

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“MEJORA DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO  
DE GOLPE DE ARIETE EN UNA LÍNEA DE TUBERÍAS”**

**REALIZADO POR:  
MARTIN DOMINGO MAESTRE MATA**

**Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como Requisito  
Parcial para optar al Título de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**Puerto La Cruz, Agosto de 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“MEJORA DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO  
DE GOLPE DE ARIETE EN UNA LÍNEA DE TUBERÍAS”**

**Realizado por:**

**MARTIN DOMINGO MAESTRE MATA**

**ASESORES**

**Prof. Orlando Ayala R**  
**Asesor Académico**

**Ing. Adoración Cruz**  
**Asesor Industrial**

**Puerto la Cruz, Agosto de 2010**

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI  
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**“MEJORA DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO  
DE GOLPE DE ARIETE EN UNA LÍNEA DE TUBERÍAS”**

**El jurado hace constar que asignó a esta Tesis la calificación de:**

**APROBADO**

---

**ING. ORLANDO AYALA R**  
Asesor Académico

---

**ING. HENRY ESPINOZA**  
Jurado Principal

---

**ING. LINO CAMARGO**  
Jurado Principal

**Puerto la Cruz, Agosto de 2010**

## ***RESOLUCIÓN***

---

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados con otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario.”

## ***DEDICATORIA***

---

A Dios todopoderoso y a la Virgen del Valle por haberme dado la fuerza y la claridad en todo momento para llegar a este logro.

A mi Madre digno ejemplo de mujer con su lucha, constancia y sacrificio por amor a su hijo y por haber sido ese ser que toda mi vida me ha guiado TE AMO.

A mi Padre buen hombre que siempre me ha escuchado y ayudado dándome todo su apoyo en mis decisiones TE AMO.

A mis Abuelos Leonor y Moncho ustedes son el vivo ejemplo de que para ser alguien en la vida las personas tienen que tener valores y que con esto no se nace sino que se inculcan y ustedes nos lo inculcaron a todos ya que han sido mentores en la fábrica de muchos profesionales; esto es de ustedes abuelos los AMO y espero que Dios le de mucha salud para que vivan muchos años más.

A mi Abuelo Epifanio que aunque no compartí muchos momentos a su lado se que este logro le llena mucho de orgullo abuelo este logro es tuyo y a mi Abuela Faustina, mujer de gran corazón, este logro es tuyo.

A mis tíos Víctor, Milagros, Edgar, Ondina, Andrés, Williams, Lilian, Henry por siempre ayudarme, confiar en mí y darme ese consejo de aliento para llegar a este logro, esto es de ustedes.

A mis primos Orlando, Andrés, Andreina, María, Víctor, John, Leomil, Ulises, Miltry, Hector a todos gracias por apoyarme y creer en mí los quiero.

A mis primos Andrea, Daniela Alejandra, Daniela Sofía, Gabriela, Verónica, Edgary, Adrián, Andrés Alejandro, Daniel, espero que este logro les sirva de ejemplo para que ustedes lleguen a alcanzar sus metas.

A mi Abuela panchita y mi madrina Gema por siempre apoyarme y confiar en mí.

A mis amigos Anderson, Kelly, Gregorio, Joaquín, Jorge, Luis, Marian ejemplos de amistad y solidaridad en todo momento.

## ***AGRADECIMIENTOS***

---

A Dios y a la virgencita, por darme tranquilidad cuando la necesite, darme luz cuando no encontraba la salida y colocar en mi camino a todas las personas que han alimentado mi esencia, haciéndome mejor persona.

A mi Mamá, Papá, Abuelos, Tios y Primos por enseñarme el valor de las cosas, lo importante que era estudiar, por sus sabios consejos, por su confianza, comprensión y paciencia hacia mí en todo momento, por escucharme y apoyarme en los momentos más difíciles dándome la fuerza suficiente para continuar y no decaer, se que en estos momentos están orgullosos de mi.

A Ivon el Khoury y Hermelinda Baíz por haberme ayudado a superar muchos obstáculos que se me presentaron en este logro.

Al profesor Orlando Ayala R y al Ingeniero Rolando Ayala por su valiosa orientación en la realización de este trabajo.

Al profesor José Guevara por su valiosa ayuda y por transmitir conocimientos y experiencias en áreas que no conocía, gracias por esa valiosa orientación profesor.

A mis amigos de la Universidad Juan, Simón, Héctor, Jorge, Luis Sánchez, Luis Manuel, Joaquín, Jesús García, Jaime, Jesús Centeno, por haber estado en las buenas y en las malas y porque nuestras jornadas de estudios nos llevo a formar un buen grupo para llegar a conseguir nuestros logros.

Al Departamento de Diseño Mecánico de Inelectra, a Pedro Ríos, Maria León, Joseph Calderón, Moisés Aguilera, María Coa, Adoración Cruz, Liselott Rosales y Luis Ochoa por su valiosa ayuda prestada en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos de la cuadra Cesar, Francisco, Roberto, Jorge, Ángel por haberme dado apoyo durante toda la carrera.

## ***RESUMEN***

---

Con el desarrollo de este trabajo se logro la actualización de una herramienta computacional para el cálculo de golpe de ariete en una línea de tuberías ya existente, a través del desarrollo del software ARIETE. Esta actualización se realizó, estudiando cómo influye el comportamiento elástico de la tubería y el fluido que la llena bajo la acción de un cambio de presión; considerando los esfuerzos en la tubería en todos los sentidos (radial, tangencial y axial), las cuales conducen al establecimiento de las ecuaciones diferenciales parciales que definen el fenómeno de golpe de ariete debido al cierre de válvulas, a la detención o parada de bombas y en maniobras de apertura y cierre del distribuidor de turbinas hidráulicas. Este software representa con gran exactitud el fenómeno real, ya que no utiliza la hipótesis de tubería rígida y la de tubería elástica de pared delgada sin esfuerzos ni deformaciones radiales, que permitían estudios más simplificados. Las ecuaciones diferenciales parciales no lineales se transforman en ordinarias por el método de las características y en algebraicas por el método de las diferencias finitas. Estas ecuaciones son las que usando una rutina computacional desarrollada en Visual Basic Express 2008 muestra los resultados de las variables que determinan en el fenómeno de golpe de ariete debido al cierre de válvulas y/o corte repentino de la energía que alimenta el motor de una bomba. El cálculo del fenómeno se efectúa en un entorno gráfico, de fácil entendimiento y mediante la lectura de su manual de usuario se podrá familiarizar con todas las funciones del software. Resultados experimentales publicados en revistas y resultados de proyectos en ejecución por Inelectra permitirán validar la bondad de este software.

<b>RESOLUCIÓN.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>VII</b>
<b>NOMENCLATURA.....</b>	<b>XIII</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>XV</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.3 OBJETIVOS .....	20
1.3.1 General: .....	20
1.3.2 Específicos: .....	20
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>21</b>
<b>2. RESUMEN DE CONOCIMIENTOS PREVIOS.....</b>	<b>22</b>
2.1 ANTECEDENTES:.....	22
2.2 CONCEPTOS BÁSICOS .....	24
2.3 GOLPE DE ARIETE.....	26
2.3.1- Golpe de ariete por cierre de válvulas.....	27
2.3.2- Golpe de ariete en la línea de descarga de una bomba.....	33
2.3.3 Golpe de ariete en maniobras de apertura y cierre del distribuidor de las turbinas eléctricas .....	35
2.4 TEORÍAS PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS DE FLUIDOS EN TUBERÍAS .....	35
2.4.1 Teoría del modelo rígido .....	36
2.4.2 Teoría del modelo elástico .....	37
2.5 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN .....	38
2.5.1 Visual basic 2008 .....	38
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>39</b>
<b>3- DESARROLLO DEL TRABAJO .....</b>	<b>40</b>
3.1 ESTUDIAR LOS MODELOS MATEMÁTICOS ESTABLECIDOS PARA EL ESTUDIO DE GOLPE DE ARIETE .....	40
3.1.1 Esfuerzos en la tubería .....	40
3.1.2 Elasticidad de la tubería .....	41
3.1.3 Elasticidad del líquido:.....	44
3.1.4 Esfuerzos generados por restricciones de movimiento de la tubería: ....	44
3.1.5 Ecuación de la continuidad .....	45

3.1.6 Ecuación de la cantidad de movimiento.....	46
3.2 MÉTODOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS PARA LA RESOLUCIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS ESTABLECIDOS.....	47
3.2.1 Método de las características: .....	47
3.2.2 Método de las diferencias finitas:.....	48
3.3 SIMULACIÓN.....	49
3.3.1 Sistema reservorio-tubería-válvula.....	49
3.3.3 Sistema bomba-tubería-válvula.....	53
3.3.4 Clases de sistemas planteados: .....	56
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>59</b>
<b>4- MANUAL DE USUARIO PARA USO DEL SOFTWARE ARIETE 3.0.....</b>	<b>60</b>
4.1 REQUISITOS DEL SISTEMA PARA EJECUTAR ARIETE 3.0. ....	60
4.2 EJECUCIÓN DEL PROGRAMA .....	63
4.2.1 Pasos para la ejecución del programa .....	63
4.3 PANTALLAS PARA LOS CÁLCULOS .....	64
4.3.1 Barra de menú .....	64
4.3.2 Pantalla ingreso de datos iniciales.....	65
4.3.3 Pantalla de muestra de resultados.....	71
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>74</b>
<b>5- DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>75</b>
5.1 SENSIBILIDAD DEL PROGRAMA .....	75
5.2 VALIDACIÓN .....	76
5.2.1 Resultados .....	83
<b>CAPITULO 6.....</b>	<b>98</b>
6.1 CONCLUSIONES .....	99
6.2 RECOMENDACIONES .....	101
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>102</b>
<b>APENDICE A .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>APENDICE B .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>APENDICE C .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>APENDICE D .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>APENDICE E .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>APENDICE F .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## INDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1 Países de América donde opera Inelectra Internacional.....	16
Figura 1.2 centro de ejecución oriente sede Lecherías, C.C la Finestra (izquierda) y C.C Teramo (derecha).....	17
Figura 2.2 Esquema del avance de la onda de presión.....	29
Figura 2.3 Esquema de la onda de depresión.....	29
Figura 2.4 Esquema de la normalización del efecto del golpe de ariete.....	30
Figura 2.5 Sistema depósito – bomba.....	33
Figura 2.6 Esquema de la onda de depresión.....	33
Figura 2.7 Esquema del regreso del fluido debido a su inercia.....	34
Figura 2.8 Esquema de la onda de sobrepresión.....	35
Figura 3.1 Diagrama de cuerpo libre.....	46
Figura 3.2 Malla rectangular para la resolución de las ecuaciones mediante el método de las características.....	49
Figura 3.3 Sistema reservorio – tubería- válvula.....	50
Figura 3.4 Sistema bomba-tubería-válvula.....	53
Figura 4.1 Menú de inicio.....	61
Figura 4.2 Ventana panel de control.....	62
Figura 4.3 Configuración regional y de idioma.....	62
Figura 4.4 Archivo ejecutable.....	63
Figura 4.5 Acceso directo.....	63
Figura 4.6 Menú inicio.....	64
Figura 4.7 Menú ayuda.....	64
Figura 4.8 Pantalla para el ingreso de los datos iniciales.....	65
Figura 4.9 Pantalla para ingresar los datos del sistema Sumidero- Tubería- Válvula.....	68
Figura 4.10 Pantalla para ingresar los datos del Sistema Bomba-Tuberia- Válvula..	69
Figura 4.11 Pantalla para ingresar el tiempo máximo de iteración.....	71
Figura 4.12 Pantalla para la muestra de resultados.....	72

Figura 5.1 Análisis de sensibilidad. ....	75
Figura 5.2 Sistema estudiado para la validación del modelo Inelectra. ....	82
Figura 5.3 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Brunone. ....	85
Figura 5.4 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Pezzinga. ....	85
Figura 5.5 Indicación de tiempos de ocurrencia de los ciclos. ....	87
Figura 5.6 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas. ....	89
Figura 5.7 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de parada de bombas. ....	92
Figura 5.8 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Brunone variando el material de la tubería. ....	93
Figura 5.9 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas variando el fluido. ....	95
Figura A.1 Respuesta obtenida por Brunone. <b>¡ERROR!</b>	<b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura A.2 Respuesta obtenida por Pezzinga. <b>¡ERROR!</b>	<b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura B.1 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas para el estudio de la sección 1. <b>¡ERROR!</b>	<b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura B.2 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas para el estudio de la sección 2. <b>¡ERROR!</b>	<b>MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura B.3 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas para el estudio de la sección 1 y 2, aplicando el método de la longitud equivalente y usando el diámetro de 42 pulgadas. ....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura C.1 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de parada de bombas sección 1, para mediciones de caudal a pie de válvula. ....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura C.2 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de parada de bombas sección 2, para mediciones de caudal a pie de válvula. ....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
Figura C.3 Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de parada de bombas sección 3, para mediciones de caudal a 4415,14 m de longitud. ....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

Figura D.1 Sistema estudiado por Brunone. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura E.1 Esquemático del ensanchamiento de la tubería. **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

Figura E.2 Nomograma de pérdida de carga secundaria de la firma gould pumps. U.S.A en accesorios. .... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

---

*INDICE DE TABLAS*

---

Tabla 5.1 Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Brunone. ....	87
Tabla 5.2 Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Pezzinga. ....	88
Tabla 5.3 Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Inelectra cierre de válvulas. ....	88
Tabla 5.4 Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Inelectra parada de bombas. ....	90
Tabla 5.5 Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Brunone variando el material de la tubería. ....	94
Tabla 5.6 Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas variando el fluido. ....	94
Tabla E.1 Velocidad de propagación de onda en los diferentes tramos. ....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## **NOMENCLATURA**

Símbolo	Descripción	Unidad
A	Área de la Tubería	(m <sup>2</sup> )
a	Velocidad de la Onda	(m/seg)
Ax	Variación average en la longitud del elemento	(m)
C1	Constante que depende de la restricción de la tubería	Adimensional
Di	Diámetro Interno	(m)
dp	Caída de presión	(Pa)
E	Modulo de Elasticidad de la Tubería	(Pa)
e	Espesor de la tubería	(m)
f	Factor de fricción	Adimensional
g	Constante de gravedad	(m/seg <sup>2</sup> )
Ho	Carga piezometrica en el reservorio y/o Bomba	(m)
K	Modulo de Compresibilidad del Fluido	(Pa)
L	Longitud de la tubería	(m)
N	Número de Nodos	Adimensional
Q	Caudal	(m <sup>3</sup> /s)
Rp	Radio promedio	(m)
ri	Radio Interno	(m)
ro	Radio Externo	(m)
T	Tiempo	(seg)
V	Velocidad	(m/seg)
Vo	Velocidad Inicial	(m/seg)
v	Volumen	(m <sup>3</sup> )
εa, εr, εt	Deformaciones: Axiales, radiales y tangenciales	Adimensional
ρ	Densidad del Fluido	(Kg/m <sup>3</sup> )

$\sigma_a, \sigma_r, \sigma_t$	Deformaciones: Axiales, radiales y tangenciales	(N/m <sup>2</sup> )
$\gamma$	Peso Específico del Fluido	(N/m <sup>3</sup> )
$\nu$	Razón de Poisson	Adimensional
Símbolo	Descripción	Unidad
$\delta x$	Variación Axial	(m)
$\Delta R_1$	Variación radial producto de los esfuerzos radiales	(m)
$\Delta R_2$	Variación tangencial producto de los esfuerzos tangenciales	(m)
$\Delta x$	Distancia que hay entre cada nodo	(m)

---

***CAPÍTULO 1***

**INTRODUCCIÓN**

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Reseña Histórica de la Empresa

INELECTRA VENEZUELA, es una empresa de capital venezolano, ubicada en varios países como Colombia, Argentina, Panamá, México. En Venezuela la sede principal se encuentra en Caracas, y de allí se extienden los Centros de Ejecución de Oriente (Lechería, estado Anzoátegui), y Occidente (Maracaibo, estado Zulia). Nace en 1968, dedicándose a desarrollar proyectos de ingeniería y construcción, abarcando las áreas de procura y gerencia, así como la de operación y mantenimiento. En los últimos años logró ubicarse entre las 50 empresas más grandes en el ámbito internacional y en Venezuela ocupa la primera posición como contratista IPC (Ingeniería, Procura y Construcción), alcanzando la realización de proyectos de producción de petróleo, gas, refinación, industrias petroquímicas y plantas de generación de electricidad (Ver Fig. 1.1 y 1.2)



**Figura 1.1** Países de América donde opera Inelectra Internacional.



**Figura 1.2** Centro de Ejecución Oriente Sede Lecherías, C.C La Finestra (Izquierda) y C.C Teramo (Derecha).

## 1.2 Planteamiento del Problema

En la actualidad Inelectra es una de las consultoras de ingeniería que basan sus criterios de elaboración de proyectos en desarrollar la mejor estrategia de prestación de servicio en los cronogramas requeridos por sus clientes, y es por esto que se hace necesario el estudio de golpe de ariete de los sistemas de tuberías para evitar el colapso de los sistemas de tubería debido a este fenómeno.

El golpe de ariete se ha venido estudiando desde los albores del Siglo XX con mucha meticulosidad. El nombre golpe de ariete proviene del sonido que generalmente acompaña al fenómeno, similar al ruido del martillo golpeando una tubería. Sin embargo, la magnitud del ruido no es equivalente a la magnitud de la onda de choque, ya que el sonido puede ser amortiguado mientras la onda de presión daña las instalaciones. El golpe de ariete es un fenómeno que se produce tanto en estructuras hidráulicas estáticas (tuberías, medidores, entre otros), como en máquinas hidráulicas. Esto genera un efecto de expansión-contracción transitorio en una línea de tuberías, en los procesos de regulación de caudal.

En Venezuela el estudio de golpe de ariete es de gran importancia debido a que en la industria petrolera el bombeo y transporte de fluidos es muy común. Estos sistemas requieren del cálculo de este fenómeno, lo que consume gran cantidad de tiempo, debido a que en el país hay pocas herramientas computacionales que permita su estudio de manera rápida y precisa, por lo tanto los cálculos se realizan con métodos directos (Herramientas de Excel o Manuales) que entregan resultados muy por encima a los resultados reales que se producen en el sistema.

Estas limitaciones hicieron que el grupo de Ingeniería del Departamento de Diseño Mecánico de INELECTRA VENEZUELA (Centro de Ejecución Oriente) se planteara desarrollar una herramienta computacional que facilite el cálculo de golpe de ariete, ya que con esto se ahorraría tiempo en horas hombre, ayudaría a optimizar el diseño mecánico del sistema de tuberías, evitando el sobredimensionamiento de los elementos al obtener el comportamiento de la onda de presión y velocidad en los distintos puntos de la tubería.

Para desarrollar la herramienta computacional se hizo necesaria la revisión del trabajo de grado realizado en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Oriente – Núcleo de Anzoátegui en el año 2003 que consistió en la creación de un programa para cálculo de golpe de ariete, denominado ARIETE, que por estar en un lenguaje de programación obsoleto (TURBOPASCAL), no es de fácil manejo, además los resultados están limitados al caso de cierre de válvulas, la interpretación de resultados es confusa y los resultados de las simulaciones se guardan en dispositivos de poco uso en la actualidad (Disco de 3 1/2 pulgadas). Por lo que se propuso el desarrollo de una herramienta computacional escrita en un lenguaje de programación actualizado, sencillo y confiable, como lo es VISUAL BASIC 2008, además de incrementar sus funciones agregando ecuaciones que permitan determinar el golpe de ariete debido a la detención de bombas y así satisfacer las necesidades de cálculo que se presentan en los proyectos de ingeniería que contemplan sistemas de bombeo y transporte de fluidos, cuando por la geometría y configuración del sistema, tipo de fluido manejado y la filosofía de operación, así lo requiera.

Se validarán los resultados numéricos obtenidos con esta herramienta computacional con resultados experimentales existentes, mediante el programa Ariete previamente desarrollado y en proyectos desarrollados por INELECTRA VENEZUELA.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 General:**

Mejorar una herramienta computacional para el estudio de golpe de ariete en un sistema de tuberías.

#### **1.3.2 Específicos:**

1. Estudiar los modelos matemáticos establecidos para el estudio de golpe de ariete.
2. Desarrollar la herramienta computacional en un lenguaje informático más completo, con interacción gráfica y ampliarla con la incorporación de las ecuaciones para cálculo de golpe de ariete generado por la detención o parada de bombas.
3. Validar los resultados obtenidos mediante datos experimentales existentes.
4. Elaborar un manual de usuario para la utilización de la herramienta computacional.

---

*CAPÍTULO 2*

**MARCO TEÓRICO**

## **2. RESUMEN DE CONOCIMIENTOS PREVIOS**

### **2.1 Antecedentes:**

Para el desarrollo de esta investigación se revisaron diferentes referencias bibliográficas de la Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui y de investigaciones publicadas en Internet. Se tomaron en cuenta los siguientes estudios anteriores los cuales fortalecerán el conocimiento necesario para el logro del presente trabajo, en ellos se representa el conocimiento básico que fundamenta el tema.

En el año 1996 Márquez, J y Rodríguez, L [1], desarrollaron una herramienta computacional para el estudio de golpe de ariete en una línea de tubería, con el propósito de verificar el comportamiento de la presión y la velocidad de onda a lo largo de la tubería. Ese estudio se basó en predecir los esfuerzos de la tubería (Debido a la expansión y/o contracción que el golpe de ariete produce) bajo la suposición de tuberías de pared delgada sin considerar la existencia de esfuerzos y deformaciones radiales. Esta hipótesis difiere un tanto de la teoría de tubería elástica la cual establece que deben ser consideradas todas las modificaciones producidas, adicionalmente, en ese trabajo se consideró el espesor de la tubería despreciable, pero no se estableció su grado de influencia en la medida que la tubería aumenta de tamaño y se está frente al caso de tuberías de pared gruesa. Se concluyó que la estabilización de la onda generada por el golpe de ariete se debe al aumento en la fricción y que la sobrepresión generada es proporcional al tiempo de cierre de la válvula.

En el año 2000 Axworthy, D, Ghidaoui, M y McInnis, D [2], publicaron su investigación sobre: Derivación de la Disipación de Energía Termodinámicamente Extendida en flujo inestable. (Extended Thermodynamics Derivation of Energy Dissipation in Unsteady Pipe Flow). En esta investigación, basándose en principios termodinámicos derivaron una ecuación que sustituye a la ecuación de conservación de momento comúnmente usada en el estudio de golpe de ariete. Estos investigadores usaron ecuación de continuidad. La ventaja de este modelo es que dejan atrás la hipótesis de fricción constante con la incorporación de la fricción variable a través de

la consideración de esfuerzos cortantes variables entre el flujo unidimensional y las paredes de la tubería. Se concluyó que cuando se usa el coeficiente de fricción constante, el amortiguamiento de la onda es más lento mientras que cuando se usa fricción variable la onda se estabiliza más rápido.

En el año 2000 Brunone, B, Mecarelli, M y Ferrante, M [3], publicaron su investigación sobre perfiles de velocidad, y fricción no permanente, en tuberías para flujo transitorio. (Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow). Esta investigación se establecieron condiciones transitorias en conductos cerrados, revisa la significancia de las suposiciones del modelo 1D, y compara las viejas suposiciones propuestas. Se concluyó que cuando se usa un factor de fricción constante existe un error en el amortiguamiento de la onda que va acrecentándose con el tiempo dicho error disminuye cuando se usa el factor de fricción variable ya que este depende de la velocidad del fluido que decrece con el tiempo hasta que el sistema se estabiliza.

En el año 2000 Pezzinga, G [4], publicó su investigación sobre Evaluación de las Resistencias de Flujo No Permanente en modelos Cuasi-2D o 1D (Evaluation of Unsteady Flow Resistances by Quasy-2D or 1D Models) Journal of Hydraulic Engineering. En este trabajo experimental y numérico se evalúan: La resistencia en el flujo transitorio usando el modelo unidimensional (1D) de fricción inestable aplicado, en casos de golpe de ariete, tanto en tuberías de aducción por gravedad y en tuberías bombeadas. También se obtienen evaluaciones experimentales, de perfil de velocidad y presión, pérdidas por fricción. También se compara con un modelo unidimensional (cuasi 2D) previamente propuesto. En este trabajo se concluyó, que el factor de fricción variable ayuda a la estabilización de la onda ya que la velocidad del fluido va disminuye a lo largo de la tubería.

En el año 2003 Ayala H, Rolando F [5], realizó la optimización de una herramienta computacional para el estudio del fenómeno de golpe de Ariete en una línea de tuberías con la finalidad de usar un modelo matemático más adaptado al fenómeno del golpe de Ariete, en este trabajo se establecen las ecuaciones para

cálculo de golpe de ariete debido al cierre de válvula y los efectos del mismo, así como introdujo en el estudio de tuberías de pared gruesa, las cuales serán usadas en el presente trabajo. Se concluyó que el pico de presión generado por la onda de golpe de ariete es un factor determinante en el diseño de tuberías que si no se determina con exactitud pudiera causar el colapso de la tubería y para determinarlo con exactitud se debe usar un factor de fricción variable ya que la onda se amortiguaría más rápidamente que si se usa un factor de fricción constante.

A diferencia de los trabajos mencionados anteriormente, donde básicamente se realizó el estudio de golpe de ariete debido al cierre de válvulas; el proyecto de grado que se presenta a continuación, abarca también el estudio de golpe de ariete debido a la detención o parada de bombas para así garantizar que los sistemas de transporte o bombeo de fluidos no lleguen a fallar por la ocurrencia del fenómeno de golpe de ariete.

## **2.2 Conceptos Básicos**

Al inicio del análisis del problema, deben tomarse en cuenta algunas definiciones propias de la MECÁNICA DE LOS FLUIDOS, necesarias para conocer el comportamiento del flujo y que por lo tanto son importantes en el planteamiento de las ecuaciones.

Un fluido es una sustancia que no puede resistir esfuerzo cortante. Si este se presenta, el fluido se deforma y continúa deformándose mientras el esfuerzo exista.

Flujo es el movimiento de un fluido con respecto a un sistema inercial de coordenadas, generalmente ubicado en un contorno sólido.

El flujo en un canal o tubería se determina mediante las siguientes cantidades físicas:

- Desplazamiento de una partícula de fluido.
- Velocidad de una partícula de fluido en un punto del campo de flujo.
- Aceleración de una partícula en un punto del campo de flujo [5].

Estas cantidades pueden permanecer constantes con el espacio y/o tiempo. Con respecto al espacio, los flujos se clasifican en: Uniformes (si las cantidades físicas permanecen constantes en el espacio) y no uniformes o variados. Con respecto al tiempo se clasifican en permanentes o estacionarios (si las cantidades de flujo permanecen constantes con el tiempo) y no permanentes o transitorios. Estos tipos de flujo se pueden combinar de la siguiente manera:

Flujo uniforme permanente, ninguna de las características del flujo (presión, velocidad) varían en el espacio y/o tiempo.

Flujo uniforme no permanente, las características no varían con el espacio, pero si con el tiempo. Es muy difícil encontrar este tipo de flujo en la naturaleza, debido a que los cambios tendrían que ocurrir en forma simultánea a todo lo largo de la tubería.

Flujo variado permanente, las características del flujo varían con el espacio pero no con el tiempo. Existen dos subtipos: Gradualmente variado, los cambios en las características del flujo (presión, velocidad) son graduales a lo largo de la dirección principal de este. Rápidamente variado, los cambios en las características del flujo son abruptos a lo largo de la dirección principal.

Flujo variado no permanente, las características del flujo varían con el espacio y con el tiempo. Debido a que el flujo uniforme no permanente no existe este nuevo tipo se conoce con el nombre de flujo no permanente o transitorio.

Flujo unidimensional, se produce cuando, las características hidráulicas del fluido, tales como: La presión, la velocidad y el gasto; varían como funciones del tiempo, y una coordenada curvilínea  $x$ , que usualmente se hace coincidir con el eje del conducto [5].

Principio de conservación de la materia o ecuación de continuidad, establece que de la totalidad de la masa que en la unidad de tiempo entra a un volumen especificado dentro del flujo, una parte queda almacenada dentro del mismo y el resto sale del volumen. También se puede expresar [5]:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Cantidad de masa que} \\ \text{atraviesa la superficie} \\ \text{de frontera del volumen} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Rápidez de variación} \\ \text{de la masa contenida} \\ \text{en el volumen} \end{array} \right] = 0 \quad (2.1)$$

Ecuación de cantidad de movimiento o momentum, la ecuación de la cantidad de movimiento (proviene, de considerar la Segunda Ley de Newton), establece que el impulso es igual al cambio de la cantidad de movimiento. El impulso es la resultante de las fuerzas actuantes sobre un determinado volumen de control, multiplicado por el tiempo que ellas actúan. La cantidad de movimiento es el producto de la masa por la velocidad, que obviamente tiene la misma dirección de la resultante señalada [5].

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Las fuerzas externas que} \\ \text{actúan sobre el elemento} \\ \text{en la dirección } i \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Las fuerzas externas que} \\ \text{actúan sobre la superficie} \\ \text{en la dirección } i \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{(Masa)} \times \left( \begin{array}{l} \text{Aceleración en} \\ \text{la dirección } i \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (2.2)$$

### 2.3 Golpe de Ariete

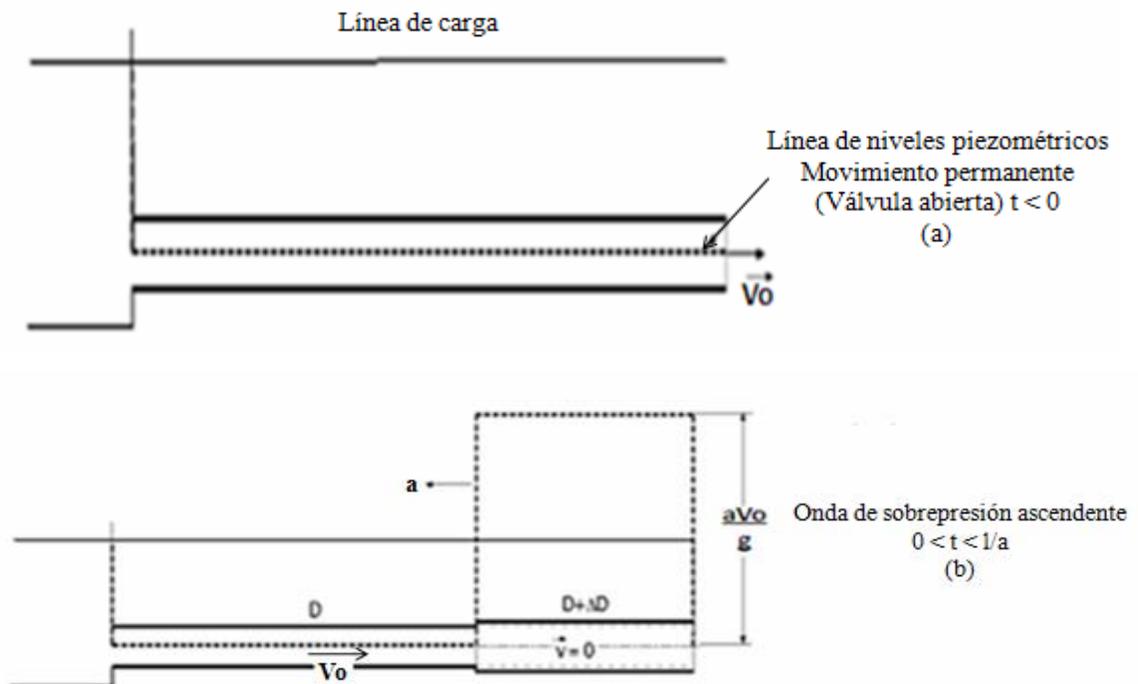
El golpe de ariete es una onda de presión dinámica generada en el flujo de una tubería que resulta de un retardo o aceleración brusca en el fluido. Este fenómeno es ocasionado por la transformación brusca de energía cinética del fluido en energía de presión o viceversa. Estas transformaciones generan ondas elásticas que se manifiestan como variaciones en la presión y velocidad del flujo, y en las propiedades del fluido, y viajan a lo largo de la tubería con velocidad cercana a la del sonido [5].

El golpe de ariete por agua es la descarga dinámica de presión que resulta de las rápidas transformaciones de la energía cinética de un fluido en presión cuando el flujo se detiene repentinamente. El cierre repentino de una válvula puede causar golpe de ariete por agua. El golpe de ariete por vapor es la excesiva vibración de la tubería, que ocurre debido a las burbujas de vapor formadas en una corriente fría de líquido. El aumento de la presión producto del golpe de ariete, puede ser lo suficientemente grande para romper la carcasa de la bomba o reventar las tuberías, por lo tanto, este debe ser considerado en el diseño de tuberías.

Las ondas de presión pueden ser positivas (sobrepresiones) o negativas (depresiones). Las sobrepresiones originadas pueden aumentar la presión total interna hasta llegar a superar la presión máxima admisible, lo que puede ocasionar daños mecánicos graves a las tuberías y accesorios. Las ondas de presión negativas pueden disminuir la presión total hasta generar cavitación, separación de la columna de líquido o el colapso de la tubería por efectos de la presión externa [6].

### 2.3.1- Golpe de ariete por cierre de válvulas

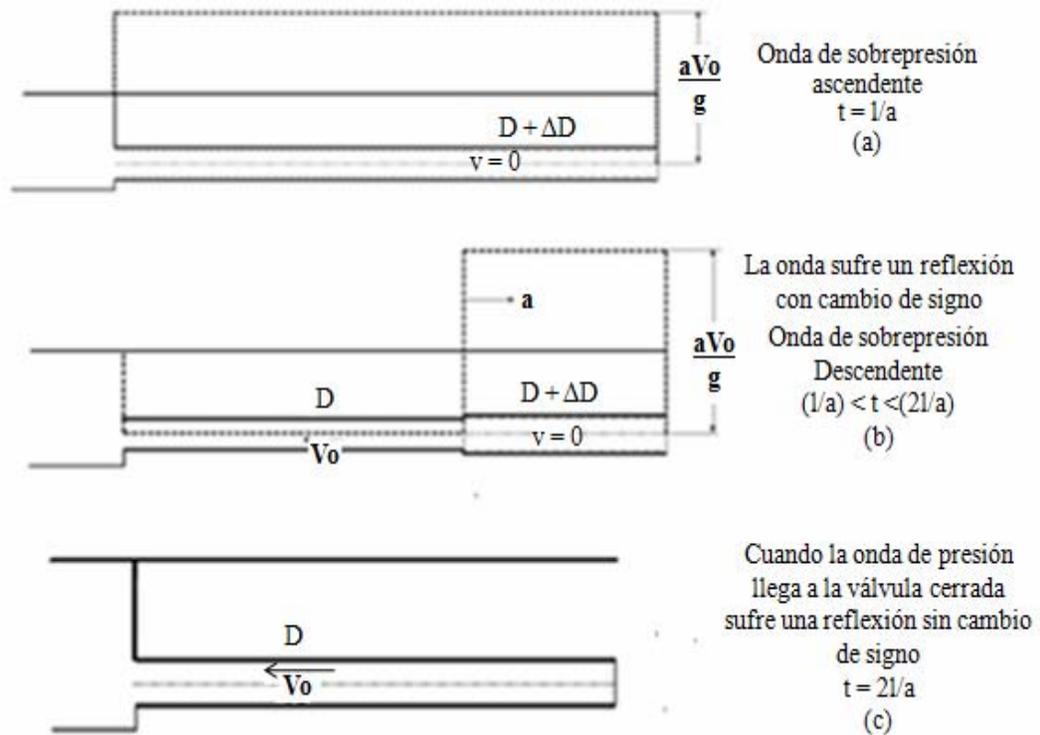
En el caso de cierre instantáneo de la válvula, para el instante de cierre  $0 < t < l/a$ , se genera una onda de presión positiva como se muestra en la Fig. 2.1-b que se mueve aguas arriba frenando el fluido a su paso hasta lograr su reposo, comprimiéndolo y dilatando las paredes de la tubería [6].



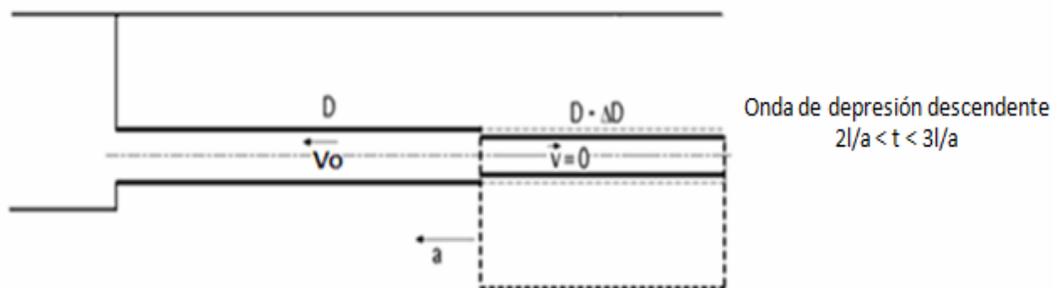
**Figura 2.1** Esquema de expansión de la tubería producto del cierre una válvula [6].

En la Fig. 2.2-a se muestra que cuando la onda alcanza al extremo aguas arriba de la tubería en un tiempo  $t=l/a$ , todo el fluido se encuentra bajo una presión adicional. Como la altura del tanque se mantiene constante, se tiene un desbalance en el momento en que llega la onda de presión, lo que ocasiona que el fluido comience a circular en sentido contrario. La presión en el fluido vuelve al valor que tenía antes del cierre de la válvula, la tubería recupera sus dimensiones originales y el fluido adquiere una velocidad  $V_0$  en sentido contrario al original como se muestra en la Fig. 2.2-b para  $l/a < t < 2l/a$ . En la Fig. 2.2-c la onda ha llegado a la válvula y se han restablecido las condiciones normales en la tubería con excepción de la velocidad del fluido  $V_0$  que ahora tiene dirección hacia el tanque [6].

En la Fig. 2.3 se aprecia que como la válvula está cerrada no se puede mantener flujo a través de ella y por lo tanto se desarrolla una presión negativa. Esta onda de presión se propaga nuevamente aguas arriba frenando el fluido y expandiéndolo debido a la baja presión, ocasionando que se contraigan las paredes de la tubería [6].



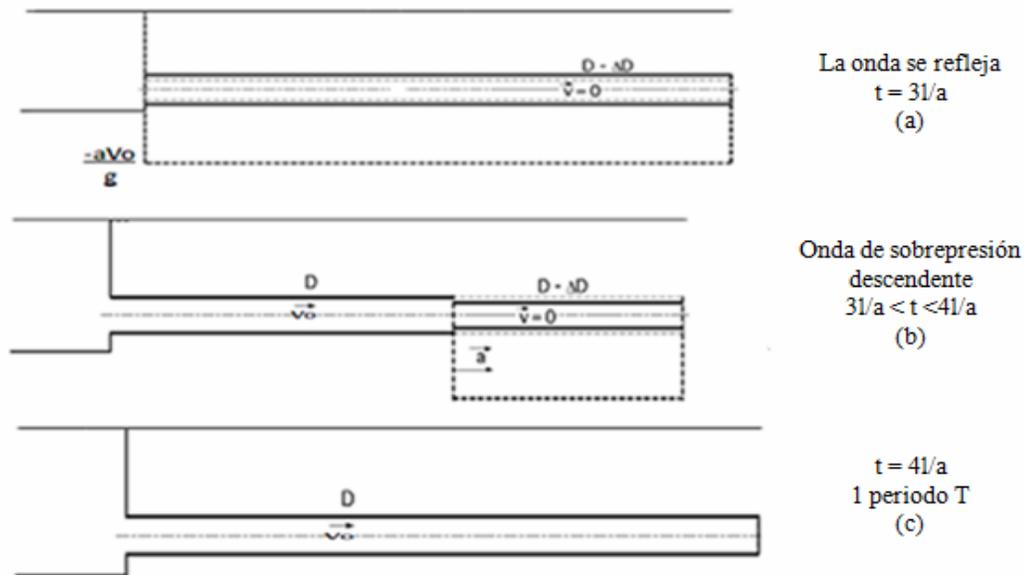
**Figura 2.2** Esquema del avance de la onda de presión [6].



**Figura 2.3** Esquema de la onda de depresión [6].

Cuando esta onda de presión negativa llega al extremo superior de la tubería  $t=3l/a$ , el fluido se encuentra en reposo con una presión menor, de la que tenía antes del cierre como se indica en la Fig. 2.4-a. En la Fig. 2.4-b las condiciones del sistema presentan un desbalance en el tanque lo que provoca que el fluido comience a moverse otra vez hacia la válvula. En la Fig. 2.4-c se aprecia el momento que la onda

llega a la válvula; todas las condiciones son exactamente iguales a las que se tenían antes del cierre, ocurrido  $4l/a$  segundos antes [6].



**Figura 2.4** Esquema de la normalización del efecto del golpe de ariete [6].

El estudio de golpe de ariete fue hecho en primer lugar por Joukowski, luego Allievi desarrollo otros trabajos, pero estos investigadores establecieron aproximaciones a las ecuaciones reales que estudian el fenómeno de golpe de ariete y no arrojan un resultado exacto sobre cómo ocurre.

El cálculo de la sobrepresión depende del tiempo de cierre de la válvula ( $t_c$ ). Por lo tanto, el cierre puede ser:

- ✓ Rápido:  $0 < t_c < 2t$ . La presión máxima es la misma que en el cierre instantáneo; aunque la curva de presiones en la tubería en función del tiempo sea distinta. En el cierre rápido una onda de presión no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo. Por ejemplo, en una tubería de acero de 1000 metros de longitud, habría que cerrar la válvula en menos de 2 segundos para que existiera cierre instantáneo y se alcanzaran las presiones máximas. A partir de

este tiempo, los rebotes en forma de depresión provenientes del depósito harían que el incremento de presión no fuese tan elevado.

- ✓ Lento:  $t_c > t$ . La presión máxima es menor que en el caso precedente. Este último caso es más frecuente en la práctica. En definitiva, el tiempo de cierre es, por tanto, un factor fundamental para la reducción de la intensidad del golpe de ariete [6].

Las ecuaciones fundamentales del régimen transitorio se obtienen aplicando la ecuación de continuidad y de movimiento a un elemento fluido, tomando en cuenta la variabilidad temporal de la presión y velocidad del flujo, y la elasticidad del fluido y de la tubería. Las variables dependientes son la altura de presión (Piezométrica)  $H$  y la velocidad promedio en una sección transversal  $V$ . Las variables independientes son la distancia  $x$  y el tiempo  $t$ , con lo que se tiene que  $H=H(x, t)$  y  $V=V(x, t)$ . Estas constituyen un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales cuya solución analítica es excesivamente compleja, por lo que se recurre a procedimientos numéricos.

Los cambios localizados que se producen en la presión y velocidad del flujo se propagan a lo largo de la tubería con una velocidad cercana a la velocidad del sonido en ese medio, pero afectada por la elasticidad de la tubería. La velocidad de propagación  $a$  de la onda elástica en tuberías que transportan líquidos está determinada por las propiedades del fluido y por la geometría y las propiedades elásticas de la tubería, y viene dada por [5]:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma}{g} \left( \frac{D_i C_1}{e E} + \frac{1}{K} \right)}} \quad (2.3)$$

Donde:

$E$  = Módulo de Young

$e$  = Espesor de la tubería

$D_i$  = Diámetro interno de la tubería

$g$  = Gravedad

$\gamma$  = Peso Específico

$K$  = Compresibilidad del líquido

$C_1$  = Constante que depende de las restricciones de la tubería

La compresibilidad de un líquido es importante, en situaciones donde existen cambios repentinos o grandes en la presión. La compresibilidad de un líquido se expresa por su módulo elástico a la compresión (Módulo de compresibilidad) [5]:

$$K = - \frac{dP}{\frac{dV}{V}} = - \frac{dP}{\frac{d\rho}{\rho}} \quad (2.4)$$

Los estudios de Golpe de ariete han sido desarrollados en su mayoría para sistemas de transporte de agua, pero existen ciertas diferencias importantes en relación a los oleoductos. Las tuberías que transportan crudos son muy largas, están constituidas de acero dúctil y presentan pérdidas por fricción considerables. Además, los hidrocarburos respecto al agua son:

- Menos densos.
- Más viscosos.
- Poseen una presión de vapor mayor.

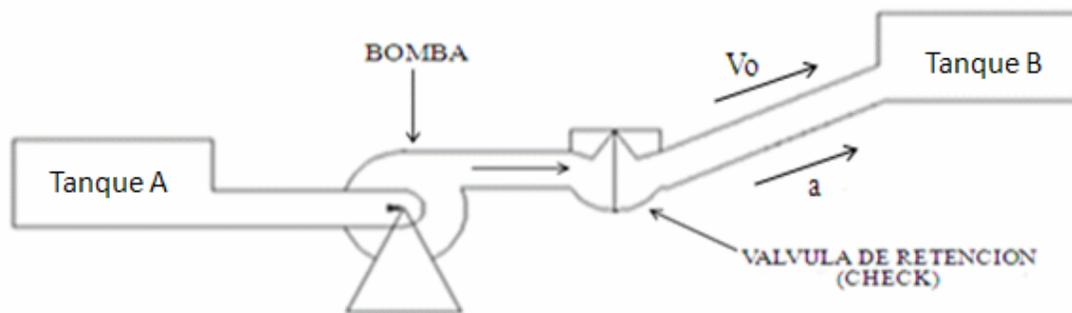
En tuberías largas y casos de fricción muy alta, como son los oleoductos, ocurre que la caída de presión a lo largo de la tubería en estado estacionario puede ser mucho mayor que la magnitud de la onda de presión inicial generada, por ejemplo por el cierre de una válvula. Por efectos de la fricción la magnitud de esta onda disminuye a medida que se desplaza aguas arriba, fenómeno conocido como atenuación.

Por otro lado ocurre que la magnitud de la onda muchas veces no es suficiente para detener el fluido a su paso. Cuando la onda de presión se transmite en la tubería se encuentra que la presión del fluido aguas arriba es mucho mayor debido a la fricción, esta diferencia de presión es transmitida aguas abajo y se suma al aumento de presión inicial debido al cierre de la válvula. Esto ocasiona que la presión en

válvula continúe aumentando un cierto tiempo después de que se generó la primera onda. Este fenómeno de aumento de presión que sucede después de la onda de presión es llamado “line pack” [6].

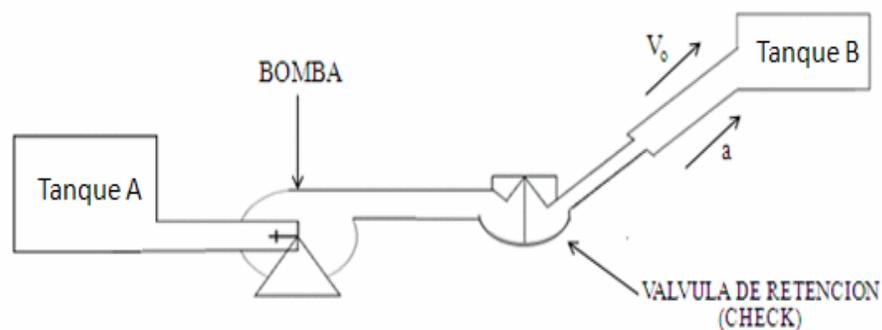
### 2.3.2- Golpe de ariete en la línea de descarga de una bomba

Se produce cuando la energía, que alimenta el motor de la bomba, es cortada repentinamente. Esa energía mantenía el movimiento de rotación del motor, para así impulsar el fluido [5]. En la Fig. 2.5 se observa el sistema operando en normalmente.



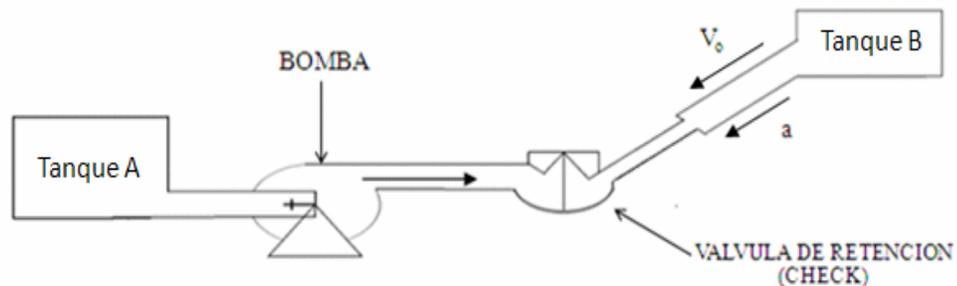
**Figura 2.5** Sistema Depósito – Bomba.

En la Fig. 2.6 se muestra que el corte de energía detiene el proceso de impulsión provocando que la velocidad del fluido a la descarga de la bomba se reduzca, creándose una depresión que se desplaza aguas abajo de la bomba, esta depresión es reflejada en el depósito como una sobrepresión.



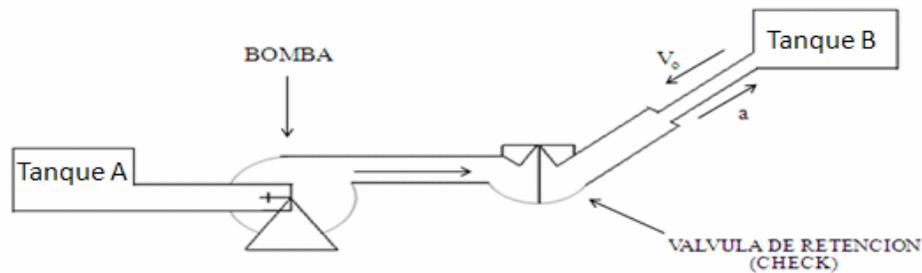
**Figura 2.6** Esquema de la onda de depresión.

Al detenerse la bomba debido al corte de energía el flujo seguirá desplazándose hacia arriba debido a la energía que ya tenía antes de detenerse la bomba pero hay un instante en que el flujo no tiene la suficiente energía para desplazarse hacia arriba y por inercia comienza a devolverse hacia la válvula check instalada (Ver Fig. 2.7).



**Figura 2.7** Esquema del regreso del fluido debido a su inercia.

La magnitud del golpe de ariete una vez generado depende del caudal de la velocidad de la onda, de la gravedad específica y del diámetro interno de la tubería de descarga. Para reducir la magnitud del golpe de ariete se instala en la descarga una válvula de retención, con características de operación de cierre rápido controlado (non slam-nozzle check valve), que al producirse la depresión se cierra, minimizando su magnitud y eliminando el flujo inverso, mientras más tarde la válvula de retención en cerrarse mayor es la magnitud de la depresión, el fluido al devolverse hacia la bomba, encontrando la válvula de retención cerrada, ocasiona el choque y la compresión del fluido, lo cual da origen a la onda de sobrepresión (Golpe de Ariete) (Ver Fig. 2.8).



**Figura 2.8** Esquema de la onda de Sobrepresión.

### 2.3.3 Golpe de ariete en maniobras de apertura y cierre del distribuidor de las turbinas eléctricas

Se presenta cuando en una central hidroeléctrica, un grupo de alternadores se queda bruscamente sin carga. Si los reguladores de algunas de estas turbinas hidráulicas, por ejemplo: El distribuidor Fink o el inyector Pelton se cierran lentamente, la turbina se embalaría; pudiendo desencadenar una avería mecánica lo cual hay que evitar; pero si se cierran rápidamente, se produce el golpe de ariete. Para solucionar este problema [7]:

- ✓ En las turbinas Francis se utiliza el orificio compensador.
- ✓ En la turbina Pelton se utiliza la pantalla deflectora.
- ✓ En otro tipo de turbina se utiliza la chimenea de equilibrio.

Estos dispositivos ayudan, amortiguando la acción de la onda de presión, a evitar el golpe de ariete.

### 2.4 Teorías para el estudio de flujos de fluidos en tuberías

Una teoría es un conjunto de razonamientos, ideados para explicar un determinado orden de fenómenos. En el análisis de tuberías se presentan dos grandes teorías [5]:

- Teoría del modelo rígido.
- Teoría del modelo elástico.

### 2.4.1 Teoría del modelo rígido

Esta teoría establece que si en una tubería la variación de velocidad y aceleración, en un período de tiempo relativamente largo, es pequeña, la presión generada será constante y las deformaciones, presentadas en la tubería, serán despreciables [5].

Simplificando y utilizando la variable H (altura piezométrica) y Q (caudal) en lugar de utilizar la presión P y la velocidad V se obtiene [8]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0 \quad (2.6)$$

Donde:

A = Área de sección transversal

t = Tiempo

g = Aceleración de gravedad

a = Velocidad de onda

**f** = Factor de fricción

D = Diámetro de la tubería

Para resolver este conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales de tipo hiperbólico se recurre generalmente, al método de las características (MOC).

Las consideraciones más importantes en esta teoría son [5]:

- ✓ El flujo en el conducto es incompresible.
- ✓ Las paredes del conducto se consideran rígidas o indeformables.
- ✓ La tubería permanece llena de agua todo el tiempo; la presión mínima en cualquier sección, siempre es mayor que la presión de vaporización del agua.
- ✓ La pérdida de carga por fricción, y la carga de velocidad son despreciables con relación a los cambios de presión.

- ✓ La distribución de velocidad y presión, en cualquier sección del conducto es uniforme.
- ✓ El nivel del reservorio se mantiene constante; durante el tiempo de movimiento de la compuerta.

#### 2.4.2 Teoría del modelo elástico

Esta teoría se acerca más al comportamiento real del fenómeno. A diferencia del anterior, precisa condiciones que la teoría de la tubería rígida no describe [5].

Las ecuaciones generales del modelo elástico son [8]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g \cdot \text{sen} \phi + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.8)$$

Donde:

V = Velocidad

t = Tiempo

g = Aceleración de gravedad

a = Velocidad de onda

*f* = Factor de fricción

D = Diámetro de la tubería

$\rho$  = Densidad del fluido

P = Presión

$\Phi$  = Pendiente de la tubería

Las condiciones más importantes de esta teoría son [5]:

- ✓ Las paredes de la tubería y el fluido se comportan elásticamente, bajo la acción de un campo de presión, y tienen pequeñas deformaciones.
- ✓ La tubería permanece llena de fluido, todo el tiempo, y la presión mínima en cualquier sección es superior a la presión de vaporización del líquido.
- ✓ Existe un efecto de fricción; entre el fluido y las paredes de la tubería.

- ✓ La carga de velocidad es despreciable, cuando se compara con los cambios de presión.
- ✓ Las distribuciones de velocidad y presión en cualquier sección del conducto son uniformes.
- ✓ El nivel del reservorio se mantiene constante; durante el tiempo de movimiento de la compuerta.

## **2.5 Lenguaje de Programación**

### **2.5.1 Visual basic 2008**

Esta herramienta computacional se desarrolló en un lenguaje de programación como lo es VISUAL BASIC 2008, el cual es una herramienta de diseño de aplicaciones para Microsoft Windows [9].

La palabra “Visual” hace referencia al método que se utiliza para crear la interfaz de usuario (GUI). En lugar de escribir numerosas líneas de código para describir la apariencia y la ubicación de los elementos en la interfaz, simplemente se pueden arrastrar y colocar objetos prefabricados en su lugar dentro de la pantalla [9].

La palabra “Basic” hace referencia al lenguaje BASIC (Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code), el cual es un lenguaje muy utilizado por muchos programadores. Con el entorno de desarrollo de VISUAL BASIC 2008, se pueden crear aplicaciones para Windows, biblioteca de clases, y aplicaciones de consola [9].

---

*CAPÍTULO 3*

**DESARROLLO DEL TRABAJO**

### **3- DESARROLLO DEL TRABAJO**

#### **3.1 Estudiar los Modelos Matemáticos Establecidos para el Estudio de Golpe de Ariete**

Para el estudio de los modelos matemáticos se hizo necesaria la revisión del trabajo de grado desarrollado por Ayala H, Rolando F [5]. En el cual después de una revisión de sus modelos matemáticos establecidos con las ecuaciones que rigen el golpe de Ariete para el sistema Reservorio-Tubería-Válvula, se concluyo que estos modelos matemáticos representan el fenómeno de golpe de ariete para un sistema Bomba-Tubería-Válvula, ya que estos se establecen para introducir la elasticidad de la tubería (Esfuerzos y deformaciones en todos los sentidos) y para transmitirle la energía del fluido (Modulo de Compresibilidad, Velocidad de la onda) . El golpe de ariete por detención o parada de bombas se estudia como golpe de ariete debido al cierre rápido de válvulas debido a que el golpe se produce después de la válvula check colocada en la descarga de la bomba y se estudia como si el reservorio estuviera apagado (corte de corriente de la bomba).

##### **3.1.1 Esfuerzos en la tubería**

Los esfuerzos son producidos por efecto de la expansión-contracción de la tubería, producto de presiones internas generadas por el cambio en la dirección del fluido.

Los esfuerzos en la tubería se estudian a partir de [5]:

- ✓ Pared Delgada.
- ✓ Pared Gruesa

Los esfuerzos en pared delgada se diferencian de la pared de la gruesa, en que no considera los esfuerzos radiales, puesto que sus paredes proporcionan poca resistencia a la flexión, es por esto que para pared delgada, los esfuerzos producidos en las paredes del conducto son: Esfuerzos axiales, tangenciales o circunferenciales.

- ✓ Esfuerzo axial en pared delgada.

$$\sigma_a = \frac{\gamma \times dH \times D_i}{4e} \quad (3.1)$$

- ✓ Esfuerzo tangencial de pared delgada.

$$\sigma_t = \frac{\gamma \times dH \times D_i}{2e} \quad (3.2)$$

- ✓ Esfuerzo axial en pared gruesa :

$$\sigma_a = \frac{Pr_i}{r_0^2 - r_i^2} \quad (3.3)$$

- ✓ Esfuerzo radial en pared gruesa:

$$\sigma_r = \frac{Pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left( \frac{r^2 - r_0^2}{r^2} \right) \quad (3.4)$$

- ✓ Esfuerzo tangencial en pared gruesa:

$$\sigma_t = \frac{Pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left( \frac{r^2 + r_0^2}{r^2} \right) \quad (3.5)$$

Como los esfuerzos, radiales y tangenciales, en pared gruesa dependen del espesor de pared, se tomaran para el modelo matemático los esfuerzos promedios [5]:

$$\bar{\sigma}_r = \frac{Pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left[ \frac{r_0 \left( 2 - \frac{r_0}{r_i} \right) - r_i}{r_0 - r_i} \right] \quad (3.6)$$

$$\bar{\sigma}_t = \frac{Pr_i^2}{r_0^2 - r_i^2} \left[ \frac{\frac{r_0}{r_i} - r_i}{r_0 - r_i} \right] \quad (3.7)$$

$$\bar{\sigma}_a = \frac{\gamma \times dh \times r_i}{e} \quad (3.8)$$

### 3.1.2 Elasticidad de la tubería

Se produce por el efecto de la expansión-contracción en las paredes del conducto a causa de pulsaciones de presión. Esto genera esfuerzos que a su vez producen deformaciones en las paredes del conducto.

En la elasticidad de la tubería se aplica el análisis de la ley de Hooke, a fin de relacionar los esfuerzos con las deformaciones y la razón de Poisson, para así establecer afinidad en las deformaciones entre las caras del elemento.

### 3.1.2.1 Deformaciones Producto de los Esfuerzos (Pared Delgada)

- Deformaciones por esfuerzos axiales: Este esfuerzo axial produce deformaciones tanto en la propia dirección (la axial), como en la dirección radial y tangencial y se calculan siguiendo la teoría de la elasticidad de la siguiente manera:

$$\sigma_a = E\varepsilon_a \rightarrow \varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} \quad (3.9)$$

- Deformaciones por esfuerzos tangenciales.

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} - \frac{\nu\sigma_t}{E} \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{\nu\sigma_t}{E} - \frac{\nu\sigma_a}{E} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} - \frac{\nu\sigma_a}{E} \quad (3.12)$$

Las Ecs. (3.10), (3.11) y (3.12) muestran las deformaciones en todas las direcciones, producto de los esfuerzos tangenciales y axiales.

- Variaciones en las dimensiones del elemento.

Toda vez que un elemento de tubería se comporta de manera elástica debido a los cambios de presión, el elemento sufre cambios en los esfuerzos internos por lo que a su vez sufre deformaciones que se calculan a través de las ecuaciones (3.10), (3.11) y (3.12). Obviamente, estas traen consigo variaciones en las dimensiones del elemento que se presentan a continuación.

a. Axial:

$$\delta x = \frac{dx}{E} (\sigma_a - \nu\sigma_t) \quad (3.13)$$

b. Radial:

$$\Delta R_1 = \frac{e}{2E} (v\sigma_t + v\sigma_a) \quad (3.14)$$

c. Tangencial:

$$\Delta R_2 = \frac{R}{E} (\sigma_t - v\sigma_a) \quad (3.15)$$

Estas deformaciones pueden ser relacionadas en una sola ecuación si se considera el volumen del elemento recién deformado:

$$Ax = \delta x + \frac{2\Delta R_T dx}{R} \quad (3.16)$$

Sustituyendo las Ecs. (3.13), (3.14) y (3.15) en la Ec. (3.16) se obtiene:

$$Ax = \frac{dx}{E} \left\{ \sigma_a \left[ 1 + v \left( \frac{e}{R} - 2 \right) \right] + \sigma_t \left[ 2 + v \left( \frac{e}{R} - 1 \right) \right] \right\} \quad (3.17)$$

### 3.1.2.2 Deformaciones, producto de los esfuerzos (Pared Gruesa).

Este es el caso más general, se incluyen todos los esfuerzos y todas las deformaciones posibles en la tubería.

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E} [\sigma_a + v(-\sigma_t - \sigma_r)] \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r + v(-\sigma_t - \sigma_a)] \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t + v(-\sigma_r - \sigma_a)] \quad (3.20)$$

a. Axial:

$$\delta x = \frac{dx}{E} [\sigma_a + v(-\sigma_r - \sigma_t)] \quad (3.21)$$

b. Radial:

$$\Delta R_1 = -\frac{e}{2E} [\sigma_r + v(-\sigma_t - \sigma_a)] \quad (3.22)$$

c. Tangencial:

$$\Delta R_2 = \frac{2R+e}{2E} [\sigma_t + v(-\sigma_a - \sigma_r)] \quad (3.23)$$

Estas deformaciones pueden ser relacionadas en una sola ecuación si se considera el volumen del elemento recién deformado.

Sustituyendo las Ecs. (3.21), (3.22) y (3.23) en la Ec. (3.16) se obtiene:

$$Ax = \frac{dx}{E} \left\{ \sigma_a(1 - 2\nu) + \sigma_r \left[ -3\nu + \frac{e}{R}(-1 - \nu) \right] + \sigma_t \left[ -\nu + \frac{e}{R}(\nu + 1) + 2 \right] \right\} \quad (3.24)$$

### 3.1.3 Elasticidad del líquido:

El modulo de elasticidad volumétrica viene dado por la ecuación (2.4). Esta ecuación es la variación del volumen del elemento original de longitud  $dx$  a causa de la elasticidad del líquido. A partir de esta ecuación se puede obtener el cambio de longitud del elemento [5]:

$$-\frac{dv}{A} = \frac{\gamma \times dH \times dx}{K} \quad (3.25)$$

### 3.1.4 Esfuerzos generados por restricciones de movimiento de la tubería:

✓ Tipo 1: Tubería anclada en un extremo

Una tubería anclada en un extremo posee un extremo libre de movimiento, en la dirección longitudinal, se generan todos los esfuerzos en la tubería [5].

Sustituyendo las Ecs. (3.1) y (3.2) en la Ec. (3.24) se obtiene:

$$Ax = \frac{dx}{E} \left[ \frac{\gamma \times dH \times D_i}{2e} \left( \frac{5}{2} + \frac{3e\nu}{2R} - 2\nu \right) \right] \quad (3.26)$$

✓ Tipo 2: Tubería anclada en ambos extremos, sin junta de expansión:

Es una tubería en la que el movimiento longitudinal de la tubería está restringido, por tanto, la deformación axial es cero [5].

Por este término ser nulo el esfuerzo axial sería igual a:

$$\epsilon_a = 0 = \frac{\sigma_a}{E} - \nu \frac{\sigma_t}{E} \rightarrow \sigma_a = \nu \sigma_t$$

$$\sigma_a = \frac{\nu \gamma \times dH \times D_i}{2e} \quad (3.27)$$

Sustituyendo las Ecs. (3.2) y (3.27) en la Ec. (3.24) se obtiene:

$$Ax = \frac{dx}{E} \left[ \frac{\gamma \times dH \times D_i}{2e} \left( -2\nu^2 + \frac{e\nu^2}{R} + \frac{e\nu}{R} + 2 \right) \right] \quad (3.28)$$

✓ Tipo 3: Tubería anclada en ambos extremos, con junta de expansión.

Es una tubería que posee un tipo de anclaje que además de permitir movilidad a la tubería, evita que se generen esfuerzos longitudinales o axiales haciendo así que este término en la ecuación sea cero [5].

Sustituyendo la Ec. (3.2) en la Ec. (3.24) se obtiene:

$$Ax = \frac{dx}{E} \left[ \frac{\gamma \times dH \times D_i}{2e} \left( 2 + \nu \left( \frac{e}{R} - 1 \right) \right) \right] \quad (3.29)$$

### 3.1.5 Ecuación de la continuidad

La ecuación de continuidad para un volumen de control afirma que la rapidez de aumento de la masa dentro de un volumen de control es justamente igual a la rapidez neta del flujo hacia adentro del volumen de control.

La condición de continuidad para el elemento, requiere que todo el espacio del conducto sea ocupado por el líquido [5].

$$Ax = - \frac{\partial V}{\partial x} dx dt \quad (3.30)$$

#### 3.1.5.1 Transformación de la Longitud del Elemento

La transformación de la longitud total del elemento, líquido, cuando se consideran: La compresibilidad del líquido y la deformación de la tubería se obtiene con la Ec. (2.3) [5]:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma}{g} \left( \frac{D_i C_1}{eE} + \frac{1}{K} \right)}}$$

E = Módulo de Young

e = Espesor de la tubería

D<sub>i</sub> = Diámetro interno de la tubería

g = Gravedad

$\gamma$  = Peso Específico

$K$  = Compresibilidad del líquido

$C_1$  = Constante que depende de las restricciones de la tubería

Ecuación de continuidad del sistema:

$$\frac{\partial V}{\partial x} \alpha^2 \rho + \frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (3.31)$$

### 3.1.6 Ecuación de la cantidad de movimiento

Para obtener la ecuación dinámica de un conducto solo es necesario establecer el equilibrio de fuerzas que actúan en la dirección en estudio. La Fig. 3.1 muestra un volumen de control del fluido con todas las fuerzas actuantes.

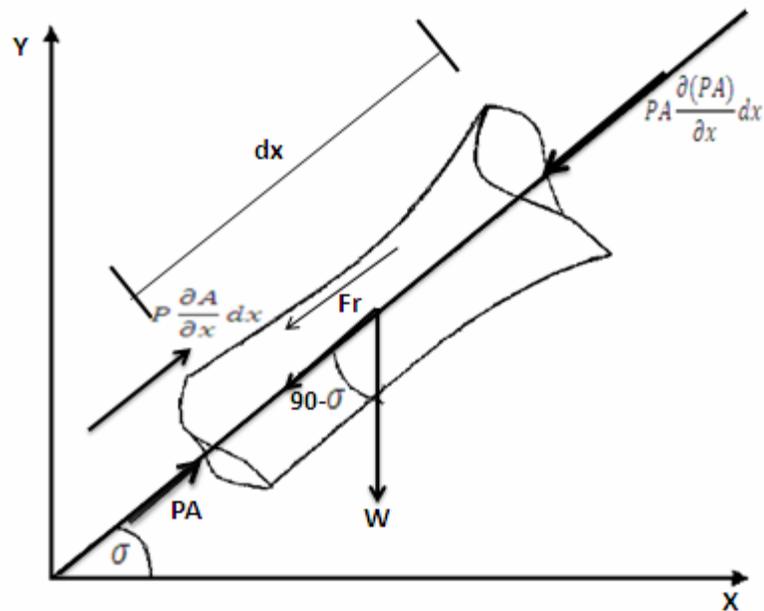


Figura 3.1 Diagrama de Cuerpo Libre [6].

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} + g \times \text{sen } \sigma = 0 \quad (3.32)$$

De todo el análisis presentado, las ecuaciones a utilizar para resolverse por el Método de las características y método de las diferencias finitas serán: La Ec. (2.3), que

calcula la velocidad de la onda, la Ec. (3.31) que es la ecuación de continuidad del sistema y la Ec. (3.32) que es la ecuación de la cantidad movimiento del sistema.

### **3.2 Métodos Matemáticos Utilizados para la Resolución de los Modelos Matemáticos Establecidos.**

Al estudiar los modelos matemáticos que gobiernan el proceso de golpe de ariete para los dos sistemas estudiados arrojo que las ecuaciones diferenciales que rigen ambos sistemas son las mismas, esto quiere decir que los métodos matemáticos para resolver dichas ecuaciones serán los mismos los cuales se analizarán a continuación:

Las ecuaciones diferenciales obtenidas en este capítulo Ec. (3.31) y la Ec. (3.32), son diferenciales, las cuales necesitan métodos matemáticos para convertirlas en algebraicas y así poderlas usar en el cálculo del fenómeno. Los métodos empleados son:

- Método de las Características.
- Método de las diferencias Finitas.

El primero, convierte las ecuaciones diferenciales parciales, del sistema, en un par de ecuaciones diferenciales totales. Para así con el método de las diferencias finitas obtener las ecuaciones, que relacionan el caudal con la carga.

#### **3.2.1 Método de las características:**

Esta sección se refiere a las características de la ecuación diferencial parcial, las cuales son importantes para la comprensión de la solución analítica y los esquemas numéricos. Por ejemplo se requiere la solución analítica de [5]:

$$\mathbf{u}_t + \mathbf{a}(\mathbf{x})\mathbf{u}_x = \mathbf{s}(\mathbf{x}, t) \quad (3.33)$$

##### **3.2.1.1 Resolución de las Ecuaciones del Sistema [5].**

De las ecuaciones de momento y continuidad respectivamente se obtiene:

$$L_1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f \frac{V|V|}{2D} + g \times \text{sen}\sigma = 0 \quad ; \quad L_2 = \frac{\partial V}{\partial x} \alpha^2 \rho + \frac{\partial P}{\partial t} = 0$$

Por combinaciones lineales [5]:

$$L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (3.34)$$

Las ecuaciones que gobiernan el proceso serán:

$$C^+: \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho \times a} \frac{dP}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} + g \times \text{sen}\sigma = 0 \quad (3.35)$$

$$C^-: \frac{dV}{dt} - \frac{1}{\rho \times a} \frac{dP}{dt} + f \frac{V|V|}{2D} + g \times \text{sen}\sigma = 0 \quad (3.36)$$

### 3.2.2 Método de las diferencias finitas:

Este método, el dominio de solución es dividido en una malla de puntos discretos o nodos. Entonces, se describe la ecuación diferencial parcial para cada nodo y sus derivadas se reemplazan por diferencia finitas divididas.

Usando las Ecs. (3.35) y (3.36), aplicándole el método de las diferencias finitas y resolviéndolas por distintas operaciones matemáticas se obtiene:

$$C^+: H_{pi} = H_{i-1} - B(Q_{pi} - Q_{i-1}) - R(Q_{pi}|Q_{i-1}|) \quad (3.37)$$

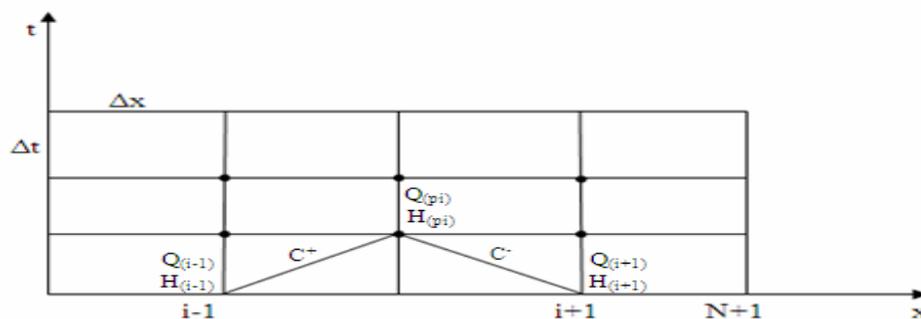
$$C^-: H_{pi} = H_{i+1} + B(Q_{pi} - Q_{i+1}) + R(Q_{pi}|Q_{i+1}|) \quad (3.38)$$

Donde:

$$B = \frac{a}{gA} \quad (3.39)$$

$$R = \frac{f \Delta x}{2gDA^2} \quad (3.40)$$

La solución numérica para una tubería simple, de N segmentos de igual longitud de tal forma que  $\Delta x = \frac{L}{N}$  y  $\Delta t = \frac{\Delta x}{a}$ . De esta forma las líneas  $C^+$  y  $C^-$  son diagonales en la malla (ver Fig. 3.2, se aplicara la notación de índices de la Figura mostrada).



**Figura 3.2** Malla rectangular para la resolución de las ecuaciones mediante el método de las características [Propia].

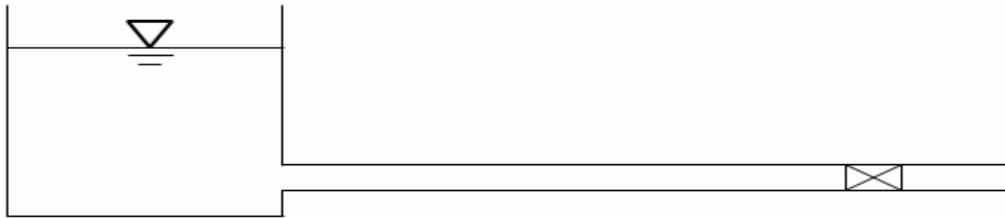
Agrupando términos, para facilitar la obtención de las ecuaciones finales, para las condiciones de frontera [5]:

$$C^+ \begin{cases} C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1} \\ B_p = B + R|Q_{i-1}| \\ H_{pi} = C_p - Q_{pi}B_p \end{cases} \quad ; \quad C^- \begin{cases} C_m = H_{i+1} - BQ_{i+1} \\ B_m = B + R|Q_{i+1}| \\ H_{pi} = C_m + Q_{pi}B_m \end{cases} \quad (3.41) \quad (3.42)$$

### 3.3 Simulación

#### 3.3.1 Sistema reservorio-tubería-válvula

El estudio de golpe de ariete conduce a un modelo matemático aplicado a un sistema como se muestra en la Fig. 3.3 y definido por las idealizaciones de flujo transitorio en fluidos compresibles, incorporando el comportamiento elástico de las paredes de la tubería y del fluido que la llena y estableciendo tres tipos de restricciones en sus condiciones extremas: Tubería en voladizo, tubería anclada en ambos extremos con junta de expansión y tubería anclada en ambos extremos sin junta de expansión.



**Figura 3.3** Sistema Reservorio – Tubería- Válvula.

Este estudio abarca no solo el caso de tubería delgada de espesor, esfuerzo y deformaciones radiales despreciables; sino que se establece para cualquier tipo de tuberías de pared gruesa, para lo cual es necesaria la consideración del espesor de la pared así como también los diferentes esfuerzos y deformaciones originados.

El modelo obtenido es general abarca tanto el sistema Sumidero-Tubería-Válvula, así como también mediante una redefinición de las condiciones de frontera el sistema Bomba- Tubería-Válvula, y esa es la novedad que presenta este estudio.

Con cada Modelo se pueden cubrir quince clases diferentes de sistemas combinando los cinco casos con los tres tipos de restricciones. Todos estos sistemas son solucionables con el uso del método computacional. De menor a mayor complejidad se estudia como caso (0) el de espesor, esfuerzo y deformación axial y radial despreciable. Como primer caso (I) el de espesor, esfuerzo y deformación radial despreciable, que constituye el clásico tipo de pared delgada. Como segundo caso (II), se desprecian los esfuerzos y las deformaciones radiales. Como tercer caso (III) no se consideran los esfuerzos radiales y como cuarto caso (IV), que es general, corresponde al caso de pared gruesa en la cual se consideran las variaciones producidas por los esfuerzos y deformaciones originados en todos los sentidos (radial, tangencial, axial). Como restricciones se utilizarán: La de tubería anclada en voladizo (Tipo 1), la de tubería anclada en ambos extremos sin junta de expansión (Tipo 2), la de tubería anclada en ambos extremos con junta de expansión (Tipo 3).

La razón para despreciar los esfuerzos radiales, en pared delgada, obedece a que los esfuerzos radiales generados son muy pequeños, pues las paredes son poco resistentes a la flexión.

### 3.3.2.1 Condiciones Iniciales

Se estudia el sistema trabajando bajo flujo permanente. Partiendo de estas condiciones (Caudal, carga) se estudia el fenómeno transitorio.

Aplicando Bernoulli entre dos puntos; tomando como referencia la Figura 3.3, despejando y sabiendo que la carga estática en el reservorio es:

$$H_{res} = \frac{P_2}{\gamma} + h_f \quad (3.43)$$

El flujo a través de la válvula viene dado por:

$$Q = C_d A \sqrt{2g \frac{P_2}{\gamma}} \quad (3.44)$$

Donde  $C_d$  es:

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{K}} \quad (3.45)$$

K: Coeficiente de perdidas en la válvula

$$C_d A = CV \quad (3.46)$$

El flujo inicial es:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{H_{res}}{\frac{1}{2gCV^2} + \frac{fL}{2gDA^2}}} \quad (3.47)$$

La carga inicial viene dada por:

$$H_0 = \frac{\left(\frac{Q_0}{CV}\right)^2}{2g} \quad (3.48)$$

### 3.3.2.2 Condiciones de frontera

Este término se refiere a la condición al final de la tubería. Se puede decir a la terminación de una tubería en depósito, válvula, entre otros o puede ser una conexión entre dos tuberías o un tipo de elemento diferente [5].

1.- Válvula en el extremo corriente abajo:

En este extremo se tiene que aplica la ecuación  $C^+$ , donde  $NS = N + 1$ , genera dos variables  $H_{PNS}$  y  $Q_{PNS}$  [17].

$$Q_{PNS} = -B_P(C_d A)^2 g + \sqrt{[B_P 2g(C_d A)^2]^2 + (C_d A)^2 2g C_p} \quad (3.49)$$

La variable  $H_{PNS}$  viene dada por la Ec. 3.41:

$$H_{PNS} = C_P - Q_{PNS} B_P$$

2.- Reservoirio en el extremo corriente arriba:

El nivel del reservorio, por ser constante, es independiente de las condiciones de flujo en la tubería. Esto es cierto si el volumen del reservorio es bastante grande, por tanto :

$$H_{Pi} = H_{RES} = H_{P1}$$

El reservorio, por encontrarse aguas arriba, se usa la ecuación característica  $C^-$  (Ec. 3.42):

$$H_{p1} = C_m + Q_{p1} B_m$$

$$Q_{p1} = \frac{H_{p1} - H_2 + BQ_2}{B + R|Q_2|}$$

3.- Sección intermedia (entre el reservorio y la válvula): Se refiere al cálculo realizado en todas las secciones interiores del sistema.

Usando las ecuaciones Ec. 3.41 y 3.42, las cuales son:

$$C^+ \begin{cases} C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1} \\ B_p = B + R|Q_{i-1}| \\ H_{pi} = C_p - Q_{pi} B_p \end{cases} ; \quad C^- \begin{cases} C_p = H_{i+1} - BQ_{i+1} \\ B_m = B + R|Q_{i+1}| \\ H_{pi} = C_m + Q_{pi} B_m \end{cases}$$

Se igualan términos semejantes de  $H_{pi}$  y se obtiene:

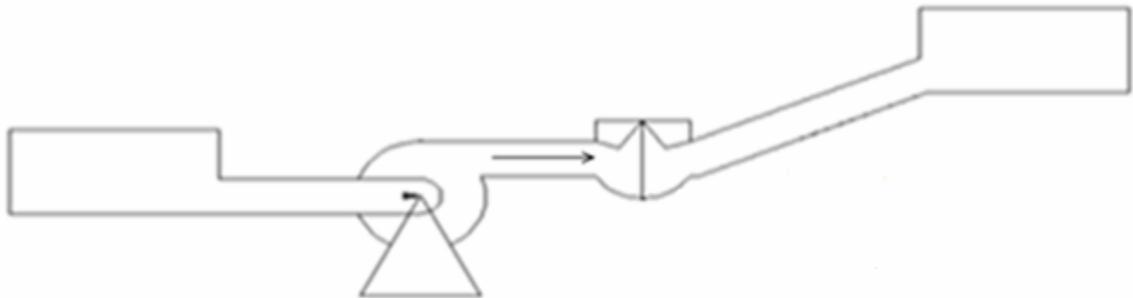
$$Q_{pi} = \frac{C_p - C_m}{B_p + B_m}$$

$$H_{pi} = C_p - Q_{pi}B_p$$

### 3.3.3 Sistema bomba-tubería-válvula

Mediante la revisión de los modelos matemáticos obtenidos para el estudio de golpe de ariete se llegó a la conclusión de que dichos modelos aplicaban tanto para el caso de un sistema Sumidero-Tubería- Válvula, como para el caso de Bomba-Tubería-Válvula y su causa ya fue explicada en la sección 3.1, lo único que mediante una redefinición de las condiciones de de borde se ajustan dichas ecuaciones obtenidas a este tipo de sistema planteado Bomba-Tubería-Válvula lo cual es la novedad que presenta este estudio.

En la Fig. 3.4 se muestra un sistema Bomba-Tubería-Reservorio y las condiciones de borde se toma como si fuera un sistema Bomba-Tubería-Válvula, es de hacer la observación de que el sistema se comporta de igual manera si la descarga es un reservorio o si es una válvula abierta como se analizó en este estudio, es decir el comportamiento de la onda es similar.



**Figura 3.4** Sistema Bomba-Tubería-Válvula.

Al igual que el sistema Reservorio-Tubería-Válvula se toman en cuenta las idealizaciones de flujo transitorio en fluidos compresibles, incorporando el comportamiento elástico de las paredes de la tubería y del fluido que la llena y estableciendo tres tipos de restricciones en sus condiciones extremas: Tubería en voladizo, tubería anclada en ambos extremos con junta de expansión y tubería anclada en ambos extremos sin junta de expansión.

También abarca no solo el caso de tubería delgada de espesor, esfuerzo y deformaciones radiales despreciables; sino que se establece para cualquier tipo de tuberías de pared gruesa, para lo cual es necesaria la consideración del espesor de la pared así como también los diferentes esfuerzos y deformaciones originados.

### 3.3.3.1 Condiciones Iniciales

Se estudia el sistema trabajando en flujo permanente, partiendo de estas condiciones se estudia el fenómeno transitorio.

Como se dijo que las ecuaciones del sistema Reservorio- Tubería-Válvula aplica para un sistema Bomba-Tubería-Válvula, ahora  $H_{res} = H_B$  lo cual que en este caso la  $H_{res}$  no es constante debido a que cuando se produce el corte de energía la altura del reservorio o altura de la bomba sería 0.

$$H_B = \frac{P_2}{\gamma} + h_f$$

(3.50)

El caudal inicial viene dado por el caudal bombeado es decir:

$$Q_o = \sqrt{\frac{H_B}{\frac{1}{2gCV_{check}^2} + \frac{1}{2gCV_{descarga}^2} + \frac{1}{2gDA^2}}} \quad (3.51)$$

O también:

$$Q_0 = Q_{BOMBA} \quad (3.52)$$

La carga inicial viene dada por:

$$H_0 = \frac{\left(\frac{Q_0}{CV_{check}}\right)^2}{2g} \quad (3.53)$$

El flujo a través de la válvula viene dado por Ec. 3.44:

$$Q = C_d A \sqrt{2g \frac{P_z}{\gamma}}$$

Donde  $C_d$  viene dado por Ec. 3.45:

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{K}}$$

K: Coeficiente de pérdidas en la válvula

$$C_d A = CV$$

### 3.3.3.2 Condiciones de Frontera:

1.- Válvula check en el extremo corriente arriba:

Como la configuración es Bomba-tubería-válvula aplica la ecuación C<sup>-</sup>.

$$Q_P = -B_m (C_d A)^2 g + \sqrt{[B_m 2g (C_d A)^2]^2 + (C_d A)^2 2g C_m} \quad (3.54)$$

La variable  $H_P$  viene dada por:

$$H_P = H_B$$

2.- Válvula en extremo corriente abajo:

Aplica C<sup>+</sup> lo único que el  $C_d \cdot A$  va a ser el de la válvula siempre abierta ya que esta no se va a cerrar por que la descarga siempre estará abierta.

$$Q_P = -B_P (C_d A)^2 g + \sqrt{[B_P 2g (C_d A)^2]^2 + (C_d A)^2 2g C_P} \quad (3.55)$$

La variable  $H_P$  viene dada por la ecuación:

$$H_P = C_P - Q_P B_P$$

3.- Sección intermedia (entre la bomba y la válvula): Se refiere al cálculo realizado en todas las secciones interiores del sistema, y vienen dado por las Ec. 3.41 y 3.42.

$$C^* \begin{cases} C_p = H_{i-1} + BQ_{i-1} \\ B_p = B + R|Q_{i-1}| \\ H_{pi} = C_p - Q_{pi}B_p \end{cases} ; \quad C \begin{cases} C_m = H_{i+1} - BQ_{i+1} \\ B_m = B + R|Q_{i+1}| \\ H_{pi} = C_m + Q_{pi}B_m \end{cases}$$

Se igualan términos semejantes de  $H_{pi}$  y se obtiene:

$$Q_{pi} = \frac{C_p - C_m}{B_p + B_m}$$

$$H_{pi} = C_p - Q_{pi}B_p$$

### 3.3.4 Clases de sistemas planteados:

Como se explico, en las secciones anteriores, el modelo obtenido es general y se puede mediante una redefinición de constantes cubrir quince clases diferentes de sistemas combinando los cinco casos con los tres tipos de restricciones [5].

Dependiendo de los diferentes casos se determinan los  $C_1$  de acuerdo a las consideraciones ya mencionadas, para cada uno de los casos y tipos de restricciones.

Caso 0:

Tipo 1:  $C_1 = 1$

Tipo 2:  $C_1 = 1$

Tipo 3:  $C_1 = 1$

Caso I:

Tipo 1:  $C_1 = \frac{5}{4} - v$

Tipo 2:  $C_1 = 1 - v^2$

Tipo 3:  $C_1 = 1 - \frac{v}{2}$

Caso II:

$$\text{Tipo 1: } \mathbf{C}_1 = \frac{5}{4} + \frac{e}{D} \left( \frac{v}{2} + 1 \right) - v$$

$$\text{Tipo 2: } \mathbf{C}_1 = \frac{e}{D} (1 + v^2) + 1 - v^2$$

$$\text{Tipo 3: } \mathbf{C}_1 = 1 - \frac{v}{2} + \frac{e}{D}$$

Caso III:

$$\text{Tipo 1: } \mathbf{C}_1 = \frac{5}{4} - v + \frac{e}{D} (v + 1)$$

$$\text{Tipo 2: } \mathbf{C}_1 = 1 - v^2 + \frac{e}{D} (v + 1)$$

$$\text{Tipo 3: } \mathbf{C}_1 = 1 - \frac{v}{2} + \frac{e}{D} (v + 1)$$

Caso IV: (Pared Guesa)

Tipo 1:

$$\mathbf{C}_1 = \frac{Di(1-2v)}{4(D+e)} + \frac{-e}{2(D+e)} \left[ -3v + \frac{2e}{D} (-1 - v) \right] + \frac{1}{2} \left[ -v + \frac{2e}{D} (v + 1) + 2 \right]$$

Tipo 2:

$$\mathbf{C}_1 = v \left[ \frac{-1}{(D+e)} + \frac{1}{2} \right] [1 - 2v] + \frac{-e}{2(D+e)} \left[ -3v + \frac{2e}{D} (-1 - v) \right] + \frac{1}{2} \left[ -v + \frac{2e}{D} (v + 1) + 2 \right]$$

$$\text{Tipo 3: } \mathbf{C}_1 = \frac{-e}{2(D+e)} \left[ -3v + \frac{2e}{D} (-1 - v) \right] + \frac{1}{2} \left[ -v + \frac{2e}{D} (v + 1) + 2 \right]$$

Puede demostrarse que el caso IV es el más general y comprende los demás casos.

Para el estudio numérico del fenómeno, en un programa computacional desarrollado en VISUAL BASIC 2008, se implementaron las ecuaciones deducidas para cada uno de los casos presentados, pero el caso que se simuló y se le realizó el estudio fue al caso IV (pared gruesa) debido a que en el trabajo de Ayala Rolando F [17] se demostró que este es el caso más cercano a la realidad, permitiendo el estudio y la obtención de resultados numéricos y gráficos que muestran el comportamiento de la presión y caudal en estado transitorio. Luego se relacionan los resultados obtenidos de las experiencias experimentales con el modelo numérico desarrollado para llevar la simulación numérica lo más cercano al fenómeno real.

Esta programa computacional se desarrolló en un lenguaje de programación como lo es VISUAL BASIC 2008, porque es uno de los lenguajes de programación que más entusiasmo despierta en los programadores de PCs, ya que permite desarrollar aplicaciones para Windows de forma visual, compilarlas como archivos ejecutables, por ser una de las herramientas más rápidas para hacer aplicaciones de Windows y por considerarlo muy sencillo de usar y rápido de aprender. Con Visual Basic 2008 se pueden desarrollar aplicaciones de forma mucho más rápida y eficiente que sin un entorno de desarrollo de estas características. Al igual que las anteriores versiones de Visual Basic, la programación de la interfaz es totalmente visual, arrastrando los elementos como botones, barras de progreso o etiquetas al formulario, editando sus propiedades. Visual Basic 2008 toma ventaja de las últimas tecnologías como temas de Windows, Multithreading, conectividad a bases de datos SQL, Microsoft Forms y .NET Framework [9].

---

***CAPÍTULO 4***

**MANUAL DE USUARIO**

#### **4- MANUAL DE USUARIO PARA USO DEL SOFTWARE ARIETE 3.0**

Este capítulo contiene indicaciones útiles para el uso de este programa. El contenido de este capítulo es imprescindible para el uso del programa por que le proporciona indicaciones sobre cómo trabaja su interfaz.

El programa ARIETE es una herramienta computacional de aplicación en la Ingeniería hidráulica diseñada para el cálculo de la sobrepresión producida por el fenómeno de golpe de ariete en tuberías de una manera rápida, sencilla y de fácil manejo, además que puede ofrecer los resultados de manera gráfica. Fue desarrollada en el entorno Visual Basic Express 2008, lenguaje de programación que se encuentra en la extensa plataforma .NET y como cierta desventaja el software puede ser ejecutado en dicha plataforma.

Este Manual de Usuario, contiene una gran cantidad de información, ha sido elaborado para tener un rápido acceso a la información que necesita, ya sea una referencia concreta a la totalidad de las opciones de alguno de los comandos de ARIETE, o los pasos necesarios para concretar las operaciones más comunes.

En este capítulo se muestra el uso del programa para cada una de sus etapas de cálculos para el momento de su uso y es por esto que se recomienda su lectura antes de empezar con su ejecución.

##### **4.1 Requisitos del Sistema para Ejecutar ARIETE 3.0.**

Para poder ejecutar Ariete 3.0 es necesario disponer de los siguientes equipos y programas:

- Ordenador PC basado en un procesador Intel<sup>®</sup> Core<sup>™</sup> 2 Duo, Pentium<sup>®</sup> o superior.
- Microsoft Windows XP o Cualquier Windows que sea compatible con la plataforma .NET Framework 3.0.
- 15 MB de RAM (Memoria de acceso aleatorio) como mínimo.

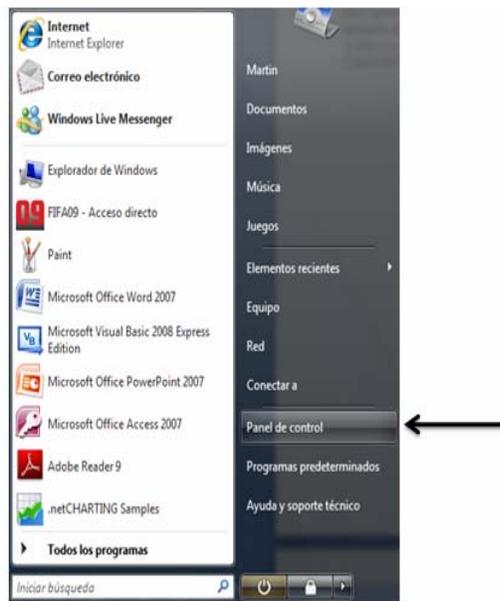
- Un disco duro de 60 MB disponibles como minimo. Dependiendo de los archivos con los que trabaje, mas espacio puede resultar necesario.
- Debe tener Instalado Microsoft Office 2007.
- Un ratón u otro dispositivo señalador compatible.

Para mejorar el funcionamiento de ARIETE 3.0, se recomienda la utilización de los siguientes equipos:

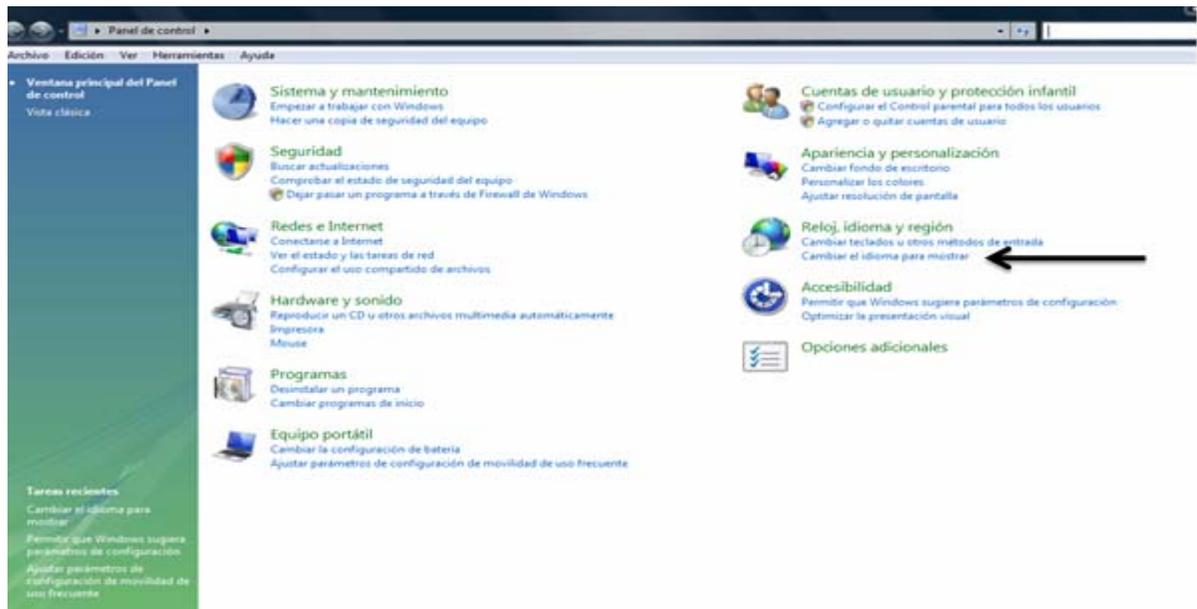
- Un procesador superior a Intel Core 2 Duo.
- 32 MB de RAM.
- Tarjeta gráfica de 16 bits. 1 MB de RAM (64000 Colores, resolución 800×600).

El rendimiento de ARIETE 3.0 mejorara con un CPU más rápida, con más RAM y con un disco duro de mayor capacidad y de mayor rapidez.

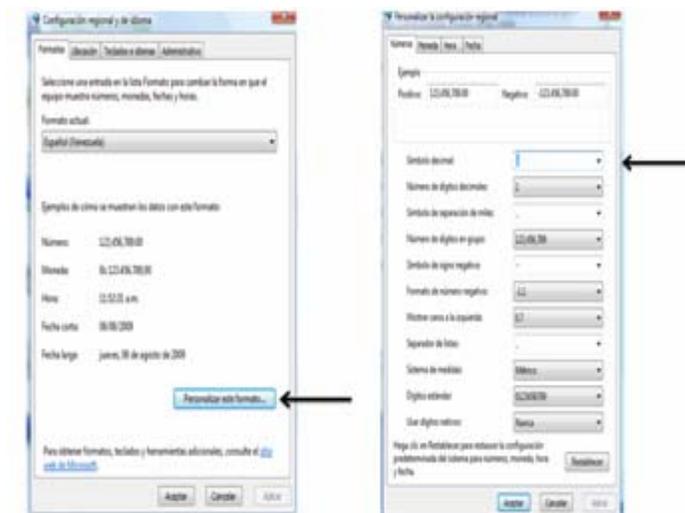
Para el funcionamiento correcto del programa se debe tener la Configuración Regional y de Idioma, que se encuentra ubicada en el Panel de Control del Menú de Inicio de Windows tal como lo indican las Figs. 4.1, 4.2 y 4.3:



**Figura 4.1** Menú de Inicio.



**Figura 4.2** Ventana Panel de Control.



**Figura 4.3** Configuración Regional y de Idioma.

Este programa reconoce el (.) como símbolo decimal y la (,) como miles por lo cual debe tenerse cuidado cuando se use otro programa o entorno diferente.

## 4.2 Ejecución del Programa

La ejecución del programa puede llevarse a cabo desde cualquier carpeta, esto por tratarse de un programa en versión ejecutable.

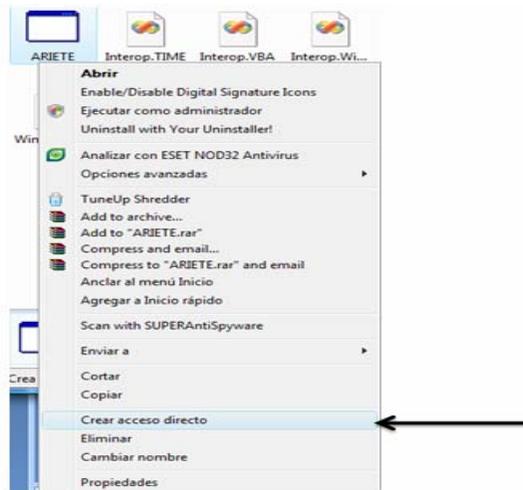
### 4.2.1 Pasos para la ejecución del programa

1) Se abre la carpeta del programa ARIETE dentro de la cual se encuentra una carpeta con el nombre “bin” la cual contiene la única carpeta de nombre “Debug” la cual contiene el ejecutable que da paso al programa.



**Figura 4.4** Archivo Ejecutable.

2) Para crear un acceso directo basta con ubicar el cursor del ratón sobre el archivo ejecutable y presionando click derecho, donde se seleccionara de la ventana de opciones la que hace mención sobre “Crear un acceso directo” y al hacer click sobre la opción se creara el acceso directo, el cual podrá ser cortado y pegado en el escritorio para su uso.

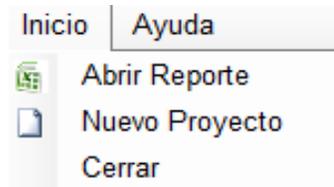


**Figura 4.5** Acceso directo.

## 4.3 Pantallas para los Cálculos

### 4.3.1 Barra de menú

#### 4.3.1.1 Inicio

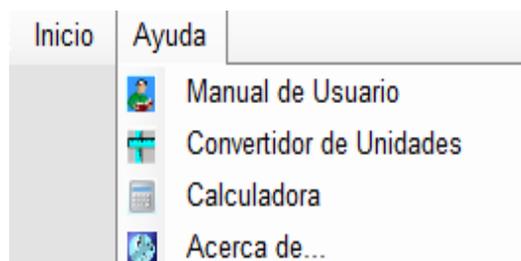


**Figura 4.6** Menú Inicio.

- Abrir Reporte: Permite abrir todos los reportes de las simulaciones guardadas en archivos Excel.
- Nuevo Proyecto: Permite crear nuevas simulaciones o nuevos proyectos con este programa, al hacer click en este menú se desplegara la pantalla de cálculo para iniciar un nuevo proyecto.
- Cerrar: Cierra todo el programa.

#### 4.3.1.2 Ayuda

El menú de ayudas de ARIETE 3.0 contiene toda la información del manual de usuario para su uso en pantalla. Puede acceder a dicha ayuda por medio de los botones de Ayuda que aparecen en la mayoría de las ventanas de la aplicación.



**Figura 4.7** Menú Ayuda.

- Manual de Usuario: Permite abrir un archivo Pdf donde se encuentra toda la información contenida sobre el uso de este programa.
- Convertidor de Unidades: Permite desplegar un convertidor de unidades universal que permite al usuario llevar toda la Data a un mismo sistema de unidades.
- Calculadora: Permite desplegar una calculadora de unidades universal que permite al usuario hacer todas las operaciones que tenga que realizar sin salir de la aplicación.
- Acerca de: Permite abrir una venta donde se da información básica del programa.

#### 4.3.2 Pantalla ingreso de datos iniciales

La pantalla que muestra la Figura 4.8 hace referencia a los datos que se deben introducir para iniciar un proyecto. Cada punto señalado se define a continuación.

The screenshot shows the 'Ariete' software interface for initial data entry. The window is titled 'Ariete' and has a menu bar with 'Inicio' and 'Ayuda'. The interface is divided into several sections:

- Sistema de Unidades:** A dropdown menu labeled '1'.
- Condición de la Tubería:** A dropdown menu labeled '2'.
- Datos del Fluido:** A section containing five input fields:
  - Densidad del Fluido: 17 → [ ]
  - Coefficiente de Fricción: 18 → [ ]
  - Peso Específico: 19 → [ ]
  - Aceleración de Gravedad: 20 → [ ]
  - Modulo de Compresibilidad: 21 → [ ]
- Datos de la Tubería:** A section containing seven input fields and one dropdown menu:
  - Tipo de Restricción de la Tubería: 8 → [ ]
  - Presión de Diseño: 9 → [ ]
  - Diametro de la Tubería: 10 → [ ]
  - Longitud de la Tubería: 11 → [ ]
  - Modulo de Elasticidad: 12 → [ ]
  - Espesor de la Tubería: 13 → [ ]
  - Modulo de Poisson: 14 → [ ]
  - C1: 15 → [ ]
  - Número de Nodos: 16 → [ ]
- Datos del Sistema:** A section containing four input fields and two dropdown menus:
  - Tipo de Sistema: 22 → [ ]
  - Tipo de Fricción: 23 → [ ]
  - Rugosidad: 26 → [ ]
  - Viscosidad Cinemática: 27 → [ ]

Buttons for 'Datos Sumidero-Válvula' (24) and 'Datos Bomba-Válvula' (25) are also present. A 'Calcular' button (28) is located at the bottom right. The status bar at the bottom right shows the date and time: '06/12/2009 10:27:19 p.m.'

**Figura 4.8** Pantalla para el Ingreso de los Datos Iniciales.

1. Despliega una lista con dos opciones para elegir el sistema de unidades (Sistema Internacional y Sistema Inglés) al elegir cualquiera de estas dos opciones, los valores a introducir en cada campo deben estar estrictamente en el sistema seleccionado ya que los campos no hacen conversiones a las unidades que se quieren, para esto es que el programa tiene el convertidor de unidades para llevar toda la Data de los proyectos a ejecutar a un solo sistema de unidades.
2. Despliega una lista con dos opciones (Pared Gruesa y Pared delgada) este campo define los casos a estudiar o es decir que tipos de esfuerzos se van a tomar en consideración en el análisis de la tubería.
3. Dependiendo del tipo de opción que se elija en el punto 2 esta estará disponible si se elige la opción de pared delgada, ya que si se elige pared gruesa no se podrá usar estará bloqueada, este campo sirve para determinar qué tipos de esfuerzos y deformaciones se tomaran en cuenta para el cálculo de la constante de restricción de la tubería.
4. Dependiendo del tipo de opción que se elija en el punto 2 esta estará disponible si se elige la opción de pared delgada, ya que si se elige pared gruesa no se podrá usar estará bloqueada, este campo sirve para determinar qué tipos de esfuerzos y deformaciones se tomaran en cuenta para el cálculo de la constante de restricción de la tubería.
5. Dependiendo del tipo de opción que se elija en el punto 2 esta estará disponible si se elige la opción de pared delgada, ya que si se elige pared gruesa no se podrá usar estará bloqueada, este campo sirve para determinar qué tipos de esfuerzos y deformaciones se tomaran en cuenta para el cálculo de la constante de restricción de la tubería.
6. Dependiendo del tipo de opción que se elija en el punto 2 esta estará disponible si se elige la opción de pared delgada, ya que si se elige pared gruesa no se podrá usar estará bloqueada, este campo sirve para determinar qué tipos de esfuerzos y deformaciones se tomaran en cuenta para el cálculo de la constante de restricción de la tubería.

7. Dependiendo del tipo de opción que se elija en el punto 2 esta estará disponible si se elige la opción de pared gruesa, ya que si se elige pared delgada no se podrá usar estará bloqueada, este campo sirve para determinar qué tipos de esfuerzos y deformaciones se tomaran en cuenta para el cálculo de la constante de restricción de la tubería.
8. Despliega una lista con tres opciones (Tubería Anclada en Voladizo, Tubería Anclada en Ambos Extremos sin Junta de Expansión, Tubería Anclada en Ambos Extremos con Junta de Expansión) al elegir cualquiera de estas tres opciones se activaran las ecuaciones para el cálculo de “C1” constante de restricción de la tubería.
9. Ingreso del valor de la Presión de diseño de la tubería por teclado.
10. Ingreso del valor del Diámetro de la Tubería por teclado.
11. Ingreso del valor de la Longitud de la Tubería por teclado.
12. Ingreso del valor del Modulo de Elasticidad por teclado.
13. Ingreso del valor del Espesor de la Tubería por teclado.
14. Ingreso del valor del Modulo de Poisson por teclado.
15. El valor de C1 se carga automáticamente al elegir alguna de las opciones de (2) y cargar los valores de (8,10, 13, 14).
16. Cargar el valor del Número de Nodos en que se quiere partir la tubería por teclado.
17. Ingreso del valor de la Densidad del Fluido por teclado.
18. Ingreso del valor del Coeficiente de Fricción por teclado.
19. Ingreso del valor del Peso Específico por teclado.
20. Ingreso del valor de la Aceleración de Gravedad por teclado.
21. Ingreso del valor del Modulo de Compresibilidad por teclado.
22. Despliega una lista con dos Opciones (Sistema Sumidero-Tubería-Válvula, Sistema Bomba-Tubería-Válvula). Si se elige “Sistema Sumidero-Tubería-Válvula” se activara el botón con su nombre si no se elige y se elige “Sistema Bomba-Tubería-Válvula” entonces se activara el botón con este nombre. Es de hacer notar que al definir el tipo de sistema por simulación se estudia un solo tipo de sistema y no los

dos en conjunto si quiere evaluar los resultados con dos sistemas distintos deben crear dos proyectos variando los sistemas.

23. Si en (22) se elige la opción “Sistema Sumidero-Tubería-Válvula” se activa este botón () sino se elige permanecería bloqueado. Al activarse este botón, al seleccionarlo se activaría la siguiente ventana para cargar los datos del sumidero y la válvula, cada punto señalado se define a continuación:

The screenshot shows a software window titled 'Ariete' with the following fields and controls:

- Altura del Sumidero:** An input field with callout 23.1.
- Tiempo de Cierre:** An input field with callout 23.2.
- N° Total de Coeficiente de Gasto:** An input field with callout 23.3.
- Checkmark Button:** A green checkmark icon in a box with callout 23.4.
- K-coefficient Grid:** A 5x4 grid of input fields labeled K1 through K20.
- Footer:** Text that reads "Para Valores de K=0 o K muy Elevados Válvula Cerrada".
- Aceptar:** A button at the bottom with callout 23.5.

**Figura 4.9** Pantalla para ingresar los datos del sistema Sumidero- Tubería- Válvula.

23.1 Ingreso del valor de Altura del Sumidero por teclado.

23.2 Ingreso del valor del Tiempo de Cierre por teclado.

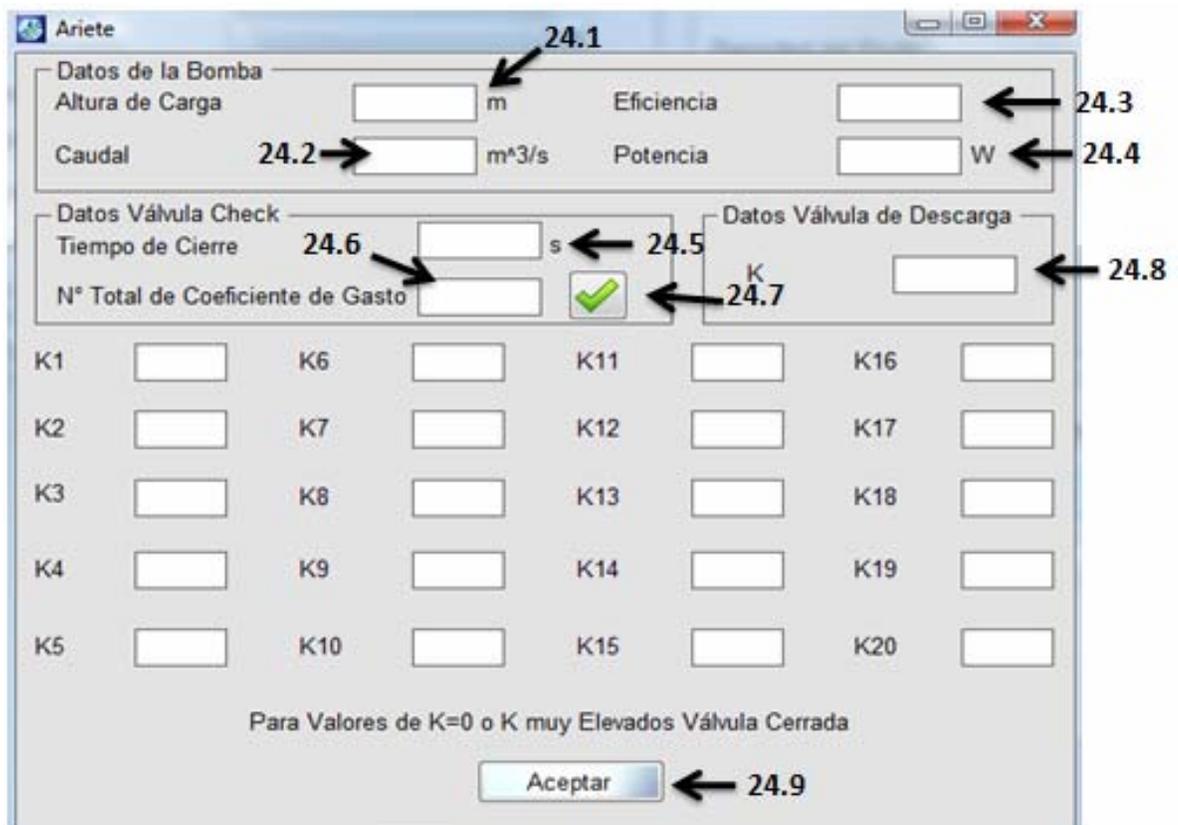
23.3 Ingreso del valor del Número de coeficiente de gasto de la Válvula por teclado. Este debe ser un valor entero ya que este valor define de qué manera se cierra la válvula.

23.4 Botón() de ejecución que depende del N° Total de Coeficiente de Gasto (23.3) al hacer click en este botón se mostraran los campos de K , dependiendo del valor que se introduzca en el campo de N° Total de Coeficiente de Gasto. Los valores

de K al cargarse esta pantalla permanecen ocultos pero al cargarse el valor del coeficiente de gasto dependiendo del número que se introduzca y al hacer click en este botón (  ) se desplegarán los distintos campos para introducir K.

23.5 Al hacer click en este botón se cerrará esta pantalla y se cargarán todos los valores introducidos en sus campos.

24. Si en (22) se elige la opción “Sistema Bomba-Tubería-Válvula” se activa este botón (  ) sino permanecería bloqueado. Al activarse este botón, al seleccionarlo se activaría la siguiente ventana para cargar los datos de la bomba y la válvula check, cada punto señalado se define a continuación:



The screenshot shows a software window titled "Ariete" with the following fields and annotations:

- Datos de la Bomba:**
  - Altura de Carga:  m (labeled 24.1)
  - Caudal:  m<sup>3</sup>/s (labeled 24.2)
  - Eficiencia:  (labeled 24.3)
  - Potencia:  W (labeled 24.4)
- Datos Válvula Check:**
  - Tiempo de Cierre:  s (labeled 24.6)
  - N° Total de Coeficiente de Gasto:  (labeled 24.5)
- Datos Válvula de Descarga:**
  - K:  (labeled 24.7)
  - (labeled 24.8)
- Grid of K-coefficients:** A 5x4 grid of input fields labeled K1 through K20.
- Footer:** "Para Valores de K=0 o K muy Elevados Válvula Cerrada" and an "Aceptar" button (labeled 24.9).

**Figura 4.10** Pantalla para ingresar los datos del sistema Bomba-Tubería- Válvula.

24.1 Ingreso del valor de Altura de Carga de la Bomba por teclado por teclado.

24.2 Ingreso del valor del Caudal manejado por la bomba por teclado. Este debe ser un valor entero ya que este valor define de qué manera se cierra la válvula.

24.3 Ingreso del valor de la Eficiencia de la Bomba por teclado.

24.4 Ingreso del valor de la Potencia de la Bomba por teclado.

24.5 Ingreso del valor del Tiempo de Cierre de la Válvula por teclado.

24.6 Ingreso del valor del Número de coeficiente de gasto de la Válvula por teclado. Este debe ser un valor entero ya que este valor define de qué manera se cierra la válvula.

24.7 Botón () de ejecución que depende del N° Total de Coeficiente de Gasto (24.6) al hacer click en este botón se mostraran los campos de K , dependiendo del valor que se introduzca en el campo de N° Total de Coeficiente de Gasto. Los valores de K al cargarse esta pantalla permanecen ocultos pero al cargarse el valor del coeficiente de gasto dependiendo del número que se introduzca y al hacer click en este botón () se desplegaran los distintos campos para introducir K.

24.8 Ingreso del valor de coeficiente de pérdidas de la válvula de descarga K por teclado.

24.9 Al hacer click en este botón se cerrara esta pantalla y se cargaran todos los valores introducidos en sus campos.

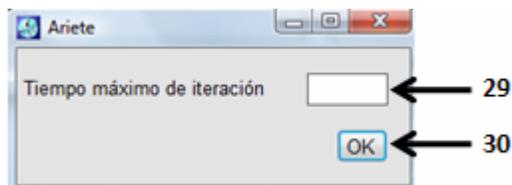
25. Despliega una lista con dos Opciones para escoger el tipo de Coeficiente de fricción (Fricción Constante y Fricción Variable).

26. Ingreso del valor de la Rugosidad por teclado. Este campo estará visible si se elige en el campo de tipo de Fricción la opción de “Fricción Variable” ya que el valor de la Rugosidad se necesita para el cálculo del Número de Reynolds, si se elige la opción de “Fricción Constante” este campo no estará visible ya que se usara el Coeficiente de Fricción que se ingresa por teclado en el paso (18).

27. Ingreso del valor de la Viscosidad Cinemática por teclado. Este campo estará visible si se elige en el campo de Tipo de Fricción la opción de “Fricción Variable” ya que el valor de la Rugosidad se necesita para el cálculo del Número de Reynolds,

si se elige la opción de “Fricción Constante” este campo no estará visible ya que se usara el Coeficiente de Fricción que se ingresa por teclado en el paso (18).

28. Botón Siguiente () , Al hacer click en este botón el revisara todos los campos de ingreso de datos y verificara si hay alguno vacío y le ordenara llenarlo, si no hay ningún campo vacío, este botón mostrara la siguiente pantalla.



**Figura 4.11** Pantalla para ingresar el tiempo máximo de Iteración.

29. Ingreso del valor del tiempo máximo de iteración por teclado.

30. Botón () , al hacer click en este botón verifica que el campo de tiempo máximo de iteración no esté vacío y realiza todos los cálculos necesarios para la representación del fenómeno de golpe de ariete.

### 4.3.3 Pantalla de muestra de resultados

La pantalla que muestra la Figura 4.12 hace referencia a los resultados que arroja el programa. Cada punto señalado se define a continuación.

Tiempo	CV	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0.022884711...	13.5	34.34	34.2	34.07	33.93	33.8	33.66	33.53
0.0103	0.020272347...	13.5	34.34	34.2	34.07	33.93	33.8	33.66	33.53
0.0206	0.017659983...	13.5	34.29	34.16	34.02	33.89	33.75	33.62	33.48
0.0309	0.015047619...	13.5	34.29	34.16	34.02	33.89	33.75	33.62	33.49
0.0412	0.012435255...	13.5	34.25	34.11	33.98	33.84	33.71	33.58	33.44
0.0515	0.009822892...	13.5	34.11	33.98	33.84	33.71	33.58	33.44	33.31
0.0618	0.007437046...	13.5	33.93	33.8	33.66	33.53	33.4	33.27	33.13
0.0721	0.006120867...	13.5	33.7	33.57	33.44	33.31	33.18	33.04	32.91
0.0824	0.004804689...	13.5	33.25	33.12	32.99	32.86	32.73	32.6	32.47
0.0927	0.003488511...	13.5	32.3	32.18	32.05	31.92	31.8	31.67	31.54
0.103	0.002172333...	13.5	29.36	29.25	29.13	29.02	28.9	28.78	28.67
0.1133	0.000856154...	13.5	13.84	13.78	13.72	13.65	13.59	13.52	13.46

Velocidad de la Onda (a) 337.31 m/s

2 → Atras    3 → Graficar    4 →

11/12/2009 10:27:35 a.m.

**Figura 4.12** Pantalla para la muestra de resultados.

#### 4.3.3.1 Barra de Menú

##### ➤ Guardar.

Al hacer click en el menú guardar se guardarán todos los resultados arrojados por el reporte en un archivo de Excel, esta operación suele tardar varios segundos pero es muy útil ya que permite tener los resultados para visualizarlos posteriormente sin hacer nuevas simulaciones.

#### 4.3.3.2 Descripción de ítems mostrados en la pantalla de resultados

1. Tabla donde se muestran todos los resultados de las cargas de presiones, tiempo en que se produce el transitorio y gasto de la válvula en cada nodo.
2. Al hacer click en el botón (  ), se cierra la pantalla que muestra los resultados y muestra la pantalla para el ingreso de datos.

3. Al hacer click en botón () , se muestra una herramienta para hacer el gráfico de la carga de presión con respecto al tiempo en cada nodo.
4. Al hacer click en la barra () , se muestran todos los nodos que pueden ser graficados.

---

***CAPÍTULO 5***

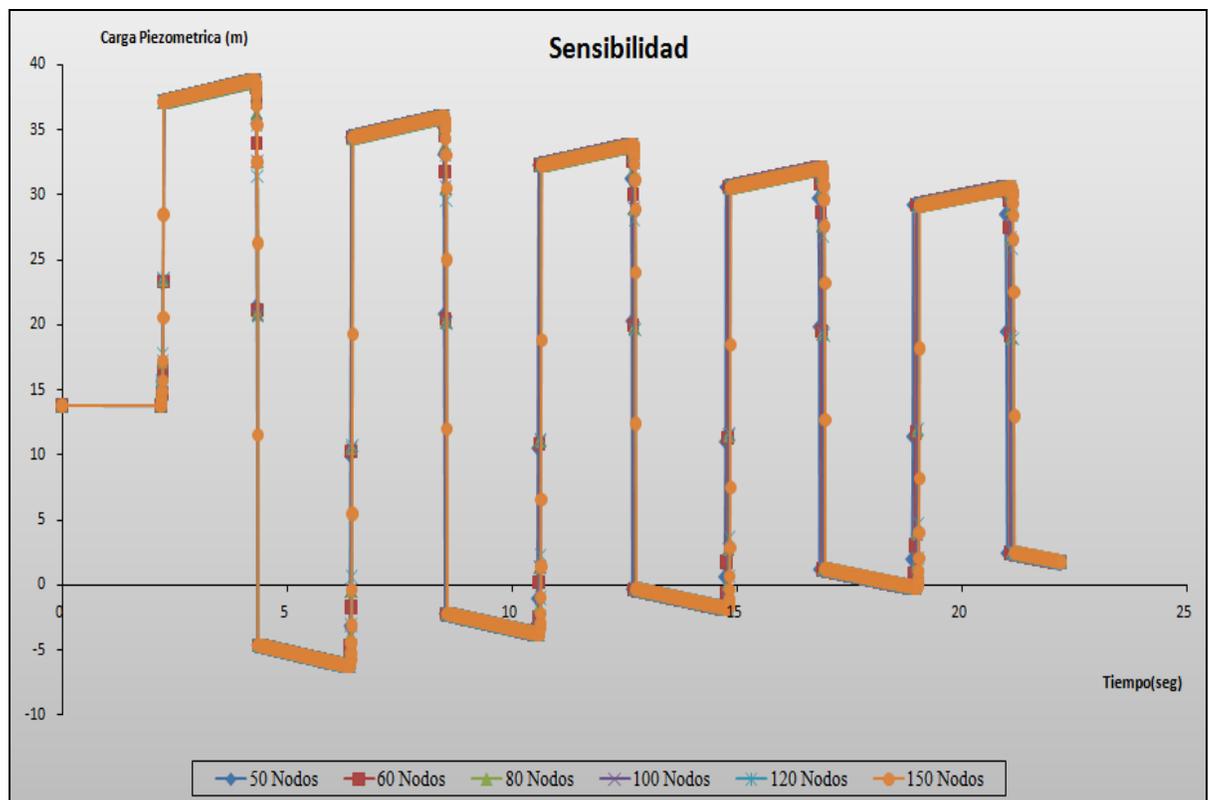
**DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

## 5- DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 5.1 Sensibilidad del programa

Previo a la validación del software, se realizó un estudio de sensibilidad para determinar la mínima cantidad de nodos necesarios para que el programa converja con resultados confiables.

La Fig. 5.1 muestra el análisis de sensibilidad y la convergencia del programa; con esta Fig. 5.1 se determina, que a partir de 80 nodos los resultados se asemejan, para lo cual es innecesario el uso de una cantidad nodal mayor; lo cual implicaría mayor uso de memoria y tiempo, sin mejora en los resultados arrojados por el programa.



**Figura 5.1** Análisis de Sensibilidad.

## 5.2 Validación

En esta sección se exponen los datos usados por cada investigador y por Inelectra en su experimento, así como también los resultados obtenidos por cada uno de ellos y por la simulación.

- Modelo Brunone

Descripción: El equipo está instalado en el Laboratorio de Ingeniería del Agua en el Departamento de Civil e Ingeniería de la Universidad de Perugia en Italia. El sistema consta aguas arriba de un envase de aire a presión (Air Vessel), de una larga tubería arrollada en espiral por razones de espacio, con un radio de curvatura de 1,5m para minimizar las pérdidas secundarias por curvatura, y de una válvula de bola en el extremo usada para crear las acciones controladas de apertura y cierre. En las figuras y fotos del Apéndice D se muestran las vistas del laboratorio y del aparato usado. El investigador usa dos sitios de medición: Uno ubicado a 24 m del envase de aire y el otro a pie de válvula ubicada a 352 m del mismo envase; usando dos valores diferentes de caudal. Otras características importantes del modelo y que se usaran en la simulación se indican a continuación:

- Fluido =	Agua
- Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) =	1000
- Longitud de la tubería (m) =	352
- Diámetro interno (m) =	0.0983
- Espesor de la tubería (m) =	0.0081
- Altura del reservorio (m) =	13.5
- Material de la tubería =	Polietileno
- Modulo de Compresibilidad (Pa) =	2140000000
- Modulo de Elasticidad (Pa) =	1400000000
- Modulo de Poisson =	0.34
- Tiempo de cierre de la válvula (seg) =	0.06
- Caudal (L/s) =	4.93

- Modelo Pezzinga

Descripción: El equipo está instalado en el Laboratorio del Instituto de Hidráulica, Hidrología y manejo de Agua de la Universidad de Catania en Italia. El sistema consta de una red de tuberías alimentada por una electro-bomba centrífuga, un tanque de presión  $1 \text{ m}^3$  localizado aguas abajo y una válvula de bola para las operaciones de apertura y cierre manual al final de la red. Las mediciones de caudal se realizan con un medidor de flujo electromagnético. El investigador usa dos sitios de medición: uno ubicado a pie de válvula y el otro ubicado a la mitad de la longitud del sistema. Otras características importantes del modelo y que se usaran en la simulación se indican a continuación:

- Fluido =	Agua
- Densidad ( $\text{kg/m}^3$ ) =	1000
- Longitud de la tubería (m) =	143.7
- Diámetro interno (m) =	0.0532
- Espesor de la tubería (m) =	0.00335
- Altura del reservorio (m) =	0.35
- Material de la tubería =	Zinc-Plated Steel DN50
- Modulo de Compresibilidad (Pa) =	2140000000
- Modulo de Elasticidad (Pa) =	206000000000
- Modulo de Poisson =	0.3
- Tiempo de cierre de la válvula (seg) =	0.04
- Caudal (L/s) =	0.642

- Modelo Inelectra:

Descripción: Estas instalaciones están ubicadas en el Complejo Criogénico de José, este proyecto se llama “Incremento de Capacidad de Almacenamiento y Embarque Refinación Oriente (INCAERO)”, el cual consiste en la implantación de la infraestructura, sobre superficie terrestre, necesaria para el incremento de la

capacidad de embarque en el Terminal de Almacenamiento y Embarque José Antonio Anzoátegui, mediante la instalación de bombas, mezclador, trampas de envío y recibo de herramientas de limpieza e inspección, así como tuberías y válvulas asociadas. Este sistema consta de una red de tuberías alimentada por cinco bombas centrifugas, cuatro bombas en operación y una de repuesto. El crudo será conducido hacia la monoboya a través de dos líneas, estas constan de un tramo de Ø36" (longitud 500 m) desde el cabezal de las bombas hasta las trampas de envío, otro tramo de Ø42", longitud 1000 m. Las instalaciones marinas y submarinas (mangueras) no forman parte del alcance del estudio, a pesar de que el estudio de golpe de ariete considera estas instalaciones como parte de longitud total de la conducción.

Se validara el caso de Cierre de válvulas XSV04040 de emergencia en tierra y el caso de parada de bombas para toda la longitud de conducción que se muestra en la Fig. 5.2. Este proyecto como se encuentra en fase de Ingeniería Básica no cuenta con la hoja de datos de la válvula con la cual se validara el caso de cierre de válvulas y por recomendación de la disciplina procesos se determinó que es una válvula de bola la cual está ubicada aguas abajo, otras características importantes que se usaran en la simulación se indican a continuación:

- Presión de operación (psi) = 1785.553 (ASME B31.4)
- Líquido Transportado = Crudo Merey
- Caudal (BPH) = 60000
- Caudal ( $m^3/s$ ) = 2.65
- Caudal en las mangueras (BPH) = 30000
- Presión de Succión (psig) = - 11
- Presión de Descarga (psig) = 452
- Presión de shutt off (psig) = 621

- Temperatura de Operación (°F) = 80
- Temperatura de Diseño (°F) = 150
- Grav. Específica (sg) a 80 °F = 0.96
- Grado API a 80 °F = 16
- Densidad ( $\rho_l$ ) (lb/ft<sup>3</sup>) = 59.904
- Modulo de Compresibilidad 260896.348 psi 1.80E+09 Pa
- Aceleración de Gravedad (m/s<sup>2</sup>) = 9.81
- Cabezal de la Bomba (m) 319.15

Caso cierre de válvulas:

- Tiempo de cierre de válvula: 4.14seg

La tubería consta de dos secciones las cuales se muestran a continuación:

✓ Sección 1:

- Tuberías y accesorios de Acero al Carbono, clase 300 API 5L GR X52.
- Longitud (m) = 500
- Diámetro externo (pulg) = 36
- Espesor (pulg) = 0.75
- Modulo de Poisson = 0.3
- Modulo de Elasticidad (Pa) = 207000000000

✓ Sección 2:

- Tuberías y accesorios de Acero al Carbono, clase 300 API 5L GR X52.
- Longitud (m) = 1000
- Diámetro externo (pulg) = 42

- Espesor (pulg) = 0.75
- Modulo de Poisson = 0.3
- Modulo de Elasticidad (Pa) = 207000000000

#### Caso Parada de Bombas:

- Longitud de la tubería= 10397.2 m (Caso 4)
- Tiempo de cierre de válvula= 11.79 seg (Caso 4)

La tubería consta de 8 secciones, la sección 1 y 2 que se presentan en el caso de cierre de válvulas se incluyen en este estudio.

#### ✓ Sección 3:

- Tuberías y accesorios de Acero al Carbono, clase 600 API 5L GR X65.
- Longitud (m) = 8565
- Diámetro externo (pulg) = 42
- Espesor (pulg) = 0.75
- Modulo de Poisson = 0.3
- Modulo de Elasticidad (Pa) = 207000000000

#### ✓ Sección 4:

- Mangueras de neopreno.
- Longitud (m) = 35
- Diámetro externo (pulg) = 24
- Espesor (pulg) = 0.75
- Modulo de Poisson = 0.48
- Modulo de Elasticidad (Pa) = 3000000000

#### ✓ Sección 5:

- Mangueras de neopreno.
- Longitud (m) = 256

- Diámetro externo (pulg) = 24
- Espesor (pulg) = 0.75
- Modulo de Poisson = 0.48
- Modulo de Elasticidad (Pa) = 3000000000

✓ Sección 6:

- Mangueras de neopreno.
- Longitud (m) = 10.66
- Diámetro externo (pulg) = 24/16
- Espesor (pulg) = 0.75
- Modulo de Poisson = 0.48
- Modulo de Elasticidad (Pa) = 3000000000

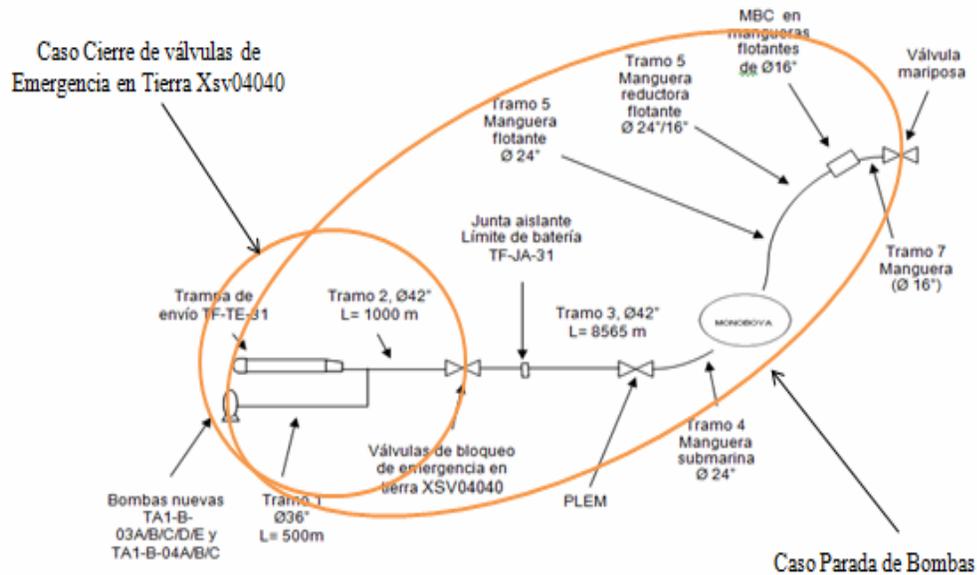
✓ Sección 7:

- Mangueras de neopreno.
- Longitud (m) = 32
- Diámetro externo (pulg) = 16
- Espesor (pulg) = 0.75
- Modulo de Poisson = 0.48
- Modulo de Elasticidad (Pa) = 3000000000

✓ Sección 8:

- Mangueras de neopreno.
- Longitud (m) = 10.66
- Diámetro externo (pulg) = 16
- Espesor (pulg) = 0.75
- Modulo de Poisson = 0.48

- Modulo de Elasticidad (Pa) 3000000000



**Figura 5.2** Sistema estudiado para la validación del modelo Inelectra.

### Modelo Obtenido

El modelo obtenido está conformado por dos sistemas, uno de un reservorio, una tubería y una válvula y otro sistema conformado por una bomba, una tubería y una válvula. Puesto que los sistemas difieren a los usados por los investigadores y por Inelectra, hubo la necesidad de ajustar los datos de cada experimento mediante el uso de la ecuación de Bernoulli generalizada, para así obtener la carga piezométrica para cada modelo. Las características de cada modelo se usaron para correr el software y validar el modelo obtenido.

El modelo Brunone, Pezzinga y el Modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas, se simularon escogiendo en el software Ariete el sistema Reservorio –

Tubería- Válvula ya que se quería estudiar el golpe de Ariete debido al cierre de válvulas.

El caso de parada de bombas del Modelo Inelectra se simulo escogiendo en el software Ariete el sistema Bomba-Tubería-Válvula.

### **5.2.1 Resultados**

El modelo obtenido estudia cinco casos diferentes denominados:

Caso (0). Condición de espesor, esfuerzos y deformaciones radiales y axiales despreciables.

Caso (I). Condición de espesor, esfuerzo y deformación radial despreciables.

Caso (II). Condición de esfuerzos y deformaciones radiales despreciables.

Caso (III). Condición de esfuerzos radiales despreciables.

Caso (IV). Condición de pared gruesa considerando espesor, esfuerzos y deformaciones radiales, axiales y tangenciales.

El Caso (IV) es el más general y puede demostrarse que contiene los otros casos. Se pueden combinar los casos con los tres tipos de restricciones estudiadas denominadas:

Tipo (1). Tubería anclada en voladizo.

Tipo (2). Tubería anclada en ambos extremos sin junta de expansión.

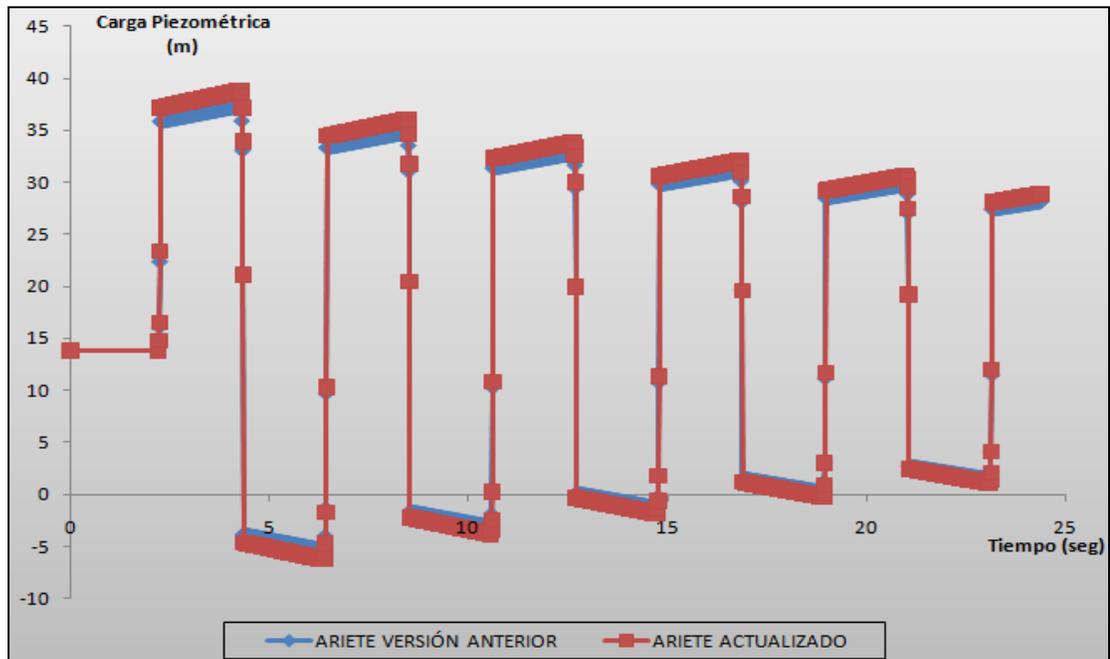
Tipo (3). Tubería anclada en ambos extremos con junta de expansión.

La combinación de los casos con los tipos de restricciones permitirá obtener soluciones para quince combinaciones diferentes las cuales son aplicables a los sistemas Reservorio-Tubería-Válvula y Bomba-Tubería-Válvula, cuyas diferencias estriban en el valor de  $C_1$  y por ende en diferentes valores para la ecuación de la onda, que como se demostrara más adelante es el parámetro mas importante en la ocurrencia del fenómeno.

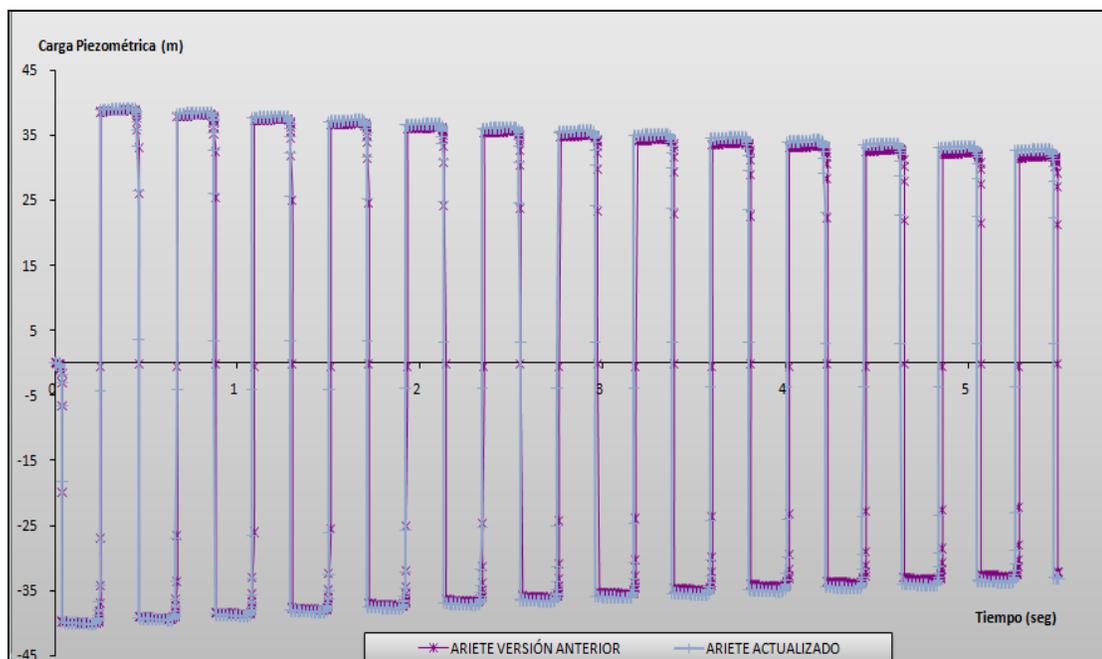
Con base en la lectura de los trabajos realizados, el modelo desarrollado por Inelectra y el trabajo realizado por Ayala [5], se concluye que el caso IV de pared gruesa con el tipo de tubería anclada en ambos extremos es el más general y contiene los casos anteriores, debido a que se considera en el estudio los esfuerzos radiales, axiales y tangenciales como también las deformaciones radiales, que las ecuaciones tradicionales que estudian el fenómeno solo consideran en su mayoría los esfuerzos axiales y algunos tangenciales.. Es por esto que todas las simulaciones de validación del software ARIETE se realizaron tomando esta hipótesis.

El modelo obtenido se comparó con el modelo Brunone de mediciones de carga de presión en válvula para un caudal de 4,93 L/s, con el modelo Pezzinga para mediciones de caudal en válvula para un caudal de 0,642 L/s y para el modelo Inelectra se determinó la mayor carga de presión que se produce en el sistema, para el caso de cierre de válvulas, Inelectra calcula una sobrepresión y asume que esta sobrepresión se distribuye de manera constante en toda la longitud de la tubería, con el software ariete se medirán las sobrepresiones en válvula y así compararla con esta presión obtenida por Inelectra. Para el caso de parada de bombas, Inelectra calcula una longitud crítica de la tubería y en esta longitud calculan la sobrepresión, con el software ariete se realiza la medición de presión en el punto donde se encuentra esta longitud crítica.

En las Fig. 5.3 y 5.4 se observa la respuesta obtenida con el software Ariete con los datos del modelo Brunone y del modelo Pezzinga. Las Fig. 5.3 y 5.4 muestran que los resultados arrojados de las simulaciones con el software Ariete arrojaron resultados semejantes, con los mismos periodos y ciclos lo cual arroja que la mejora realizada es confiable debido a que no hay diferencia en los resultados.



**Figura 5.3** Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Brunone.



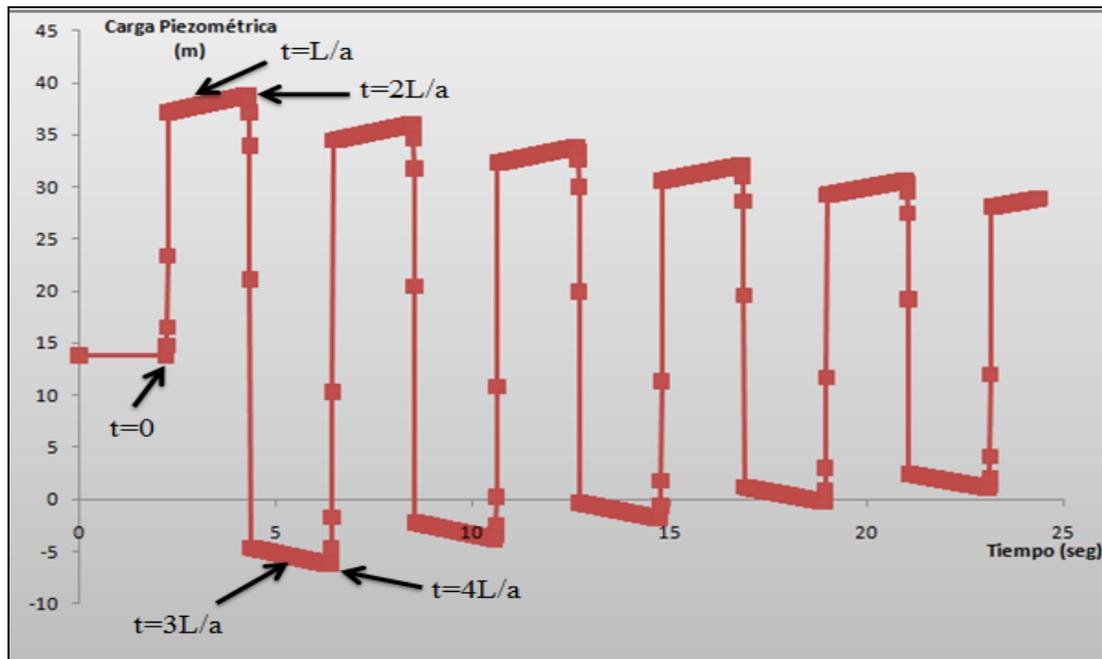
**Figura 5.4** Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Pezzinga.

En las Figs. 5.3 y 5.4 se muestra que las ondas de presión cumplen con las relaciones de la secuencia de eventos, que se presentan después del cierre brusco de una válvula que se expuso en la sección 2.3.1.

En la Fig. 5.3 existe una condición estable hasta los 2,2 seg aproximadamente, y en ese momento es cuando ocurre el cierre súbito de la válvula ( $t=0$ ), para este modelo. Para el modelo Pezzinga (Fig. 5.4), no se aprecia la condición estable, pues solo se muestra la forma de la onda, después del cierre brusco ( $t=0$ ).

Después de cerrarse la válvula la onda viaja hacia el reservorio. Llegando con un tiempo  $L/a$  (3.35 seg, 0.1 seg respectivamente) quedando una fuerza no balanceada en la entrada del tubo la cual, buscando el equilibrio tiende a la presión del depósito y la velocidad cambia repentinamente de dirección. Cuando la onda llega a la válvula en el instante  $2L/a$  (4.41 seg, 0.213 seg respectivamente).

Ahora desde la válvula, la onda viaja hacia el reservorio. Cuando la onda de presión la onda de presión llega al reservorio en el instante  $3L/a$  (5.47 seg, 0.32 seg aproximadamente), ocurre otra vez una condición de desequilibrio, opuesta en magnitud a la que ocurre en el instante  $L/a$ . El equilibrio de fuerzas hará ahora que la onda viaje hacia la válvula, cuando esta llega ocurre en el instante  $4L/a$  (6,53 seg, 0.43 seg). La onda vuelve a comenzar su recorrido hasta estabilizarse el sistema. Este procesos se repite cada  $4L/a$  segundos. (Ver Fig. 5.5)



**Figura 5.5** Indicación de tiempos de ocurrencia de los ciclos.

En la Tabla 5.1 se muestra la velocidad de onda calculada por el modelo obtenido con los datos del modelo Brunone y se compara con la obtenida por este investigador.

**Tabla 5.1** Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Brunone.

Velocidades de Onda (m/s)		
Modelo Obtenido	Software Ariete	Brunone
Caso IV	332.80	332.94

De la Tabla 5.1 se tiene que los valores de la velocidad de la onda del software Ariete y del modelo Brunone son iguales lo cual indica que el investigador uso las mismas hipótesis para el cálculo de  $C_1$ , tomo la tubería anclada en ambos

extremos con junta de expansión y la tubería como pared gruesa. Estos resultados son aceptables.

En la Tabla 5.2 se muestra la velocidad de onda calculada por el software Ariete con los datos del modelo Pezzinga y se compara con la obtenida por este investigador.

**Tabla 5.2** Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Pezzinga.

<b>Velocidades de Onda (m/s)</b>		
<b>Modelo Obtenido</b>	<b>Software Ariete</b>	<b>Pezzinga</b>
<b>Caso IV</b>	<b>1348.67</b>	<b>1354</b>

De la Tabla 5.2 se tiene que los valores de la velocidad de la onda en el modelo obtenido difiere del valor obtenido por Pezzinga en un 4%, esto debido a que el investigador supone el valor de C1 igual a 0.95 y al simular con el software se obtiene un valor de C1 igual a 0.97.

En la tabla 5.3 se muestra la velocidad de onda calculada por el software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas y se compara con la obtenida por Inelectra.

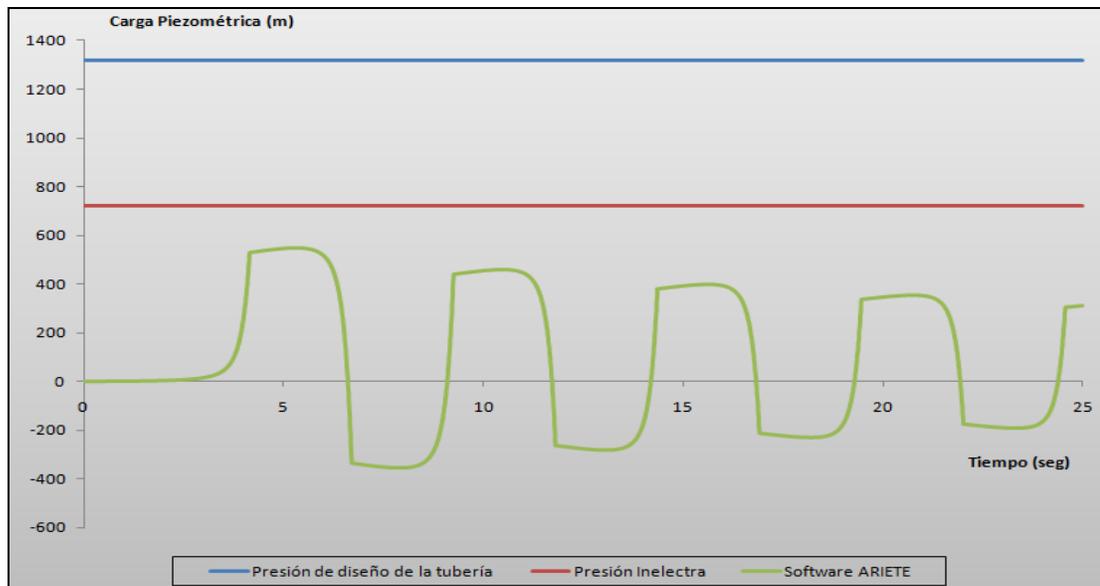
**Tabla 5.3** Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Inelectra Cierre de Válvulas.

<b>Velocidades de Onda (m/s)</b>		
<b>Modelo Obtenido</b>	<b>Software Ariete</b>	<b>INELECTRA</b>
<b>Caso IV</b>	<b>1180.97</b>	<b>1140.39</b>

De la Tabla 5.3 se tiene que los valores de la velocidad de la Onda en el Software Ariete difieren del valor obtenido por Inelectra, esto se debe a que

Inelectra realiza sus cálculos basándose en la teoría del modelo rígido, es decir toma el caso de pared delgada despreciando todos los esfuerzos que se producen en la tubería y el espesor de esta para el cálculo de  $C_1$ , lo que produce un valor subestimado de la velocidad de onda.

En la Fig. 5.6 se muestra la respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas. Es importante recalcar que para realizar esta simulación se debió usar el método de la longitud equivalente, esto debido a que el caso de cierre de válvulas de Inelectra contiene un cambio de diámetro y para poder llevar la longitud de la tubería a estudiar a un solo diámetro se aplico este método. Con el método de la longitud equivalente se llevó la tubería al menor diámetro estudiado, en este caso es de 36 pulgadas, se tomó este diámetro partiendo de la hipótesis de que si se estudia el menor diámetro se puede obtener una mayor sobrepresión que si se simulan diámetros mayores a este.



**Figura 5.6** Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el Caso de cierre de válvulas.

En la Fig. 5.6 se observa la condición estable del sistema hasta los 4 seg aproximadamente y a partir de ese momento se produce el cierre súbito. También se observa que la presión obtenida por el software Ariete es menor a la obtenida por Inelectra lo cual indica que el método que utiliza Inelectra para el cálculo de la presión por golpe de ariete los ayuda a sobredimensionar el cálculo de la sobrepresión, por que utilizan aproximaciones de las ecuaciones reales para el cálculo de golpe de ariete, esta Fig. 5.6 también muestra cómo va variando la presión a medida que va ocurriendo el fenómeno, se puede observar en la línea verde como con el tiempo el sistema va estabilizando, en cambio Inelectra parte de la hipótesis de que esta presión es constante en toda la ocurrencia del fenómeno.

El tiempo de cierre de válvula indicado por Inelectra 4,14 seg, con base a los resultados obtenidos es un tiempo bastante conservador, ya que con el software Ariete se podría hacer un mejor estudio y reducir este tiempo sin generar sobrepresiones que afecten la tubería y sus accesorios.

En la Tabla 5.4 se muestra la velocidad de onda calculada por el software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de parada de bombas y se compara con la obtenida por Inelectra.

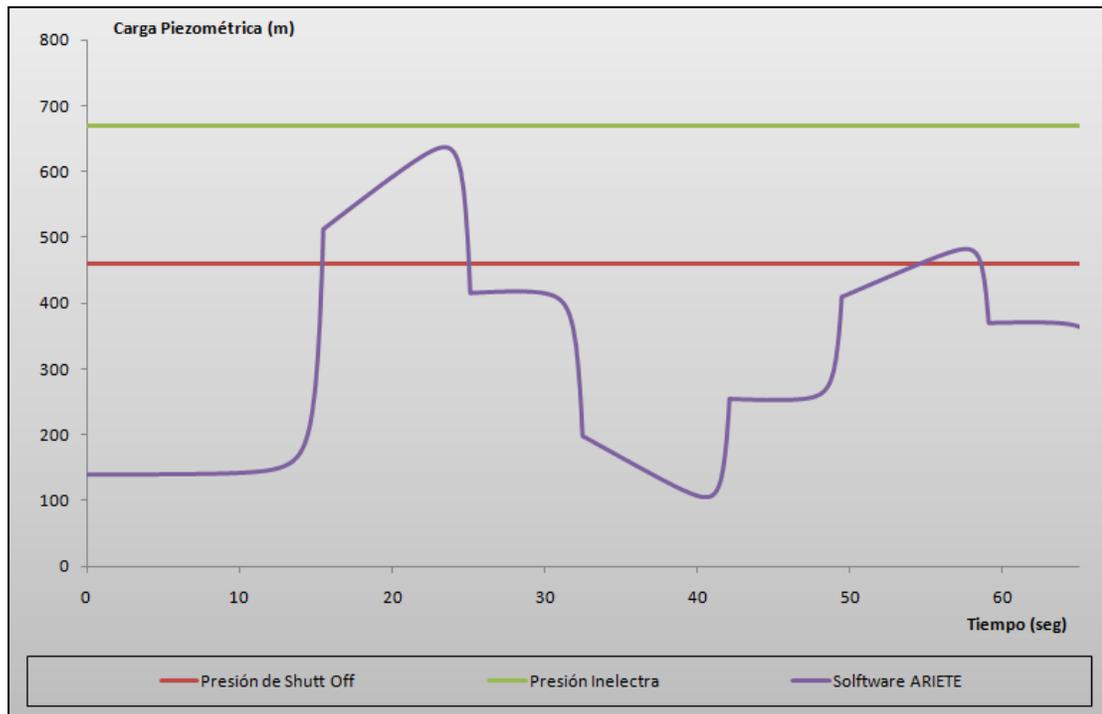
**Tabla 5.4** Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Inelectra Parada de Bombas.

<b>Velocidades de Onda (m/s)</b>		
<b>Modelo Obtenido</b>	<b>Software Ariete</b>	<b>INELECTRA</b>
<b>Caso IV</b>	<b>1180.97</b>	<b>1016.57</b>

De la Tabla 5.4 se tiene que los valores de la velocidad de la Onda en el modelo obtenido difieren del valor obtenido por Inelectra, por las razones de los comentarios de Tabla 5.3, y también a que como el caso de parada de bombas estudia toda la longitud del sistema mostrado en la Fig. 5.2, este sistema posee muchos cambios de diámetros, ya que Inelectra realiza el cálculo de la velocidad de onda para cada sección de la tubería y luego obtiene una velocidad de onda equivalente la cual es la mostrada en la Tabla 5.4.

En la Fig. 5.7 se observa la respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de parada de bombas, el cual es una de las novedades de este trabajo. Es importante recalcar que para realizar esta simulación se debió usar el método de la longitud equivalente, esto debido a que el caso de parada de Bombas contiene varios cambios de diámetros y para poder llevar la longitud de la tubería a estudiar a un solo diámetro se aplicó este método. Con el método de la longitud equivalente se llevó la tubería al menor diámetro estudiado, se tomó el menor diámetro partiendo de la hipótesis de que si se estudia el menor diámetro se puede obtener una mayor sobrepresión que si se simulan diámetros mayores a este.

Para el caso de parada de Bombas, Inelectra a diferencia del caso de cierre de válvulas calcula una Longitud crítica igual a 4415,14m, en la cual obtiene una sobrepresión y esta sobrepresión obtenida es la presión por golpe de ariete en ese punto la cual es la presión mostrada en la Fig. 5.7 con la línea verde. En el software ariete para comparar con la presión obtenida por Inelectra se tomó el nodo ubicado a 4415,14m de la bomba, que es el punto donde Inelectra obtuvo su sobrepresión y esto se muestra en la Fig. 5.7 con la línea morada.



**Figura 5.7** Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de parada de bombas.

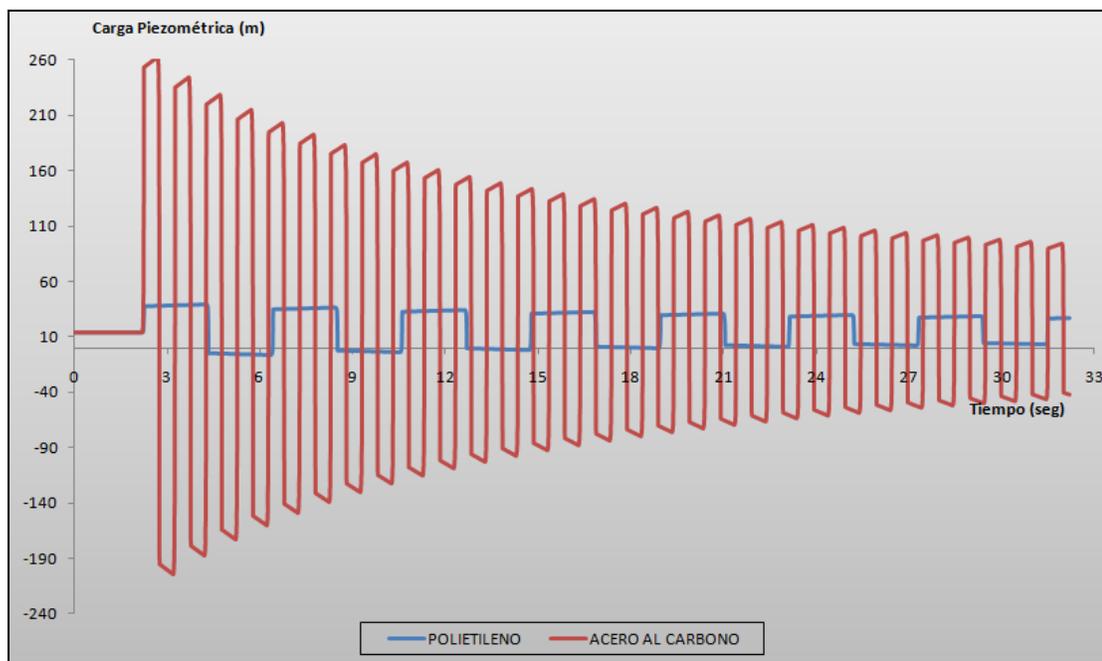
En la Fig. 5.7 se observa la condición estable del sistema hasta los 12 seg aproximadamente y a partir de ese momento se produce el cierre súbito ( $t=0$ ). En esta Fig. 5.7 se observa que la onda no golpetea con tanta frecuencia como en el caso de cierre de válvulas esto debido a que la longitud de la tubería estudiada para este caso es hasta diez (10) veces mayor que la longitud del cierre de válvulas y la onda tiende a atenuarse.

Al igual que los comentarios del Fig. 5.6, se observa en la Fig. 5.7 que la presión obtenida por el software Ariete es menor a la obtenida por Inelectra, aunque estas dos presiones son mayores que la presión de shutt-off de la bomba, lo cual indica que se requiere un sistema de protección para evitar el golpe de ariete por parada de bombas. Aunque también se podría evitar el golpe de ariete por parada de bombas haciendo simulaciones con el software ariete con tiempos de cierre de la

válvula check mayores al indicado por Inelectra para así obtener una generar sobrepresión que no afecte la tubería y sus accesorios.

Con lo observado en la Figs. 5.6 y 5.7, sobre de que en un caso la onda de presión golpetea con más frecuencia que en otro, se realizaron dos simulaciones una con los datos del modelo Brunone cambiando el tipo de material de la tubería y otra con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas variando el fluido. Estas simulaciones se hicieron con la finalidad de verificar como variarían los resultados al cambiar estos parámetros.

En la Fig. 5.8 se observa la respuesta del software Ariete con los datos del modelo Brunone variando el material de la tubería, para esto se uso el poiletileno y acero al carbono.



**Figura 5.8** Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Brunone variando el material de la tubería.

En la Tabla 5.5 se muestra la velocidad de onda calculada por el software Ariete con los datos del modelo Brunone variando el material de la tubería.

**Tabla 5.5** Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Brunone variando el material de la tubería.

<b>Velocidades de Onda (m/s)</b>		
<b>Modelo Obtenido</b>	<b>Acero al carbono</b>	<b>Polietileno</b>
		<b>1378.96</b>

De los resultados que se observan en la Tabla 5.5 se muestra que al usar tubería de Polietileno y tubería de acero al carbono, el orden de magnitud de la velocidad de onda varía un poco de tres veces al usar tubería de acero al carbono a que si se usara tubería de polietileno, y es por esto que el ciclo para una misma longitud de tubería es más rápido y la onda de presión golpea con más frecuencia en la tubería de acero al carbono como se muestra en la Fig. 5.8.

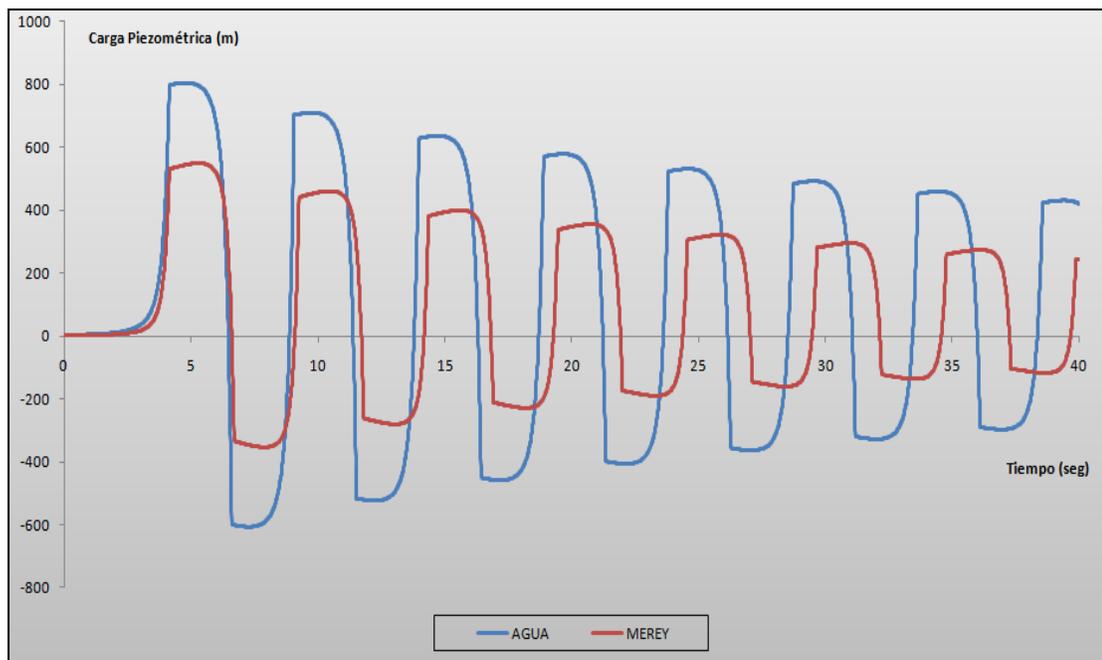
En la Tabla 5.6 se muestra la velocidad de onda calculada por el software Ariete con los datos del modelo Inelectra variando el fluido que contiene la tubería.

**Tabla 5.6** Velocidades de onda del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas variando el fluido.

<b>Velocidades de Onda (m/s)</b>		
<b>Modelo Obtenido</b>	<b>Merey</b>	<b>Agua</b>
		<b>1180.98</b>

En la Tabla 5.6 se observa que el valor de la magnitud de la velocidad onda varía un poco en magnitud si se varía el fluido que pasa por la tubería. En la Fig. 5.9

se observar mejor como esta variación en el valor de velocidad de la onda hace que esta golpetee un poco más rápido a si se usara el crudo Merey. En la Fig. 5.9 también se observa que para el caso de cierre de válvulas de Inelectra si se quiere usar como fluido trabajo agua se debe ser cuidadoso al escoger el tiempo de cierre de la válvula a usar por que las sobrepresiones obtenidas son mayores a si se usa crudo Merey.



**Figura 5.9** Respuesta del software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas variando el fluido.

De todo lo presentado anteriormente se puede inferir que los resultados numéricos arrojados por el software Ariete son aceptables debido a que no presentan mucha diferencia a los obtenidos por los investigadores y a que se obtienen menores sobrepresiones que las obtenidas por Inelectra, esto debido a que se estudian casos más reales por que se toman en cuenta todos los esfuerzos en la tubería.

En el proceso donde se produce la sobrepresión por golpe de ariete, la fricción, el tipo de restricción, longitud de la tubería, modulo de Compresibilidad del líquido y la Elasticidad de la tubería, hacen que la onda se vaya amortiguando de manera progresiva. El modelo obtenido puede presentar un error de amortiguamiento que va aumentando con el tiempo cuando se utiliza el tipo de Fricción Constante, pero cuando se usa la Fricción Variable este error se disminuiría ya que esta depende de la velocidad del fluido que decrece con el tiempo, hasta que el sistema se estabiliza.

El parámetro de mayor importancia en el fenómeno de golpe de Ariete simulado por el modelo obtenido es la velocidad de la onda la cual se obtiene con la Ecuación 2.3 (Sección 2.3.1), con esta ecuación se determina el fenómeno y esta depende del material de la tubería (Modulo de Elasticidad), del fluido que la llena (Modulo de Compresibilidad y Peso específico), de las dimensiones de la tubería (Espesor y Diámetro), y del tipo de restricción de la tubería C1 ( $e/d$ , y modulo de Poisson).

La gran novedad de este trabajo es que el mismo software gráfica sin necesidad de estar exportando los resultados a Excel u otro programa para realizar gráficos, también que la versión anterior del software Ariete tiene dos restricciones 850 iteraciones y 40 seg máximo de ocurrencia del fenómeno y con la mejora el tiempo de ocurrencia del fenómeno se controla por pantalla y no presenta restricción en cuanto al número de iteraciones. El programa es de fácil uso debido a que las pantallas de ingreso de datos son de fácil entendimiento

En el Apéndice A se muestran los resultados obtenidos por Brunone y Pezzinga. En el Apéndice B se muestran los gráficos de todas las simulaciones realizadas con el software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas. En el Apéndice C se muestran los gráficos de las simulaciones realizadas con el software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de parada de bombas. En el Apéndice D se muestra el sistema estudiado por Brunone.

En el Apéndice E se muestra una memoria de cálculo de cómo Inelectra realiza el cálculo de la presión por golpe de Ariete y el cálculo de la longitud equivalente. En el Apéndice F se muestra el listado de subrutinas con que está diseñado el programa Ariete.

---

***CAPITULO 6***

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 6.1 Conclusiones

El programa Ariete abarca todos los aspectos necesarios para el cálculo de la sobrepresión producida por el fenómeno de Golpe de Ariete en una línea de tuberías permitiendo así que el encargado del cálculo de esta sobrepresión en cualquier empresa obtenga buenos resultados.

Han sido muchas las conclusiones que se han podido extraer durante el desarrollo de esta investigación y las más importantes se muestran a continuación:

- El modelo matemático aplicado a un sistema reservorio, tubería y válvula se aplica también a un sistema bomba, tubería válvula aunque con una redefinición de las condiciones de borde y se obtienen todas las variables que son objeto de cálculo en la sobrepresión producida por el golpe de Ariete.
- Todos los modelos estudiados se simularon con el caso IV de pared gruesa por que representa el fenómeno de Golpe de Ariete con buena exactitud por ser el más general.
- El modelo obtenido arroja resultados diferentes a los del modelo Inelectra por que estos usan métodos directos con aproximaciones a las ecuaciones reales a las que representan el golpe de ariete.
- La mejora realizada al software Ariete arroja resultados satisfactorios debido a que no hay diferencia en los resultados en comparación con la versión anterior.
- El modelo obtenido y estudiado permite determinar con buena aproximación el valor del pico máximo de presión, el cual es un factor determinante en el diseño de tuberías, pues evitaría el colapso de la misma debido a la eventualidad de un golpe de Ariete.
- El valor de la celeridad de la onda depende del peso específico del fluido, el modulo de elasticidad de la tubería el modulo de compresibilidad del fluido, de las dimensiones de la tubería, pero también depende gran parte de la distribución de los esfuerzos en la tubería y de la condición de la tubería.

- Con la puesta en uso de Ariete se logro automatizar el cálculo de la sobrepresión producida por el golpe de Ariete, ofreciendo la ventaja de calcular esta sobrepresión en pocos minutos de una manera fácil, rápida y sencilla.
- Se ha encontrado que utilizando Ariete la probabilidad del error humano en el cálculo de golpe de Ariete para cualquiera de los dos sistemas que estudia este software disminuye considerablemente.
- El modelo obtenido permite que el usuario decida cuanto tiempo desea estudiar el fenómeno de golpe de ariete, ya que ingresa este tiempo por pantalla.
- Se logro desarrollar una rutina computacional capaz de formar mediante procesos matemáticos y analíticos las características de dos sistemas específicos, los dos en función de una ecuación de carga de presión en función del caudal.
- En las tuberías de polietileno la frecuencia del choque de la onda de presión es menor que en tuberías de acero para un mismo lapso de tiempo, es por esto que están sometidas a menor fatiga.
- Se elaboro un manual de Usuario para facilitar el uso de esta herramienta computacional.

## 6.2 Recomendaciones

- Realizar diferentes simulaciones con el software Ariete con los datos del modelo Inelectra para el caso de cierre de válvulas con la finalidad de determinar el tiempo al cual se empieza a producir golpe de ariete en la tubería para de ahí tomar un tiempo mayor a este y colocarlo como el tiempo de cierre de la válvulas de emergencia en tierra XSV04040 y este sería el tiempo para que no se produzca golpe de Ariete que es el que interesa en este caso, para así mejorar los parámetros operacionales.
- El caso de cierre de válvulas de Inelectra, si se quiere realizar pruebas hidrostáticas se debe ser cuidadoso con el tiempo de cierre de la válvula.
- Analizar la posibilidad de desarrollar otras alternativas o versiones posteriores de este programa, para adaptar su uso a fluidos bifásico, multifasicos y a realizar el estudio de una red completa de tuberías de diferentes diámetros.
- Realizar diferentes simulaciones con diferentes materiales de la tubería como metales y polímeros, para así estudiar la variación de las hipótesis de pared gruesa y pared delgada y cómo influyen estas en la onda de presión.
- Estudiar el manual de Usuario del software Ariete, para así obtener el máximo provecho de utilización de esta herramienta.
- Desarrollar el software ARIETE 3.0 en un lenguaje de programación libre (JAVA) con la finalidad de que pueda ser ejecutado desde cualquier sistema operativo (WINDOWS o LINUX).

---

***BIBLIOGRAFÍA***

---

**- Textos consultados:**

[1] Márquez, J.; Rodríguez, L. **“Desarrollo una herramienta computacional para el estudio de golpe de ariete en una línea de tubería”**. Trabajo de Grado UDO, Ingeniería Mecánica (1996).

[2] Axworthy, D.; Ghidaoui, M.; Duncan, A. **Extended Thermodynamics Derivation of Energy Dissipation in Unsteady Pipe Flow**, Journal of Hydraulic Engineering April (2000).

[3] Bruno, B.; Karney, W.; Mecarelli, M.; Ferrante, M. **Velocity Profiles and Unsteady Pipe Friction in Transient Flow**. Journal of Water Resources Planning Management/ July/ August (2000).

[4] Pezzinga, G. **Evaluation of Unsteady Flow Resistances by Quasy-2D or 1D Models**. Journal of Hydraulic Engineering / October (2000).

[5] Ayala, R. **“Optimización de una herramienta computacional para el estudio del fenómeno de Golpe de Ariete en una línea de tuberías”**. Trabajo de Grado UDO, Ingeniería Civil, (2003).

Greene, W. **“Bombas, Selección, Uso y Mantenimiento”**. Mc Graw Hill, México (1992).

[6] Ochoa, Luis **“Evaluación del diseño mecánico del sistema de transferencia de petróleo a instalarse desde el ÁREA MAYOR OFICINA (AMO) HASTA EL ÁREA DE TRAMPAS DE HERRAMIENTAS SAN JOAQUÍN”**. Trabajo de Grado UDO, Ingeniería Mecánica (2009).

[7] INELECTRA VENEZUELA, **“Guía de diseño para golpe de ariete”** Revisión 1 (2002).

[10] Greene, W. **“Válvulas, Selección, Uso y Mantenimiento”**. Mc Graw Hill, México (1992).

[11] Mataix, Claudio, **“Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas”**. Segunda edición, Editorial Ediciones del Castillo, España, Madrid (1982).

[12] Streeter, L. Wylie, B. **“Mecánica de los Fluidos”**, Octava edición, editorial McGraw Hill (1983).

- [13] Charles, Shigley. **“Diseño en Ingeniería Mecánica”**, Quinta edición, editorial Mc Graw Hill. México (1990).
- [14] Crane Co. **“Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe”**, Technical Paper No. 410. Chicago (1991).
- [15] Ferdinand P. Beer, Russell E. Johnston. **“Mecánica de los Materiales”**, Segunda edición, editorial Mc Graw Hill Interamericana. Colombia (1993).
- [16] Shames, I. **“Mecánica de los Fluidos”**, Tercera edición, editorial Mc Graw Hill Interamericana. Colombia (1995).
- [17] Beltrán, Luis. **“Curso de Hidráulica de Canales Abiertos”** (2000).
- [18] Barrientos, T. **“Desarrollo de un Método Computacional Paramétrico para el Cálculo de Sistemas Hidráulicos y Selección de Bombas Centrifugas”**. Universidad de Oriente 2000.
- [19] Popov, E. **“Mecánica de Sólidos”**. Segunda Edición. Pearson Educación. México, 2000.
- [20] Twyman, John. **Decoupled Hibrids Methods for Unsteady Flow Analysis in Pipe Networks**, Editorial la Cáfila (2004).
- [21] Serrano, Jorge. **“Manual de introducción a VISUAL BASIC EXPRESS 2005”** (2005).
- [22] Guillermo. Som, Unai. Zorrilla, Jorge. Serrano. **“Curso de Introducción a Visual Studio 2005”** (2006).
- [22] **ASME B31.4 Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids.**

**- Sitios de Internet consultados:**

- [8] **“El golpe de ariete en las tuberías de impulsión. Comentarios de las expresiones de Mendiluce”** (1995). edición disponible en:  
<http://209.85.129.132/search?q=cache:AEU-7CHeWn0J:upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/3301/1/22article3.pdf+comentarios+de+las+ecuaciones+de+mendiluce&cd=6&hl=es&ct=clnk>

[9] **“Manual de introducción a Visual Basic 2008”** (2008). Edición disponible en:  
<http://www.willydev.net/descargas/cursos/vbnet/index.ht>

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>TITULO:</b>	MEJORA DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO DE GOLPE DE ARIETE EN UNA LÍNEA DE TUBERÍAS
<b>SUBTITULO:</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
Maestre M., Martin D.	<b>CVLAC:</b> 17.360.493 <b>EMAIL:</b> maestre687@gmail.com
	<b>CVLAC</b> <b>EMAIL:</b>
	<b>CVLAC</b> <b>EMAIL:</b>
	<b>CVLAC</b> <b>EMAIL:</b>

**PALABRAS O FRASES CLAVES:**

mejora de herramienta computacional

---

golpe de ariete

---

velocidad de la onda

---

método de las características

---

método de las diferencias finitas

---

visual basic

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

<b>ÁREA</b>	<b>SUB ÁREA</b>
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Mecánica

**RESUMEN (ABSTRACT):**

Con el desarrollo de este trabajo se logro la actualización de una herramienta computacional para el cálculo de golpe de ariete en una línea de tuberías ya existente, a través del desarrollo del software ARIETE. Esta actualización se realizó, estudiando cómo influye el comportamiento elástico de la tubería y el fluido que la llena bajo la acción de un cambio de presión; considerando los esfuerzos en la tubería en todos los sentidos (radial, tangencial y axial), las cuales conducen al establecimiento de las ecuaciones diferenciales parciales que definen el fenómeno de golpe de ariete debido al cierre de válvulas, a la detención o parada de bombas y en maniobras de apertura y cierre del distribuidor de turbinas hidráulicas. Este software representa con gran exactitud el fenómeno real, ya que no utiliza la hipótesis de tubería rígida y la de tubería elástica de pared delgada sin esfuerzos ni deformaciones radiales, que permitían estudios más simplificados. Las ecuaciones diferenciales parciales no lineales se transforman en ordinarias por el método de las características y en algebraicas por el método de las diferencias finitas. Estas ecuaciones son las que usando una rutina computacional desarrollada en Visual Basic Express 2008 muestra los resultados de las variables que determinan en el fenómeno de golpe de ariete debido al cierre de válvulas y/o corte repentino de la energía que alimenta el motor de una bomba. El cálculo del fenómeno se efectúa en un entorno gráfico, de fácil entendimiento y mediante la lectura de su manual de usuario se podrá familiarizar con todas las funciones del software. Resultados experimentales publicados en revistas y resultados de proyectos en ejecución por Inelectra permitirán validar la bondad de este software.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL						
	ROL	CA	AS	X	TU	JU	
Orlando, Ayala	CVLAC:	1.193.694					
	EMAIL:	ayalah@cantv.net					
	EMAIL:						
	ROL	CA	AS	X	TU	JU	
Cruz, Adoración	CVLAC:	9.959.030					
	EMAIL:	Adoración.cruz@inelectra.com					
	EMAIL:						
	ROL	CA	AS		TU	X	JU
Camargo, Lino	CVLAC:	11.496.426					
	EMAIL:	Lcamargos@cantv.net					
	EMAIL:						
	ROL	CA	AS		TU		JU
Espinoza, Henry	CVLAC:	4.363.950					
	EMAIL:	hespinoza@cantv.net					
	EMAIL:						
	ROL	CA	AS		TU		JU

**FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:**

2010	08	06
<b>AÑO</b>	<b>MES</b>	<b>DÍA</b>

**LENGUAJE. SPA**

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**ARCHIVO (S):**

<b>NOMBRE DEL ARCHIVO</b>	<b>TIPO MIME</b>
TESIS.GOLPEDEARIETE.doc	application/msword

**CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS:** A B C D E F  
G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s  
t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

**ALCANCE:**

**ESPACIAL:**  Golpe de Ariete – Inelectra  **(OPCIONAL)**

**TEMPORAL:**  Semestral  **(OPCIONAL)**

**TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Ingeniero Mecánico.

---

**NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:**

Pregrado.

---

**ÁREA DE ESTUDIO:**

Departamento de Mecánica.

---

**INSTITUCIÓN:**

Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui.

---

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**

**DERECHOS:**

Los trabajos de grado son exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser usados a otros fines, con el consentimiento del Consejo de Núcleo en cual lo participará el Consejo Universitario.

---

---

---

---

---

---

---

**AUTOR**

Maestre M., Martín D.

**AUTOR**

**AUTOR**

Ayala, Orlando

**TUTOR**

Camargo, Lino

**JURADO**

Espinoza, Henry

**JURADO**

Suárez, Diógenes

**POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**