de aire, en algunos nodos las presiones de agua y presiones máximas se igualaron, y de hecho las presiones máximas bajaron, pero aún hay nodos con presiones máximas que las de presiones nominales de la tubería.

Entonces se debe continuar con el análisis, ahora incluyendo el tanque hidroneumático.

- **Con Válvulas de aire y Tanque hidroneumático**

Del análisis del transitorio con las válvulas de aire y tanque hidroneumático se obtuvo el gráfico que muestra el comportamiento del sistema con los dispositivos de protección. En estos perfiles se muestran las envolventes de presiones de agua (línea verde) presiones máximas (línea amarilla) y mínimas (línea azul).

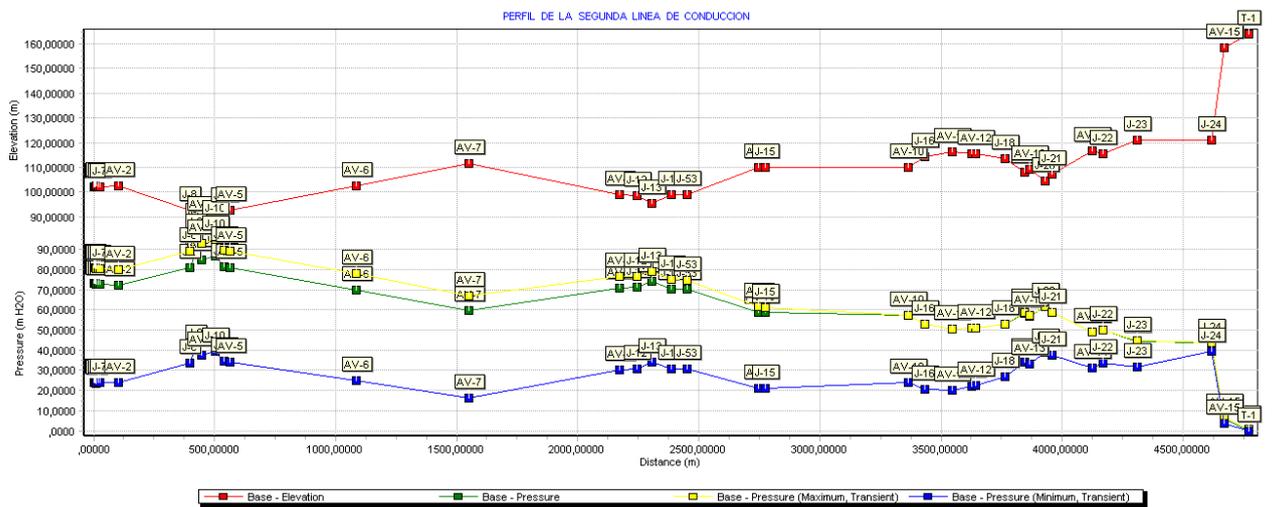


Figura 21. Condiciones transitorio con válvulas de aire y tanque hidroneumático.

Como se puede ver en la figura anterior, después de colocar las válvulas de aire junto con el tanque hidroneumático, aumentaron los nodos que tienen las presiones de agua y presiones máximas iguales debido a que muchas de estas presiones máximas se disminuyeron por debajo de las presiones nominales, aunque en los dos nodos muy bajos al cruzar el río Ochoita y cerca de la planta potabilizadora pues las presiones nominales sigue siendo por debajo de las presiones máximas.

Se recomienda en estos nodos poner las válvulas de alivio rápido, para ver cómo se comportaría, aunque estas válvulas no existen en el sistema.

- Con Válvulas de aire, Tanque hidroneumático y Válvulas de alivio rápido.

Del análisis del transitorio con los 3 dispositivos de protección se obtuvo el gráfico que muestra el comportamiento del sistema. De igual manera, estos perfiles se muestran las envolventes de presiones de agua (línea verde) presiones máximas (línea amarilla) y mínimas (línea azul).

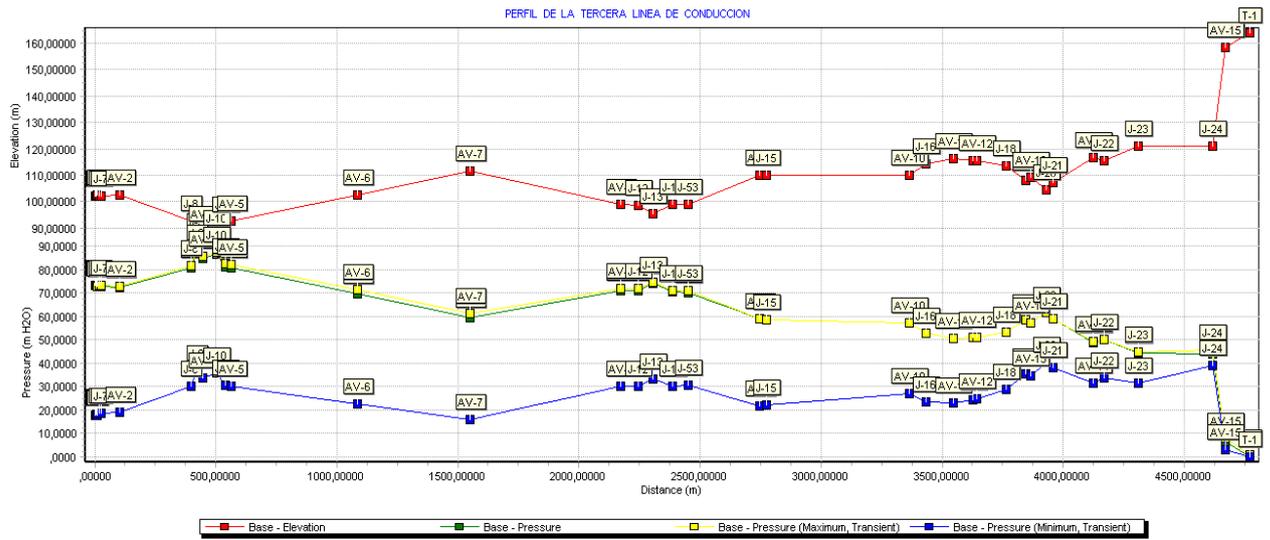


Figura 22. Condiciones transitorio con válvulas de aire, válvulas de alivio rápido y tanque hidroneumático.

Como se puede ver en la figura anterior, después de colocar los 3 dispositivos, se igualaron todas las presiones de agua y presiones máximas, pues todas las presiones máximas oscilan por debajo de las presiones nominales de la tubería.

Después de analizar estos resultados se puede decir, que los dispositivos para el control del transitorio hidráulico que existen actualmente en la conductora "Ochoita" (Válvula de aire y tanque hidroneumático), son teóricamente capaces de atenuar el fenómeno del Golpe de Ariete evitando posibles daños en las tuberías hasta cierto punto, pues hace falta instalar las válvulas de alivio rápido en aquellos dos puntos.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Conclusiones.

- Se obtuvo un modelo para el análisis hidráulico y golpe de ariete para la conductora de abasto de agua “Ochoita”.
- Se obtuvieron mediante un ajuste matemático, las curvas de H vs Q de las bombas que actualmente se encuentran instaladas en la fuente de abasto.
- Se obtuvieron las rasantes piezométricas para diferentes situaciones.
- Se realizó el análisis del Golpe de Ariete en la conductora, para el caso de un transitorio hidráulico provocado por un fallo súbito de la energía eléctrica, analizando el comportamiento del sistema sin protección y con protección anti-ariete.
- Se demuestra que el sistema es vulnerable ante los transitorios hidráulicos, para el caso del sistema desprotegido.
- Del análisis del sistema protegido se desprende que los dispositivos de protección que se encuentran instalados en el sistema fuente de la conductora “Ochoita”, son suficientes para atenuar el fenómeno del transitorio hidráulico analizado, hasta cierto punto.

5.2 Recomendaciones.

- Se recomienda continuar con el mismo análisis en la conductora, esta vez haciendo la calibración en la medida que el sistema vaya envejeciendo, para conocer lo que realmente pasa en la práctica durante su explotación.
- Se recomienda instalar en el sistema, 2 válvulas de alivio rápido, en los 2 puntos señalados en la discusión de los resultados.
- Velar por la correcta colocación de las válvulas de alivio rápido, evitando que el chorro no se produzca hacia un lugar inadecuado.
- Emplear los software Bentley WaterCAD y Bentley HAMMER, en proyectos de abastecimiento de agua, considerando las ventajas que ofrecen los mismos y destacando la posibilidad de análisis del golpe de ariete para el caso de las conductoras.

BIBLIOGRAFÍA:

1. ALFONSO, Y. 2010. *Utilización de un software especializado para la simulación del comportamiento hidráulico del sistema de abasto Guinera-Arroyo Naranja 2.*, Instituto Superior Politécnico "Jose Antonio Echeverría".
2. BENTLEY Manual "Modelación y Diseño de Sistemas de Distribución de Agua presentado WaterCAD V8 XM.
3. BOSCH, P. 2012. *Modelación hidráulica de un sistema fuente de abastecimiento de agua: acueducto El Gato*. Trabajo de Diploma, Instituto Superior Politécnico "Jose Antonio Echeverría".
4. CABRERA, E., IZQUIERDO, J. & ANDEU, M. 1997. *Ingeniería Hidráulica Aplicada a los sistemas de distribución de agua*.
5. DOH. 2011. *Sistemas de Control de Tanque Hidroneumáticos*.
6. *El golpe de ariete* [Online]. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. Available: www.ingenieriaRural.com.
7. FUENTES, V. S. 2002. *Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua*.
8. HERNANDEZ, R. 2010. *Simulación del comportamiento Hidráulico en la zona Guinera-Alta Habana utilizando un software especializado*. Instituto Superior Politécnico "Jose Antonio Echeverría" CUJAE.
9. MILANES, Y. 2005. *Simulación Hidráulica de los sistemas urbanos de distribución de agua con funcionamiento intermitente Una aproximación inicial al problema*. ISPJAE.
10. Pérez, L. "Determinación de la demanda de agua en poblaciones" 2005
11. PEREZ, L. 2005. *Estudio De Transitorios: Golpe De Ariete*. Universidad de Buenos Aires.
12. PÉREZ, R. 2006. *Ingeniería Hidráulica en los Abastecimientos de Agua*.
13. RECIO, L. 2009. *Simulación de un sistema de fuente para abasto de agua urbano*. Instituto Superior Politécnico Jose Antonio Echeverría.
14. VILLAMARIN, J. 1991. *Análisis Del Golpe De Ariete En La Estación De Bombeo De la Planta -LA TOMA-*. Escuela Superior Politécnico Del Litoral.
15. I.N.R.H. Instructivo de PEAD. 3ra Versión Primera Parte.

16. INHR 2013. Política Nacional del Agua. Cuba.
17. <http://es.wikipedia>.

ANEXOS.

1. Características del material PEAD.
2. Velocidades recomendables para tuberías de PEAD.
3. Las curvas de regresión.
4. Control de calidad de la tubería (EN 12201-2) (ISO 4427)
5. Coeficientes representativos de pérdidas de cabeza, K, para diferentes accesorios.

Anexo 1. Características del material PEAD

Tabla 2.1 Características físicas del PE 100

Características	Norma	Unidad	Valor
Densidad Natural a 23° C	ISO 1183 ASTM 1505	kg/m ³	954
Índice de Fluidez con 2,16 kg	DIN 537351 ISO 1133	g/10 min	< 0,15
Índice de Fluidez con 5 kg	ASTM 1238	g/10 min	0,45

Tabla 2.2 Características mecánicas del PE 100

Características	Norma	Unidad	Valor
Yield Strength a 23° C y	DIN 53455		
a 50 mm/min	Probeta No.4	MPa	24
a 100 mm/min		MPa	25
Tensile Stregth a la rotura, a 23° C y			
a 50 mm/min		MPa	35
a 100 mm/min		MPa	36
Elongación a la rotura, a 23° C y	ISO 527		
a 50 mm/min	Probeta No 2	%	> 600
a 100 mm/min		%	> 600
Módulo de Tensión a 23° C	ISO 527	MPa	1200
Dureza Shore tipo D a			
0° C			64
20° C			58
40° C			55
60° C			51
80° C			49

Tabla 2.3 Características térmicas del PE 100

Características	Norma	Unidad	Valor
VICAT 1 KG	DIN 53460	° C	127
VICAT 5 KG	ISO 306	° C	72
	ASTM D 1525		
Conductividad Térmica a 23° C	DIN 52612	W/mK	0,45
Coeficiente de Expansión Térmica	ASTM D 1525	K-1	$1,3 \cdot 10^{-4}$
Calor Específico a	Calorimetría	KJ/KG.K	
23° C			1,8
100° C			3,3
Temperatura de Brittleness	ASTM D 746	° C	< -100

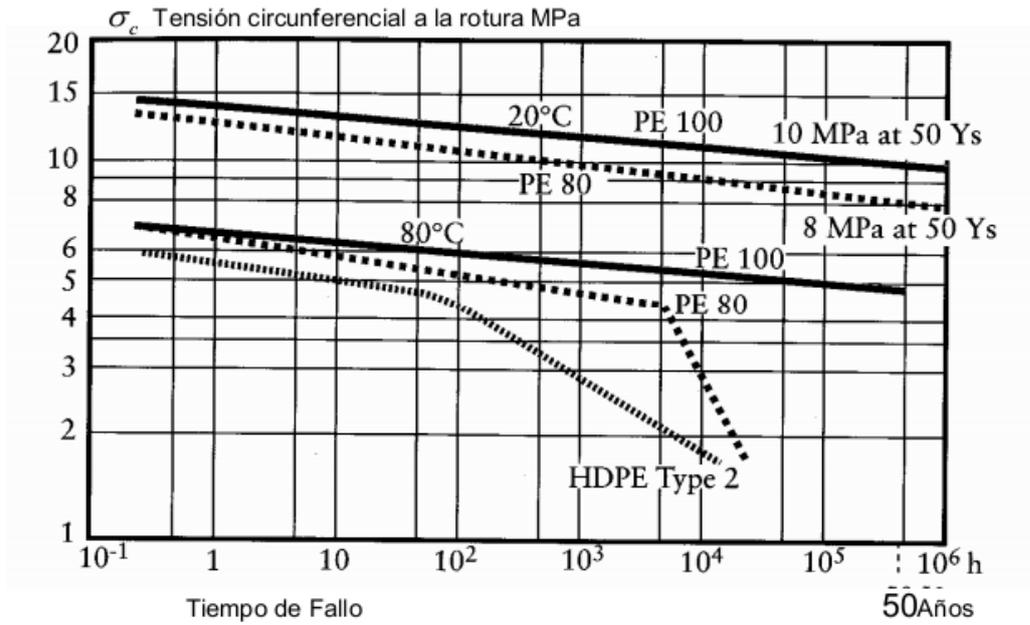
Tabla 2.4 Características eléctricas del PE 100

Características	Norma	Unidad	Valor
Resistencia del aislamiento superficial	DIN 53482	Ω	> 1014
	VDE 0 303/3		
Resistividad transversal a 23° C	DIN 53482	Ω cm	≥ 1017
	VDE 0 303/3		
Pérdida del ángulo tangente a 23° C			
a 1 KHz	DIN 53483		$3 \cdot 10^{-4}$
a 103 KHz	VDE 0 303/4		$7 \cdot 10^{-4}$
Permitividad a 23° C desde 0,1 KHz hasta 103 KHz	DIN 53483		2,6
	VDE 0 303/4		
Resistencia dieléctrica	DIN 53481	kV/cm	2,2.103
	VDE 0 303/2		

Anexo 2. Velocidades recomendables para tuberías de PEAD

Tipo de agua	Velocidad (m/s)		
	Mínima	Normal	Máxima
Limpia	0,3	1,0 a 1,8	3
Residual	0,6-0,8		

Anexo 3. Las curvas de regresión.



Anexo 4. Control de calidad de la tubería (EN 12201-2) (ISO 4427)

Instructivo de PEAD 3ª Versión Primera Parte
I.N.R.H.

	SDR 7.4		SDR 9		SDR 11		SDR 13.6		SDR 17		SDR 21		SDR 26		SDR 33	
PE 40	PN 10		PN 8		PN 6		PN 5		PN 4		PN 3.2		PN 2.5		-	
PE 63	PN 16		PN 12.5		PN 10		PN 8		PN 6		PN 5		PN 4		PN 3.2	
PE 80	PN 20		PN 16		PN 12.5		PN 10		PN 8		PN 6		PN 5		PN 4	
PE 100	PN25		PN20		PN 16		PN 12.5		PN 10		PN 8		PN 6		PN 5	
φ Nominal	S_{Min}	S_{Max}														
16	2.3	2.7	2.0	2.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	3.0	3.4	2.3	2.7	2.0	2.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	3.5	4.0	3.0	3.4	2.3	2.7	2.0	2.3	-	-	-	-	-	-	-	-
32	-	-	3.6	4.1	3.0	3.4	2.4	2.8	2.0	2.3	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	3.7	4.2	3.0	3.5	2.4	2.8	2.0	2.3	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	-	3.7	4.2	3.0	3.4	2.4	2.8	2.0	2.3	-	-
63	-	-	-	-	-	-	4.7	5.3	3.8	4.3	3.0	3.4	2.5	2.9	-	-
75	-	-	-	-	-	-	5.6	6.3	4.5	5.1	3.6	4.1	2.9	3.3	-	-
90	-	-	-	-	-	-	6.7	7.5	5.4	6.1	4.3	4.9	3.5	4.0	-	-
110	-	-	-	-	-	-	8.1	9.1	6.6	7.4	5.3	6.0	4.2	4.8	-	-
160	-	-	-	-	-	-	11.8	13.1	9.5	10.6	7.7	8.6	6.2	7.0	-	-
200	-	-	-	-	-	-	14.7	16.3	11.9	13.2	9.6	10.7	7.7	8.6	-	-
250	-	-	-	-	-	-	18.4	20.4	14.8	16.4	11.9	13.2	9.6	10.7	-	-
315	-	-	-	-	-	-	23.2	25.7	18.7	20.7	15.0	16.6	12.1	13.6	-	-
355	-	-	-	-	-	-	26.1	28.9	21.1	23.4	16.9	18.7	13.6	15.1	-	-
400	-	-	-	-	-	-	29.4	32.5	23.7	26.2	19.1	21.2	15.3	17.0	12.3	13.7
450	-	-	-	-	-	-	33.1	36.6	26.7	29.5	21.5	23.8	17.2	19.1	13.8	15.3
500	-	-	-	-	-	-	36.8	40.6	29.7	32.8	23.9	26.4	19.1	21.2	15.3	17.0
560	-	-	-	-	-	-	41.2	45.5	33.2	36.7	26.7	29.5	21.4	23.7	17.2	19.1
630	-	-	-	-	-	-	46.3	51.1	37.4	41.3	30.0	33.1	24.1	26.7	19.3	21.4
710	-	-	-	-	-	-	52.2	57.6	42.1	46.5	33.9	37.4	27.2	30.1	21.8	24.1
800	-	-	-	-	-	-	58.8	64.8	47.4	52.3	38.1	42.1	30.6	33.8	24.5	27.1
900	-	-	-	-	-	-	-	-	53.3	58.8	42.9	47.3	34.4	38.3	27.6	30.5
1000	-	-	-	-	-	-	-	-	59.3	65.4	47.7	52.6	38.2	42.2	30.6	33.5

Anexo 5. Coeficientes representativos de pérdidas de cabeza, K, para diferentes accesorios.

Accesorios	K
Válvula de globo (completamente abierta)	10,0
Válvula de ángulo (completamente abierta)	5,0
Válvula de cheque (completamente abierta)	2,0
Válvula de compuerta (completamente abierta)	0,19
Codo en U	2,2
Tee estándar	1,8
Codo estándar	0,9
Codo de radio medio	0,75
Codo de radio largo	0,60