

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **EVALUACIÓN DE GOLPE DE ARIETE EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Vers R., Alejandro  
para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **EVALUACIÓN DE GOLPE DE ARIETE EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO**

TUTOR ACADÉMICO: Ing. Juan Ruilova

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Carmen Belmonte

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Vers R., Alejandro  
para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2002

Caracas, Mayo de 2002

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Alejandro Vers, titulado:

**EVALUACIÓN DE GOLPE DE ARIETE EN EL SISTEMA DE  
ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. (Francisco Quevedo)

Jurado

Prof. (Rodolfo Berrios)

Jurado

Prof. (Juan Ruilova)

Tutor Académico

Ing. (Carmen Belmonte)

Tutor Industrial

## DEDICATORIA

*A ti Amalia por ser la mujer más fuerte que conozco*

*A ti Jorge por que eres mi ejemplo*

*A ti Natalia por ser mi alegría*

## AGRADECIMIENTOS

- A mis padres Jorge Vers y Amalia Ronchi por su gran esfuerzo y por haberme brindado todo el apoyo necesario para la culminación de mis estudios universitarios
- A la Universidad Central de Venezuela por haberme educado
- A mi Tutor Académico Ing. Juan Ruilova por enseñarme con entusiasmo el perfil de un verdadero ingeniero
- A mí Tutor Industrial Ing. Carmen Adela Belmonte por enseñarme todo aquello que no se aprende en la universidad
- Al Departamento de Ingeniería Mecánica de INELECTRA C.A por prestarme todo el apoyo necesario para la realización de mi trabajo especial de grado, en especial a el Ing. José Carlos Rodríguez , Ing. Valer Moreno y el Ing. Pak Shum.
- A Karen Mosca, Maria Eugenia Mejias y Yeisi González por todas esas otras cosas que son tan importantes
- Al Ing. Osvaldo Centrito por su apoyo en la recolección de la información necesaria para el desarrollo de mi trabajo especial de grado.
- Al Ing. Norma Suárez por su confianza.
- A mi hermana Natalia Vers por su estímulo y apoyo incondicional
- A Kris Escalante, Pedro Lennin, Alberto Pérez y Javier Echeverría por recordarme que hay algo más
- A Carolina Bonilla y Daniela Muñoz por su dedicación, incondicionalidad y paciencia
- A el Ing. Carlos Herrera por su orientación
- Al Ing. Daniel Rodríguez por su experiencia
- A el servicio de informática del proyecto Hamaca Downstream

**Vers R., Alejandro**

## **EVALUACIÓN DE GOLPE DE ARIETE EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO**

**Tutor Académico: Ing. Juan Ruilova. Tutor industrial: Ing. Carmen Belmonte.  
Tesis. Caracas, U.C.V Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.  
2002. 158 pág.**

Golpe de Ariete, Sistema de embarque de Crudo

Para la evaluación de Golpe de Ariete en el Sistema de almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación se desarrolló una investigación de los antecedentes históricos referentes al análisis de dicho fenómeno, para posteriormente, determinar el fundamento teórico en el que se basan las ecuaciones tanto de Movimiento como de Continuidad entre otras, pilares fundamentales en el estudio del comportamiento del flujo transitorio. Son expuestas las causas, fenómenos y sistemas de atenuación relacionados con el Golpe de Ariete en oleoductos. Se describe el método de las características con diferencias finitas como herramienta de análisis, actualmente utilizado por las ventajas de procesamiento de datos con la ayuda de computadores digitales. Se detalla el arreglo del sistema de almacenamiento y embarque, objeto de nuestra evaluación, de manera física y se destacan los parámetros involucrados en su filosofía de operación determinándose así la data necesaria para nuestra evaluación cuya resolución se apoya en el uso del software PIPENET especializado en el análisis de flujo transitorio obteniéndose de esta manera

una descripción detallada del comportamiento del Golpe de Ariete en el arreglo según los dos casos a evaluar en el sistema: Cierre de válvulas y Parada de bombas.

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN.....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	xii
INDICE DE FOTOS.....	xiv
INDICE DE TABLAS.....	xv
INDICE DE GRÁFICOS.....	xviii
NOMENCLATURAS Y SIGLAS.....	xxii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I : ANTECEDENTES, FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	2
I.1 GENERALIDADES.....	2
I.2 DESARROLLO HISTÓRICO.....	2
I.2.1 Primeros estudios de Golpe de Ariete.....	3
I.2.2 Desarrollo del análisis de Golpe de Ariete 1910-1950.....	6
I.2.3 Introducción de métodos digitales de computación.....	7
I.2.4 Desarrollo del método de las características.....	7

I.3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE GOLPE DE ARIETE.....	8
I.3.1 Definiciones.....	8
I.3.2 Ecuación básica del fenómeno transitorio.....	10
I.3.3 Propagación de la onda de presión sin fricción.....	11
I.3.4 Velocidad de propagación de la onda de presión.....	16
I.3.5 Ecuaciones diferenciales básicas para flujo transitorio.....	20
I.3.5.A Ecuación de Momentum.....	20
I.3.5.B Ecuación de Continuidad.....	23

## CAPITULO II : CAUSAS DE GOLPE DE ARIETE, FENÓMENOS RELACIONADOS CON EL GOLPE DE ARIETE, CONTROL Y ATENUACIÓN DE LOS EFECTOS DE GOLPE DE ARIETE

II.1 CAUSAS DE GOLPE DE ARIETE.....	28
II.1.1 Cierre de una válvula.....	28
II.1.2 Detención de una bomba.....	29
II.2 SEPARACIÓN DE COLUMNA DE LÍQUIDO.....	31
II.3 FENÓMENOS RELACIONADOS CON GOLPE DE ARIETE EN OLEODUCTOS.....	32
II.4) CONTROL Y ATENUACIÓN DE LOS EFECTOS DE GOLPE DE ARIETE.....	33
II.4.1 Válvulas de Alivio.....	34

II.4.2 Volantes de Inercia.....	35
II.4.3 Tanques de Aire Comprimido.....	36
II.5 SISTEMAS A EVALUAR.....	37

**CAPITULO III : MÉTODOS DE CÁLCULO DE GOLPE DE ARIETE,  
MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS CON DIFERENCIAS FINITAS**

III.1 PRINCIPALES MÉTODOS DE CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE.....	39
III.1.1 Método Aritmético.....	39
III.1.2 Método Gráfico.....	39
III.1.3 Método Algebraico.....	40
III.1.4 Método de las Ondas Físicas.....	40
III.1.5 Método de la Impedancia.....	41
III.1.6 Método de las Características.....	41
III.2 DESARROLLO DEL MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS.....	41
III.2.1 Ecuaciones Características.....	41
III.2.2 Ecuaciones por Diferencias Finitas.....	44

**CAPITULO IV : DESCRIPCIÓN FÍSICA Y OPERACIONAL DEL  
SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO PARA  
EXPORTACIÓN**

IV.1 INTRODUCCIÓN.....	49
------------------------	----

IV.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	50
IV.3 DESPACHO DE PRODUCTOS.....	54
IV.3.1 Despacho durante IPP.....	55
IV.3.2 Despacho durante NPP.....	56
IV.4 DESPLAZAMIENTO.....	57
IV.5 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL SISTEMA.....	57
IV.5.1 Descripción general.....	57
IV.5.2 Descripción de equipos, tuberías y accesorios.....	66
IV.5.2.A Tanques de almacenamiento.....	66
IV.5.2.B Tuberías de despacho.....	67
IV.5.2.C Bombas de embarque pertenecientes al TAEJ-N.....	74
IV.5.2.C.a Bomba Principal.....	74
IV.5.2.C.b Bomba Secundaria.....	76
IV.5.2.D Válvulas del sistema.....	78
IV.6 DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS DE DESPACHO.....	81
IV.6.1 Crudo Diluido (DCO).....	82
IV.6.2 Crudo Sintético con Bajo Contenido de Azufre (LSSC).....	82
IV.6.3 Crudo Sintético con Bajo Contenido de Azufre fuera de especificación LSSC of SPEC.....	83
IV.6.4 Crudo Sintético con Mediano Contenido de Carbono #1 (MSSC1).....	83
IV.6.5 Crudo Sintético con Mediano Contenido de Carbono #2 (MSSC2).....	84

IV.6.6 Crudo Sintético con Mediano Contenido de Carbono #3 (MSSC3).....	84
IV.6.7 Residuos Secos y Húmedos.....	85

## CAPITULO V : SIMULACIÓN DE EVENTOS TRANSITORIOS EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO PARA EXPORTACIÓN

V.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN.....	86
V.1.1 Introducción a PIPENET.....	86
V.1.2 Módulo de flujo transitorio.....	87
V.2 ECUACIONES DE MODELACIÓN DEL PROGRAMA.....	87
V.2.1 Ecuaciones de flujo.....	87
V.2.2 Ecuación de velocidad de onda.....	88
V.2.3 Ecuación de tubería elástica.....	89
V.2.4 Ecuación para accesorios de tubería.....	91
V.2.5 Ecuación para bombas.....	92
V.2.5.A Descripción.....	92
V.2.5.B Parámetros a introducir por el usuario.....	93
V.2.5.C Ecuaciones de modelación.....	93
V.2.6 Ecuaciones para válvulas.....	94
V.2.6.A Descripción.....	94
V.2.6.B Características de la válvula.....	95
V.2.6.C Especificaciones para válvulas.....	96
V.2.6.D Válvula de operación.....	98
V.2.6.D.a Descripción.....	98

V.2.6.D.b	Parámetros a introducir por el usuario.....	98
V.2.6.D.c	Ecuación de modelación.....	99
V.2.6.E	Válvula de retención.....	100
V.2.6.E.a	Descripción.....	100
V.2.6.E.b	Parámetros a introducir por el usuario.....	100
V.2.6.E.c	Ecuación de modelación.....	101
V.2.7	Ecuaciones para especificaciones de usuarios.....	101
V.2.7.A	Descripción.....	101
V.2.7.B	Parámetros a introducir por el usuario.....	102
V.2.7.C	Ecuación de modelación.....	103
V.3 MODELACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO PARA EXPORTACIÓN.....		104
V.3.1	Consideraciones.....	104
V.3.1.A	Casos más Desfavorables.....	104
V.3.1.B	Caudal de operación.....	104
V.3.1.C	Fluido de simulación.....	105
V.3.1.D	Numero de bombas utilizadas en la simulación.....	105
V.3.1.E	Cierre de válvulas.....	105
V.3.1.F	Condiciones de borde.....	105
V.3.1.G	Selección del tanque a modelar.....	106
V.3.1.H	Ruta del modelo.....	106
V.3.1.I	Lazos de embarque.....	106
V.3.2	Descripción.....	107
V.3.2.A	Modelación de tuberías.....	108
V.3.2.A.a	Data de tuberías elásticas y cortas.....	109
V.3.2.B	Modelación de válvulas.....	110
V.3.2.B.a	Data de válvulas.....	111
V.3.2.C	Modelación de las Bombas.....	112

V.3.2.C.a Corrección de las curvas características de las bombas por efectos viscosos.....	114
V.3.2.D Modelación de especificaciones.....	115
V.3.2.D.a Data de especificaciones.....	116
<b>V.4 RESULTADOS OBTENIDOS DE LAS SIMULACIONES.....</b>	<b>118</b>
V.4.1 Caso-Flujo Estable del Sistema.....	118
V.4.2 Caso-Cierre de válvulas de Embarque (15 seg).....	121
V.4.3 Caso- Cierre de válvulas QCDC (5 seg).....	129
V.4.4 Caso-Parada de bomba.....	127
<b>V.I ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>144</b>
VI.1 Caso-Flujo Estable del Sistema.....	147
VI.2 Caso-Cierre de válvulas de Embarque (15 seg).....	148
VI.3 Caso- Cierre de válvulas QCDC (5 seg).....	149
VI.4 Caso-Parada de bomba.....	150
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>153</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>156</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>157</b>

## APÉNDICE A

- A.1 Velocidad de flujo recomendada en tuberías.
- A.2 Especificaciones de Accesorios y Tuberías.
- A.3 Extracto del Código ASME, Sección II, Parte D, Subparte 3, Figura G
- A.4 Comportamiento de la simulación de parada de bomba perteneciente al TAEJ-N realizada por M.W. Kellog, Corrida 4013
- A.5 Características de Válvulas y Normalización de Tuberías
- A.6 Extracto del Cameron Hydraulic Data, Carta de corrección por efectos viscosos del comportamiento de bomba
- A.7 Constantes elásticas y físicas de materiales.
- A.8 Características de las Bombas de Embarque.
- A.9 Representación e identificación de los elementos que conforman el modelo de simulación
- A.10 TAEJ-N Plataforma de Embarque y Ruteo de tuberías. Área marina.
- A.11 TAEJ-N Ruteo de tuberías área de trampas y edificaciones.
- A.12 Diagrama de tubería e Instrumentación. Área de Bombas.
- A.13 Disposición de la Planta Mejoradora de SINCOR., TAEJ-S y TAEJ-N
- A.14 TAEJ-S Diagrama de flujo del patio de tanques.
- A.15 TAEJ-S Diagrama de flujo de proceso durante NPP.
- A.16 Brazos de Embarque Ejemplos.

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
I.3.2.A	Reservorio Tubería sin fricción.....	10
I.3.3.A	Propagación de la onda de presión sin fricción.....	13
I.3.4.A	Diagrama de cuerpo libre de una sección de tubería.....	18
I.3.5.A	Diagrama de cuerpo libre fundamento del desarrollo de la Ecuación de Momentum.....	21
I.3.5.B	Volumen de control fundamento desarrollo de la Ecuación de Continuidad.....	24
II.2.A	Fenómeno de separación de columna de líquido.....	32
II.3.A	Atenuación de la onda de presión en una tubería.....	33
II.4.1.A	Válvula de alivio de presión.....	34
II.4.2.A	Esquema de volante de inercia.....	36
II.4.3.A	Esquema de la colocación de un tanque comprimido.....	37
III.2.1.A	Líneas características en el plano $xt$ .....	44
III.2.2.A	Malla rectangular para la solución de problemas que involucran tubería simple.....	46
V.2.3	Ventana de dialogo para introducción de parámetros por el usuario	

	tubería elástica.....	89
V.2.5.A	Ventana de dialogo para definir curva característica de la bomba.....	92
V.2.5.B	Ventana de dialogo para introducción de parámetros por el usuario Bombas.....	93
V.2.6.D	Ventana de dialogo para definir válvulas de operación.....	98
V.2.6.E	Ventana de dialogo para definir válvulas de retención.....	100
V.2.7.B	Ventana de dialogo para definir especificaciones.....	102
V.3.2	Esquema de modelación del arreglo.....	107
V.3.2.A	Tubería Elástica.....	108
V.3.2.B	Válvula modelación.....	110
V.3.2.C	Introducción de la data Bomba Principal.....	113
V.3.2.D	Ventana para la data de Especificaciones.....	115

## INDICE DE FOTOS

<b>FOTO N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
IV.5.1.A	Vista de las líneas de 60” asociadas a los cabezales de succión de las Bombas de embarque del TAEJ-N.....	58
IV.5.1.B	Vista del cabezal de succión de 36” asociado a una de las bombas Principales de embarque del TAEJ-N.....	59
IV.5.1.C	Vista del cabezal de succión de 20” asociado a una de las bombas Secundarias de embarque del TAEJ-N.....	59
IV.5.1.D	Vista de la casa de bombas de embarque del TAEJ-N.....	60
IV.5.1.E	Vista del cabezal de descarga de 24” asociado a una de las bombas Principales de embarque del TAEJ-N.....	61
IV.5.1.F	Vista del cabezal de descarga de una de las bombas de em1barque asociado a las líneas de 36”.....	61
IV.5.1.G	Corredor de las líneas de 36” con conexiones para futuros cabezales de descarga.....	62
IV.5.1.H	Vista del área de mezcladores pertenecientes al TAEJ-N.....	63
IV.5.1.I	Vista del área de raspa tubos pertenecientes al TAEJ-N.....	63
IV.5.1.J	Vista de los lazos de embarque de crudo de 36” hacia la Plataforma de Embarque Norte mar adentro.....	64
IV.5.1.K	Vista de la Plataforma de Embarque Norte, donde se pueden apreciar los brazos de carga retraídos.....	65

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
IV.3.1	Despacho durante IPP.....	55
IV.3.2	Despacho durante NPP.....	56
IV.5.2.A.a	Descripción de los tanques TA2-T-01/02/03/04/05.....	66
IV.5.2.A.b	Descripción del tanque TA2-T-06.....	66
IV.5.2.B.a	Descripción de la línea 48”-P-08-20-0503-BA2Y-PP.....	67
IV.5.2.B.b	Descripción de la línea 48”-P-08-20-0521-AA2Y.....	68
IV.5.2.B.c	Descripción de la línea 60”-P-TA1-126.....	68
IV.5.2.B.d	Descripción de la línea 36”-P-TA1-1027J-AA1.....	69
IV.5.2.B.e	Descripción de la línea 20”-P-TA1-1045F-AA1.....	69
IV.5.2.B.f	Descripción de la línea 24”-P-TA1-1019-BA1.....	70
IV.5.2.B.g	Descripción de la línea 20”-P-TA1-1046-BA1.....	70
IV.5.2.B.h	Descripción de la línea 36”-P-TA1-214-BA1.....	71
IV.5.2.B.i	Descripción de la línea 36” CR-IN-27-BA4.....	71
IV.5.2.B.j	Descripción de la línea 36” CR-IN-28-DA1.....	72
IV.5.2.B.k	Descripción de la línea 36” CR-IN-29-BA4.....	72
IV.5.2.B.l	Descripción de la línea 24” CR-IN-29A-BA4.....	73
IV.5.2.B.m	Descripción de la línea 16” CR-IN-30-AA1.....	73
IV.5.2.C.a	Descripción Bomba Principal.....	74
IV.5.2.C.b	Descripción Bomba Secundaria.....	76
IV.5.2.D.a	Descripción Válvula-Tanque.....	79

IV.5.2.D.b	Descripción Válvula-Línea de 48” .....	79
IV.5.2.D.c	Descripción Válvula-Succión Bombas.....	80
IV.5.2.D.d	Descripción Válvula-Descarga Bombas.....	80
IV.5.2.D.e	Descripción Válvula de retención.....	80
IV.5.2.D.f	Descripción Válvula-Plataforma.....	81
IV.5.2.D.g	Descripción Válvula-QCDC.....	81
IV.6.1	Descripción DCO 17° API .....	82
IV.6.2	Descripción LSSC.....	82
IV.6.3	Descripción LSSC of ESPC.....	83
IV.6.4	Descripción MSSC 1.....	83
IV.6.5	Descripción MSSC 2.....	84
IV.6.6	Descripción MSSC 3.....	84
IV.6.7	Descripción DRY & WET SLOPS.....	85
V.3.2.A.a	Data Tubería-Elastica.....	109
V.3.2.A.b	Data Tubería-Corta .....	109
V.3.2.B.a.1	Válvula QCDC.....	111
V.3.2.B.a.2	Válvula de Embarque.....	111
V.3.2.B.a.3	Válvula de Retención.....	111
V.3.2.B.a.4	Válvulas del Sistema.....	112
V.3.2.C	Modelación de Bombas.....	113
V.3.2.D.a	Especificación Entrada del Sistema.....	116
V.3.2.D.b	Especificación Salida del Sistema.....	116
V.3.2.D.c	Especificación Cierre de Válvulas QCDC.....	116

V.3.2.D.d	Especificación Cierre de válvulas de Embarque.....	117
V.3.2.D.e	Especificación Parada de bomba.....	117
V.4.1.a	Presión y Caudal Caso- Flujo Estable del Sistema Tubería Corta....	118
V.4.1.b	Caudal y Rango de Presión Caso- Flujo Estable de Tubería Elástica.....	119
V.4.2.a	Rango de Presión y variación de Caudal Caso- Cierre de Válvulas de Embarque (15 seg) Tubería corta.....	121
V.4.2.b	Rango de Presión y variación de Caudal Caso- Cierre de Válvulas Embarque (15 seg) Tubería Elástica.....	122
V.4.3.a	Rango de Presión y variación de Caudal Caso- Cierre de Válvulas QCDC (5 seg) Tubería corta.....	123
V.4.3.b	Rango de Presión y variación de Caudal Caso- Cierre de Válvulas QCDC (5 seg) Tubería Elástica.....	124
V.4.4.a	Rango de Presión y variación de Caudal Caso- Parada de Bomba Tubería Corta.....	125
V.4.4.b	Rango de Presión y variación de Caudal Caso- Parada de Bomba Tubería Elástica.....	126

## INDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfica N°</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pag.</b>
I.3.3.B	Evaluación transitoria de la sobrepresión durante el cierre instantáneo de una válvula.....	14
I.3.3.C	Evaluación transitoria de la sobrepresión durante el cierre instantáneo de una válvula tomando en cuenta la fricción.....	15
IV.5.2.C.a	Bomba Principal-Curva Característica.....	75
IV.5.2.C.b	Bomba Principal-Eficiencia.....	75
IV.5.2.C.c	Bomba Principal-Potencia.....	76
IV.5.2.C.d	Bomba Secundaria-Curva Característica.....	77
IV.5.2.C.e	Bomba Secundaria-Eficiencia.....	77
IV.5.2.C.f	Bomba Secundaria-Potencia.....	78
V.2.6.C	Tipos de curvas características de válvulas disponibles por el usuario.....	97
V.3.2.C.a	Bomba Principal –Curva característica Corregida.....	114
V.3.2.C.b	Bomba Secundaria –Curva característica Corregida.....	114
V.4.2.1	Comportamiento del flujo a la salida del tanque de almacenamiento (48”)......	123
V.4.2.2	Comportamiento de la presión a la salida del tanque de almacenamiento (48”)......	123
V.4.2.3	Comportamiento del flujo en el nodo donde se interconectan los 3 cabezales de succión.....	124

V.4.2.4	Comportamiento de la presión en el nodo donde se interconectan los 3 cabezales de succión.....	124
V.4.2.5	Comportamiento del flujo en la succión de la Bomba Principal (36").....	125
V.4.2.6	Comportamiento de la presión en la succión de la Bomba Principal (36").....	125
V.4.2.7	Comportamiento del flujo en la descarga de la Bomba Principal (24").....	126
V.4.2.8	Comportamiento de la presión en la descarga de la Bomba Principal (24").....	126
V.4.2.9	Comportamiento del flujo en la cota más profunda de la línea submarina (36").....	127
V.4.2.10	Comportamiento de la presión en la cota más profunda de la línea submarina (36").....	127
V.4.2.11	Comportamiento del flujo a la salida de los brazos de carga de la plataforma de embarque (16").....	128
V.4.2.12	Comportamiento de la presión a la salida de los brazos de carga de la plataforma de embarque (16").....	128
V.4.3.1	Comportamiento del flujo a la salida del tanque de almacenamiento (48").....	131
V.4.3.2	Comportamiento de la presión a la salida del tanque de almacenamiento (48").....	131

V.4.3.3	Comportamiento del flujo en el nodo donde se interconectan los 3 cabezales de succión.....	132
V.4.3.4	Comportamiento de la presión en el nodo donde se interconectan los 3 cabezales de succión.....	132
V.4.3.5	Comportamiento del flujo en la succión de la Bomba Principal (36").....	133
V.4.3.6	Comportamiento de la presión en la succión de la Bomba Principal (36").....	133
V.4.3.7	Comportamiento del flujo en la descarga de la Bomba Principal (24").....	134
V.4.3.8	Comportamiento de la presión en la descarga de la Bomba Principal (24").....	134
V.4.3.9	Comportamiento del flujo en la cota más profunda de la línea submarina (36").....	135
V.4.3.10	Comportamiento de la presión en la cota más profunda de la línea submarina (36").....	135
V.4.3.11	Comportamiento del flujo a la salida de los brazos de carga de la plataforma de embarque (16").....	136
V.4.3.12	Comportamiento de la presión a la salida de los brazos de carga de la plataforma de embarque (16").....	136
V.4.4.1	Comportamiento del flujo a la salida del tanque de almacenamiento (48").....	139

V.4.4.2	Comportamiento de la presión a la salida del tanque de almacenamiento (48'').	139
V.4.4.3	Comportamiento del flujo en el nodo donde se interconectan los 3 cabezales de succión.	140
V.4.4.4	Comportamiento de la presión en el nodo donde se interconectan los 3 cabezales de succión.	140
V.4.4.5	Comportamiento del flujo en la succión de la Bomba Principal (36'').	141
V.4.4.6	Comportamiento de la presión en la succión de la Bomba Principal (36'').	141
V.4.4.7	Comportamiento del flujo en la descarga de la Bomba Principal (24'').	142
V.4.4.8	Comportamiento de la presión en la descarga de la Bomba Principal (24'').	142
V.4.4.9	Comportamiento del flujo en la cota más elevada de la línea submarina (36'').	143
V.4.4.10	Comportamiento de la presión en la cota más profunda de la línea submarina (36'').	143
V.4.4.11	Comportamiento del flujo a la salida de los brazos de carga de la plataforma de embarque (16'').	144
V.4.4.12	Comportamiento de la presión a la salida de los brazos de carga de la plataforma de embarque (16'').	144

## NOMENCLATURA Y SIGLAS

a	Velocidad de propagación de onda
A	Área de sección transversal de la tubería
B	Impedancia característica
C	Velocidad de propagación de onda en fluidos confinados
$C^+$	Línea característica
$C^-$	Factor de distencibilidad de la tubería
$C_0$	Velocidad de propagación de onda en fluidos no confinados
$C_v$	Coefficiente de flujo
d	Diámetro de tubería
e	Espesor de pared de tubería
E	Módulo de elasticidad de la tubería
F	Fuerza
f	Factor de fricción de Darcy
g	Aceleración de gravedad
H	Altura piezométrica
HR	Altura piezométrica dentro del reservorio
L	Longitud de tubería
$L_1$	Ecuación simplificada de Movimiento
$L_2$	Ecuación simplificada de Continuidad
M	Momento de inercia
P	Presión

$P_f$	Caída de presión
$P_x$	Derivada parcial de P con respecto a x
Q	Caudal
R	Coefficiente de resistencia de la tubería
Re	Número de Reynolds
T	Fuerza de tensión circunferencial
V	Velocidad del fluido
$V_0$	Velocidad promedio inicial del fluido
$V_x$	Derivada parcial de V con respecto a x
$V_t$	Derivada parcial de V con respecto a t
Z	Elevación de la línea central de la tubería

### **Letras Griegas**

$\rho$	Densidad
$\mu$	Relación de Poisson's, Velocidad de pared de tubería
$\lambda$	Multiplicador
$\kappa$	Modulo de compresibilidad del fluido
$\alpha$	Angulo con respecto a la horizontal
$\omega$	Aceleración angular
$\Delta P$	Variación de presión
$\tau_0$	Esfuerzo de corte
$\varepsilon$	Deformación
$\sigma$	Esfuerzo de tracción

## **Siglas**

ARU	Unidad de regeneración de Aminas
ASME	American Society Mechanical Engineering
CCMC	Conservación de Cantidad de Movimiento Lineal
CDU	Unidad de destilación de crudo
DCO	Crudo Diluido
DCU	Unidad de Coquización Retardada
GRU	Unidad Recuperadora de Gas
HMU	Unidad de producción de Hidrógeno
IPP	Fase de producción Inicial
JPS	Estación de Bombeo de Jose
LSSC	Crudo Sintético de bajo contenido de azufre
MHC	Unidad de Hidrocraqueo
MSSC	Crudo Sintético de mediano contenido de azufre
NDHDT	Unida Hidrotasadora de Nafta
NPP	Fase de producción Normal
QCDC	Diseño de acoplamiento de cierre instantáneo
SWS	Unidad de despojamiento de Aguas Agrias
TAEJ-S	Terminal de Almacenaje para Exportación Sur
TAEJ-N	Terminal de Almacenaje para Exportación Norte
VDU	Unida de Destilación al Vacío

# INTRODUCCIÓN

El creciente y continuo desarrollo que experimenta Venezuela en el ámbito petrolero, ha determinado la necesidad de construcción de una gran diversidad de infraestructuras con el objetivo de transformar y transportar el crudo extraído de nuestras cuencas petrolíferas.

Básicamente los sistemas de manejo de crudo están conformados por redes de tubería que transportan el producto desde el lugar de extracción hasta las plantas de mejoramiento o refinerías, luego a los centros de almacenamiento y posteriormente a los centros de embarque o muelle.

Para poder transportar el crudo o los derivados de este, son necesarios sistemas hidráulicos a presión capaces de suministrar al fluido la energía necesaria para lograr su transporte a las diversas etapas del proceso.

Los sistemas hidráulicos a presión están sujetos a cambios bruscos en sus condiciones hidráulicas debido a los requerimientos de operación típicos del sistema y a situaciones de emergencia que puedan presentarse. Estos cambios generan condiciones transitorias en el flujo que originan ondas de presión, las cuales, inducen sobrepresiones y depresiones en la tubería que viajan con el tiempo dando a lugar el fenómeno conocido como Golpe de Ariete.

En el presente trabajo especial de grado se evalúa el Golpe de Ariete en un sistema de almacenamiento y embarque de crudo para exportación según los casos de cierre de válvulas y parada de bombas, elementos que conforman dicho sistema. En Capitulo I se exponen los antecedentes y fundamentos teóricos del fenómeno; en el Capitulo II se presentan las causas, fenómenos y sistemas de atenuación del Golpe de Ariete; en el Capitulo III se describen los métodos de cálculo de Golpe de Ariete enfatizando en el método de las características con diferencias finitas; en Capitulo IV se describe físicamente el sistema ha ser evaluado, como también, su filosofía de operación ; en el Capitulo V se describe el software utilizado como herramienta de análisis y se modela el arreglo del sistema, simulando finalmente los casos de flujo transitorio.

# Capítulo I

## ANTECEDENTES, FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### I.1) Generalidades

El Golpe de Ariete es el fenómeno por el cual, la información relativa a los cambios de las condiciones de flujo en cualquier punto del sistema es transmitida a todos los de mas puntos del sistema. 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 viajan a lo largo de la tubería con velocidad cercana a la del sonido. Estas ondas se originan en un sistema de tuberías cuando ocurren cambios repentinos en la operación de algún elemento, como cambios accidentales o planeados en la apertura de las válvulas, accionamiento o detención de unidades de bombeo o cambios en el nivel en los tanques o recipientes a presión La velocidad de transmisión del fenómeno dependerá de las propiedades del fluido, como también, de las propiedades del sistema que lo contiene; la magnitud de los cambios de presión asociados, tanto positivos (sobrepresiones) como negativos (depresiones), dependerá de la rata de cambio de las condiciones de flujo en el origen del fenómeno, de las propiedades del fluido y de la tubería, de las atenuaciones producto de cualquier dispositivo de alivio incluidos en el sistema y de las subsecuentes transmisiones y reflexiones del fenómeno en el sistema.

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 negativas pueden disminuir la presión total hasta generar cavitación, separación de la columna de líquido o el colapso de la tubería por efecto de la presión externa.

## I.2) Desarrollo Histórico

La literatura relativa a la propagación transitoria de presión, o Golpe de Ariete, como comúnmente fue conocido el fenómeno, es extensa y abarca los últimos 100 años.

La literatura ha recibido contribuciones que van desde la pura teoría, tales como ensayos en el uso de las transformadas de Laplace hasta reportes de particulares condiciones transitorias en sistemas hidráulicos.

En la actualidad se enfoca el desarrollo de modernas técnicas de análisis, el uso del método de diferencias finitas basados en veloces herramientas computacionales y tratamientos de áreas especializadas, como lo es, la separación de columna de líquido, para ser utilizadas como bases y fundamentos en la evaluación de Golpe de Ariete. A continuación se presenta un breve resumen histórico según Swaffield, J.A. y Boldy, A.P., "Pressure Surge in Pipe and Duct Systems", ver bibliografía.

### I.2.1) Primeros estudios del Golpe de Ariete

Los primeros trabajos registrados sobre Golpe de Ariete fueron realizados por Weber (1865) y Michaud (1878) quienes notaron la oscilación natural del fenómeno y la influencia de la elasticidad de la tubería sobre este; ninguno de los dos relaciono dicho fenómeno con los primeros estudios de propagación de la onda sonora que puede ser tratada con la solución de Euler de la ecuación de onda (1750). Durante los siguientes 100 años el trabajo de Euler sobre la onda sonora fue extendido por D'Alembert, Bernoulli, Young, Savant y Liscovious y E.H y W. Weber. En 1848 Wertheim noto que la velocidad de la onda sonora en un tubo lleno de agua fue menor que la predicha por la ecuación

$$C_0 = \sqrt{\frac{k}{\rho}} \quad \text{e.c. I.2.1.A}$$

Donde:

*k*: Modulo de compresibilidad del fluido

*ρ*: Densidad del fluido

*C<sub>0</sub>*: Velocidad de propagación de onda

ecuación apropiada para una masa de fluido ilimitada; Helmholtz atribuyó esto a la propiedad de elasticidad de la tubería ese mismo año.

Korteweg (1878) estableció la ecuación para la velocidad de propagación de onda en un fluido contenido en una tubería elástica y la cuál ha permanecido como base para innumerables trabajos posteriores

$$C = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{D \cdot k}{E \cdot e}}} \quad \text{e.c. I.2.1.B}$$

Donde:

*E*: Modulo de elasticidad de la tubería

*e*: Espesor de pared de la tubería

*D*: Diámetro de la tubería

*C*: Velocidad de propagación de onda en un fluido confinado

La ecuación anterior asume que los esfuerzos longitudinales y radiales soportados por la pared de la tubería son despreciables. Trabajos experimentales por Kundt y otras investigaciones, confirman esta expresión con limites de -10% a 4%.

Lamb (1898) extendió este trabajo e incluyo esfuerzos longitudinales, obteniendo una expresión que arrojaba una velocidad de propagación de onda ligeramente menor que la predicha por Korteweg.

En esta época Joukowsky (1900) publica los resultados de un trabajo experimental realizado en el Moscow Water Works que establece los fundamentos de todos los consecuentes análisis de Golpe de Ariete. La gran importancia del trabajo desarrollado por Joukowsky radica en que fue la primera vez que se relacionó el incremento de presión  $\Delta P$  o de energía  $\Delta H$ , velocidad de onda y variaciones de la velocidad del fluido y que para una interrupción instantánea del flujo  $\Delta P$  o  $\Delta H$  puede ser expresado como:

$$\Delta P = \rho \cdot C \cdot V_0$$

e.c. I.2.1.C

$$\Delta H = \frac{C \cdot V_0}{g}$$

e.c. I.2.1.D

Donde:

*V<sub>0</sub>: velocidad promedio inicial del fluido*

*g: Aceleración de la gravedad*

*ΔP: Incremento de presión*

*ΔH: Incremento de energía*

En el desarrollo de esta expresión Joukowsky se dio cuenta de la importancia de la velocidad de onda y el significado de la reflexión de onda en el sistema de tubería, introduciendo de esta manera el concepto de periodo de la tubería el cual expresa el tiempo que toma la onda generada en viajar hasta una condición de borde, reflejarse y volver al punto inicial.

Joukowsky estableció por primera vez una explicación racional para la compleja variación de presión experimentada en el sistema de tubería al introducir el concepto de reflexión y transmisión en las condiciones de borde de la tubería, al reconocer la importancia del periodo de la tubería, basado en la velocidad de propagación de onda, y al desarrollar una expresión que relaciona el incremento de presión con la densidad del fluido, velocidad de onda y los cambios de velocidad.

Durante este periodo Allievi trabajó en Italia y en sus notas 1-IV (1903-1913), estableció la relación de Joukowsky al hacer las mismas suposiciones, a saber, pérdida por fricción, dimensiones de tubería uniformes, material homogéneo en la pared de la tubería y distribución de velocidades uniforme.

Allievi extendió los resultados de Joukowsky para cierres lentos de válvula, cierres de válvula que tarda más que un periodo de la tubería. Esta definición de tiempo en términos de período es crucial para entender la propagación transitoria de presión o Golpe de Ariete.

Muchas de las simplificaciones hechas por Joukowsky y Allievi ya no se usan, como por ejemplo, la fricción, la cual, es normalmente incluida en las técnicas modernas de análisis y la influencia de los esfuerzos longitudinales en la pared de la tubería es ahora comúnmente incluida a través de un coeficiente,  $C'$ , introducido por Parmakian (1955)

$$C = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{D \cdot k}{E \cdot e} C'}} \quad \text{e.c. I.2.1.E}$$

De esta manera los conceptos básicos de Golpe de Ariete fueron establecidos en 1913 y tienen validez comprobada hasta nuestros días. Los métodos para analizar el fenómeno transitorio en un fluido, no obstante, tuvieron que esperar 50 años hasta la llegada de los veloces sistemas de computación.

### **I.2.2) Desarrollo del análisis de Golpe de Ariete 1910 a 1950**

Durante la época de 1910-1925, una serie de métodos aproximados fueron propuestos, algunos desarrollados por investigaciones aisladas y otros basados en traducciones parciales de investigaciones europeas, Vensano y Warren (1915). El uso de aproximaciones sin el entendimiento de sus limitaciones, o de sus suposiciones, con lleva a un amplio margen de predicciones de incremento de presión para cualquier caso en particular.

Entre los trabajos de relevancia destacan los realizados por Loewy (1928), Schnyder (1929) y Bergeron (1932). Por alguna razón la contribución del trabajo de Loewy es frecuentemente olvidado y la técnica desarrollada es normalmente referida como el método gráfico de Schnyder-Bergeron

La mayor ventaja de esta técnica gráfica fue la inclusión de la fricción por medio de la caída de presión discreta, referida a la fricción en las juntas, a lo largo de la tubería analizada. Las desventajas incluyen la posibilidad de acumulación de errores gráficos y la imposibilidad para usar la técnica como una herramienta de diseño interactiva previo a la computarización de la técnica al principio de los años 60.

Marples (1966) y Pearsall (1966) presentaron estudios sobre la aplicación del método gráfico, mientras que Harding (1966) presentó la primera versión computarizada.

A mediados de la década de los 50 la mejor técnica existente fue el método gráfico de Schnyder-Bergeron. La siguiente fase desarrollada fue con el uso de computadoras digitales conjuntamente con las diferencias finitas basadas en el método de las características.

### **I.2.3) Introducción de métodos digitales de computación, en particular el método de las características**

El método de las características es una técnica matemática que es particularmente apropiada para la solución de pares de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que relacionan dos dependientes con dos independientes variables. Las ecuaciones definen la propagación transitoria de presión y los incrementos de presión en sistemas de tubería.

El método fue propuesto primero por Riemann en 1860 mientras estudiaba la amplitud finita de la propagación de la onda sonora en el aire. La primera aplicación al análisis de la presión transitoria fue realizada por Lamoine (1947). Ningún autor consideró el uso de computadora. Un considerable número de trabajos fueron presentados en USA empleando esta técnica, entre los primeros se encuentra Ezekial y Paynter (1957) y más significativamente Streeter con un rango de coautores, (1962), (1966), (1967), (1969). Muchos de los trabajos publicados se basan en la presentación del método de las características por Mary Lister (1960).

A principio de la década de los 70 esta técnica fue establecida como la técnica standard para el análisis transitorio.

Streeter y Lai (1962) aseveran que el método de las características es el equivalente a tratar las pérdidas por fricción como una pérdida distribuida uniformemente a lo largo de la tubería.

En lo referente a la comparación del método gráfico con el método de las características son más las similitudes que las diferencias entre ambas aproximaciones, Enever (1970).

#### **I.2.4) Desarrollo del método de las características**

La introducción y la aceptación del método de las características como la técnica más apropiada para el análisis del fenómeno de presión transitoria, contribuyo al completo estudio del incremento de presión. Esta técnica ha permitido preveer las dificultades causadas por las condiciones transitorias en sistemas de tuberías, para posteriormente ser tomadas en cuenta en la realización del diseño y construcción de estos. Áreas que tienen particular desarrollo debido a la introducción de métodos basados en computadoras incluyen problemas relacionados con la caída de presión en la línea como respuesta a la propagación de onda de presión transitoria negativa y problemas que involucran la formación de cavitación. En este ultimo caso las ventajas del método basado en el uso de computadoras sobre los primeros métodos gráficos es particularmente clara, como el preciso seguimiento de la formación de la cavitación y colapso sufrido por el fluido analizado.

La introducción de las veloces técnicas basadas en la utilización de procesadores también tienen una implicación en el análisis de las presiones transitorias como herramientas de diseño, ya que permite variar parámetros del sistema y recalcular velozmente nuevas opciones.

### **I.3) Fundamentos teóricos del Golpe de Ariete**

#### **I.3.1) Definiciones**

- *Atenuación:* Disminución en la magnitud de la onda de presión inicial, debido a la fricción, a medida que se desplaza aguas arriba en la tubería.
- *Cavitación:* Fenómeno que se produce cuando la presión interna absoluta en algún punto del flujo en la tubería desciende por debajo del valor de presión de vaporización del líquido para la temperatura local, y que se caracteriza por la aparición de burbujas de vapor que son arrastradas por la corriente, y que al entrar de mayor presión, implotan erosionando la superficie metálica.

- *Cierre lento de una válvula:* Cierre que se realiza en un tiempo mayor al tiempo de fase de la tubería aguas arriba de la válvula.
- *Cierre rápido de una válvula:* Cierre que se realiza en un tiempo menor o igual al tiempo de fase de la tubería aguas arriba de la válvula
- *Cierre uniforme de válvula:* Cierre en el cual el área efectiva de flujo en la válvula se reduce de manera constante con el tiempo (cierre lineal de la válvula).
- *Condición de borde o frontera:* Condición externa a la tubería (tanque, válvula, bomba, etc.) que permite relacionar la respuesta de la tubería al comportamiento de esta condición.
- *Flujo estacionario:* Es aquel flujo en el que las condiciones hidráulicas en un punto determinado de la tubería no varían con el tiempo.
- *Flujo transitorio:* Es aquel flujo en el que las características hidráulicas en una determinada sección de la tubería varían de un instante de tiempo al otro.
- *Golpe de Ariete:* Onda de presión dinámica generada en el flujo en una tubería que resulta de un retardo o aceleración brusca en el fluido.
- *Paro lento de una bomba:* Detención de una bomba cuando el tiempo que transcurre desde la interrupción de la energía hasta que comienza la reversión del flujo es mayor que el tiempo de fase la tubería de descarga.
- *Paro rápido de una bomba:* Detención de una bomba cuando el tiempo que transcurre desde la interrupción de la energía hasta que comienza la reversión del flujo es menor o igual que el tiempo de fase de la tubería de descarga.
- *Presión admisible externa:* Máxima presión externa absoluta a la que puede ser sometida una tubería.
- *Presión interna de diseño:* Según el código ASME es la presión usada para el diseño por presión de componentes del sistema de tuberías.
- *Presión máxima de operación:* Según el código ASME se define como la máxima presión a la que una tubería o un equipo están sujetos durante las condiciones normales de servicio en estado estacionario.
- *Régimen permanente:* Ver flujo estacionario.
- *Separación de la columna de líquido:* Fenómeno que ocurre cuando en un fluido se forma una cavidad de vapor que abarca toda la sección transversal de la

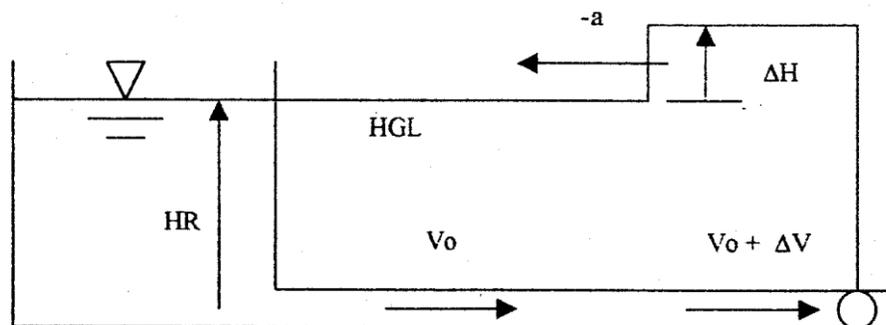
tubería separando el flujo en dos columnas, y que cuando desaparece puede producir sobrepresiones considerables debido al impacto de las dos columnas.

- *Temperatura de diseño:* Según la sección B31.4 del código ASME es la temperatura del metal esperada durante condiciones normales de operación. La sección B31.3 establece que es aquella temperatura que coincide con la presión para la cual se requiere el mayor espesor de tuberías y rating de accesorios.
- *Tiempo de fase de una tubería:* Tiempo que tarda la onda de presión en recorrer la tubería y regresar al lugar donde se originó la perturbación.  $t = 2L/a$  seg

### I.3.2) Ecuación básica del fenómeno transitorio

Si se aplica la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento lineal (CCML) no estacionaria o también llamada ecuación de movimiento, a un volumen de control en una sección de tubería, donde este ocurriendo un cambio de caudal, se puede obtener una ecuación capaz, de estimar el incremento de la altura  $\Delta H$  o presión  $\Delta P$  en la tubería, causada por un cambio repentino de la velocidad  $\Delta V = V_2 - V_1$ .

Considérese el caso de un cierre parcial de válvula, el cual produce una reducción instantánea de la velocidad en una cantidad  $\Delta V$  ( ver figura I.3.2.A ). La reducción de velocidad trae como consecuencia inmediata un aumento de la altura de presión aguas arriba de la válvula. Esto crea una onda de presión con magnitud  $\Delta H$  la cual viaja por la tubería aguas arriba de la válvula, a una velocidad  $a$  cercana a la del sonido. Este incremento de presión comprime el líquido y expande la tubería.



**Figura I.3.2.A Reservorio, tubería sin fricción y válvula.**

Tomando en cuenta lo anterior y aplicando la ecuación de conservación de cantidad de movimiento lineal a una sección de la tubería por el cual este pasando la onda de presión, se obtiene la siguiente expresión;

$$\Delta H = \frac{-a\Delta V}{g} \quad \text{e.c. I.3.2.A}$$

Es importante destacar que esta ecuación es una aproximación y tiene ciertas limitaciones como:

- Calcula la sobrepresión en la tubería cuando ocurre un cambio de velocidad
- Es valida hasta que la onda de presión reflejada, regresa al punto, donde se generó el cambio de velocidad  $\Delta V$  (la válvula).
- La velocidad de propagación de la onda es muy grande comparada con la velocidad del fluido (unas 100 veces)
- El valor de  $\Delta H$  obtenido es puntual y no toma en cuenta que el fenómeno sea transitorio.

### **I.3.3) Propagación de la onda de presión sin fricción**

Para explicar la propagación y la reflexión de onda de presión, se discutirá la secuencia de eventos causados por el cierre de una válvula, ubicada al final de una tubería conectada a un tanque o reservorio. Con la finalidad de simplificar el problema, se asumirá que la tubería tiene un diámetro constante. Por otra parte, no se consideraran pérdidas localizadas ni por fricción. La figura I.3.3.A.a, muestra la línea de gradiente hidráulico (HGL) en estado estacionario, para un fluido cuya velocidad es  $V_0$  en  $t = 0$  (no se ha cerrado la válvula todavía). Si suponemos que la válvula se cierra instantáneamente en  $t = 0$  segundos, el liquido que se encuentra muy cerca aguas arriba de la válvula entra en reposo, y el incremento de presión causa tanto que el diámetro de la tubería como la densidad del fluido aumente ligeramente. La onda de presión generada viaja aguas arriba de la válvula con velocidad  $a$ . Detrás de la onda, la línea de gradiente hidráulico se incrementa en  $\Delta H$  y

el líquido tiene velocidad cero. Adelante de la onda de presión, tanto la velocidad como la presión no han sido alteradas y mantienen los valores de estado estacionario del sistema. La figura I.3.3.A.b muestra las condiciones en la tubería para  $t = 0,75L/a$  segundos después del cierre de la válvula (en este caso, cierre instantáneo)

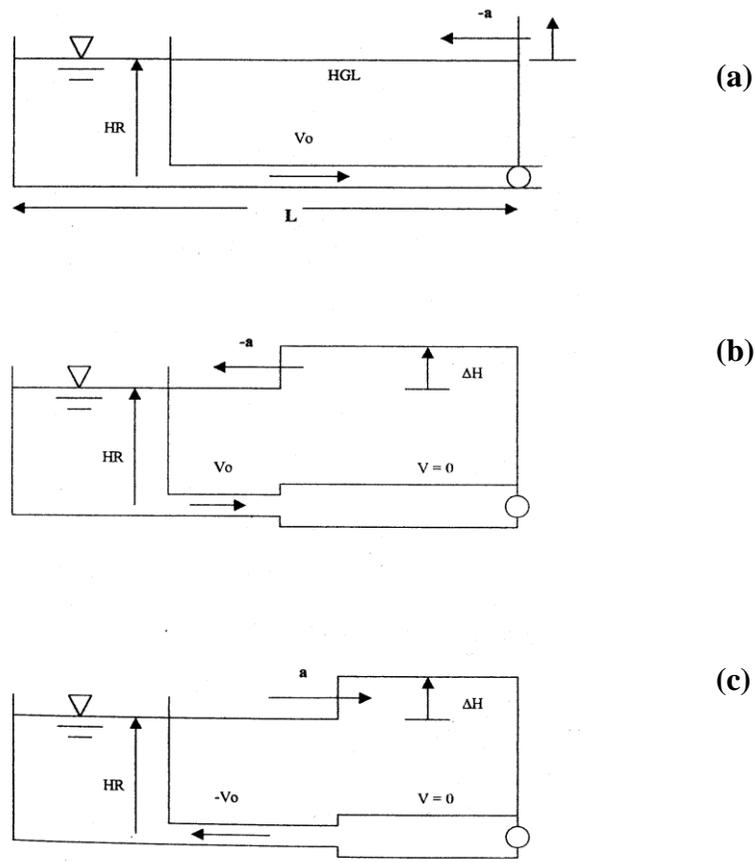
En  $t = L/a$  la onda de presión llega al reservorio. La presión dentro de toda la tubería es  $HR + \Delta H$ , la velocidad del fluido es cero, la tubería se ha expandido y el líquido se ha comprimido. En el reservorio la presión será siempre  $HR$  (altura piezométrica dentro del reservorio), debido a que la altura del fluido dentro del mismo se supone constante. En este momento el sistema se encuentra en desequilibrio, lo cual ocasiona que haya flujo de la tubería hacia el reservorio con velocidad  $-V_0$ . La velocidad de reversa es igual a la inicial ya que se han ignorado las pérdidas por fricción.

Un diferencial de tiempo después de  $t = L/a$ , una onda de presión negativa con magnitud  $-\Delta H$  viaja hacia la válvula con velocidad  $a$  (el líquido sigue entrando en el reservorio). Esto se conoce como reflexión de la onda original, causando que la presión de tras de la onda baje disminuya hasta  $HR$  y la velocidad del fluido sea  $-V_0$ . El diámetro de la tubería y la densidad del fluido regresan a sus valores originales, a medida de que la onda se desplaza aguas abajo. En frente de la onda, la presión permanece constante como  $HR + \Delta H$  y la velocidad del fluido es cero. La figura I.3.3.A.c muestra las condiciones para  $t = 1,5L/a$ .

Cuando la onda de presión llega a la válvula en  $t = 2L/a$  segundos, mejor conocido como tiempo de fase, se dice que ha ocurrido una reflexión completa de la onda de presión. Por un instante la velocidad del fluido es  $-V_0$  en toda la tubería, la presión es  $HR$  y tanto el diámetro como la densidad tienen sus valores originales. En este momento, el líquido en la válvula trata de moverse hacia el reservorio con velocidad  $-V_0$ . Como la válvula esta cerrada, se genera una fuerza de tensión entre esta y el fluido causando una caída de presión  $-\Delta H$ . Para ver esto con claridad podría usarse el ejemplo de una inyectora, a la cual se le tapa la punta a la vez que se hala el pistón interno, creando así una presión de vacío en el interior de la inyectora. La onda de presión negativa que se ha generado, viaja hacia el reservorio con velocidad  $a$ . Detrás de la onda la presión en la tubería es  $HR - \Delta H$ , la velocidad del fluido es cero y tanto la velocidad como el diámetro se reduce ligeramente.

Delante de la onda, el líquido continúa moviéndose con velocidad  $-V_0$  hacia el reservorio y la presión es  $HR$ . La figura I.3.3.A.d muestra las condiciones para  $t = 2,25L/a$ .

Para  $t = L/a$ , la onda negativa ha llegado al reservorio. La presión en la tubería es  $HR - \Delta H$  y la velocidad del fluido es momentáneamente cero en toda la tubería. El desbalance de presiones hace que se establezca un flujo del tanque hacia la tubería con velocidad  $V_0$  aumentando la presión hasta  $HR$ . A medida que esta nueva onda positiva se desplaza hacia la válvula, la velocidad y la presión detrás de ella, regresan a sus valores iniciales de estado estacionario (Ver figura I.3.3.A). Luego el proceso se repetirá periódicamente cada  $4L/a$  segundos (ver figura I.3.3.B). Para casos reales considerando la fricción, la onda cuadrada, rápidamente se transforma en una senoide que se atenúa con el tiempo. La atenuación es causada por pérdidas de energía debidas a la fricción, expansión de la tubería y compresión del fluido (ver figura I.3.3.C).



**Figura I.3.3.A Propagación de la onda de presión sin fricción**

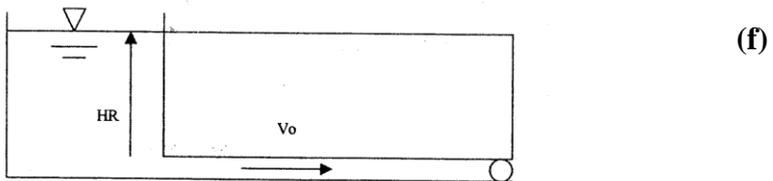
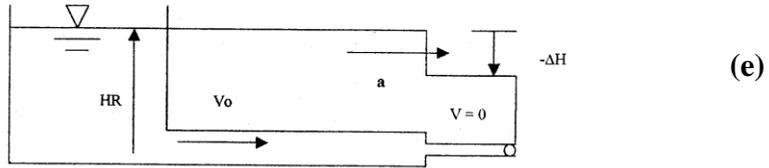
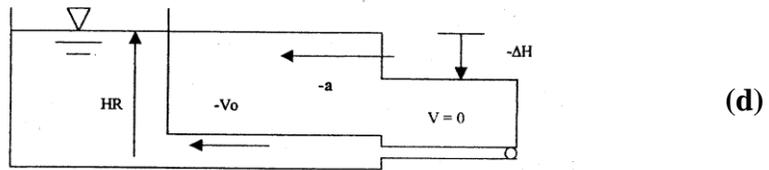
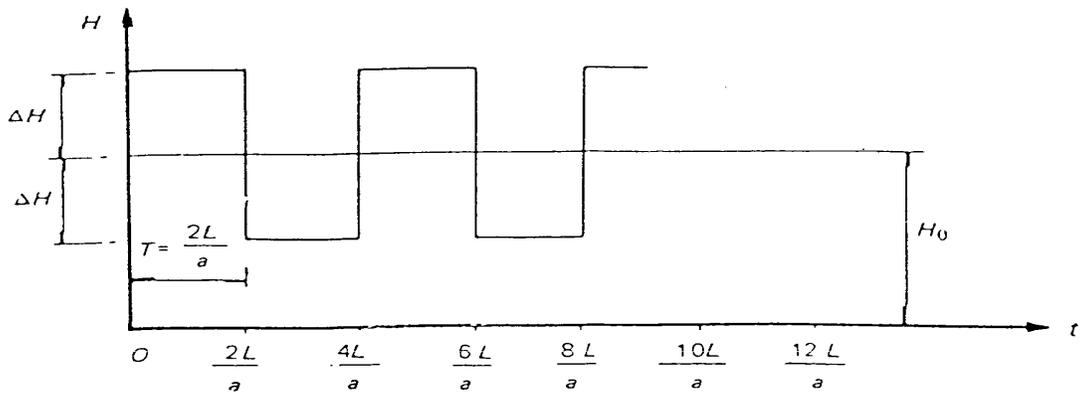
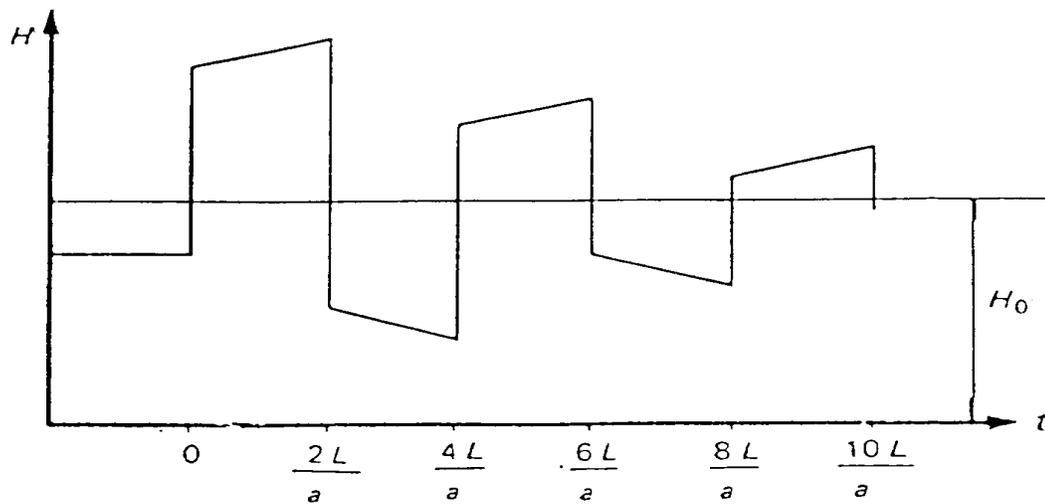


Figura I.3.3.A (Continuación) Propagación de la onda de presión sin fricción



Gráfica I.3.3.B Evolución transitoria de la sobrepresión durante el cierre instantáneo de una válvula



**Gráfica I.3.3.C Evolución transitoria de la sobrepresión durante el cierre instantáneo de una válvula tomando en cuenta la fricción**

En la sección anterior se introdujo el término cierre instantáneo, para describir el tiempo de cierre de una válvula. El cierre instantáneo normalmente se refiere a un tiempo infinitesimal. No obstante, en los casos reales este término tiene valores finitos y determinados; pudiéndose definir, como el mayor tiempo en que la válvula puede ser cerrada y todavía causar un incremento de presión, se ha podido determinar que para un tiempo de cierre menor o igual al de fase ( $t = 2L/a$ ) el incremento de presión en la válvula será el mismo que si esta fuese cerrada instantáneamente. Esto debido a que la onda reflejada no ha tenido tiempo de llegar a la válvula.

Si el cierre de la válvula es lento, la magnitud de la sobrepresión generada depende de la ley de cierre de la válvula, la cual indica la variación del área efectiva de flujo con el tiempo, durante la maniobra de cierre. En este caso las sobrepresiones serán menores que si el cierre fuese instantáneo, disminuyendo éstas conforme se aumenta el tiempo de cierre.

De lo anterior se concluye, que es muy importante que tan rápido puede hacerse los cierres de válvulas, con la finalidad de mantener las sobrepresiones bajo límites tolerables, tanto para la tubería como para los accesorios y equipos que constituyen el sistema de estudio. Por otra parte se tiene, que las depresiones también pueden ser controladas

variando el tiempo de cierre, ya que las mismas son un reflejo o una fracción de las sobrepresiones originales.

#### **I.3.4) Velocidad de propagación de onda**

El incremento de presión es directamente proporcional a la velocidad de onda (e.c. I.3.2.A). Por ende la velocidad de propagación, constituye un parámetro que tiene que ser evaluado con precisión para cada sistema. La magnitud depende de diversos factores como son: la densidad y el módulo de compresibilidad del líquido, la elasticidad, el diámetro y el espesor de la tubería y la presencia de aire o gas en el líquido.

La ecuación para la velocidad de onda se obtiene de la siguiente forma: 1) aplicando la ecuación de continuidad, 2) usando la ecuación I.3.2.A para relacionar  $\Delta V$  con  $\Delta H$ , 3) relacionando  $\Delta H$  con el módulo de compresibilidad del líquido y 4) relacionando la expansión de la tubería con sus propiedades esfuerzo- deformación.

Si consideramos una tubería sencilla como la de la figura I.3.2.A. Para  $t = L/a$  segundos después del cierre instantáneo de la válvula, la velocidad del líquido es cero, la tubería se ha expandido en diámetro (y posiblemente en longitud) y el fluido se ha comprimido. La masa total que ha entrado en la tubería es  $\rho AV_0 L/a$ . La masa que se ha acumulado debido a la elongación de la tubería, es pequeña comparada con otros factores y por lo tanto la ignoramos. La cantidad de masa acumulada debido al aumento del diámetro de la tubería es  $\rho L \Delta A$  y la masa acumulada por el aumento de densidad es  $LA \Delta \rho$ . Sustituyendo estos términos en la ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\rho AV_0 L}{a} = \rho L \Delta A + LA \Delta \rho \quad \text{e.c. I.3.4.A}$$

Dividiendo por  $\rho AL$  y reemplazando  $V_0$  con  $g\Delta H/a$  de la ecuación I.3.2.A

$$\frac{g\Delta H}{a^2} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{e.c. I.3.4.B}$$

Despejando  $a^2$  tenemos:

$$a^2 = \frac{g\Delta H}{\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}} \quad \text{e.c. I.3.4.C}$$

Es mas conveniente expresar la velocidad, en términos de las propiedades de la tubería y el fluido, las cuales son más fáciles de obtener. Usando la definición del módulo de compresibilidad del líquido (Modulo de Bulk) el cual representa matemáticamente la relación que existe entre el incremento de presión y el correspondiente cambio de volumen unitario.

$$K = \frac{\Delta P}{\Delta \rho / \rho} \quad \text{e.c. I.3.4.D}$$

$$\Delta P = \rho g \Delta H \quad \text{e.c. I.3.4.E}$$

Sustituyendo estas dos ultimas expresiones en la ecuación I.3.4.C y multiplicando el numerador y denominador por  $K/\Delta\rho$  se obtiene:

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + K\Delta A / A\Delta P} \quad \text{e.c. I.3.4.F}$$

Luego es necesario relacionar  $\Delta A/\Delta P$  con las propiedades de esfuerzo-deformación de la tubería. El esfuerzo de tracción ( $\sigma$ ) y la deformación ( $\varepsilon$ ) circunferencial se relacionan por el modulo de Young (E):

$$\varepsilon = \sigma / E \quad \text{e.c. I.3.4.G}$$

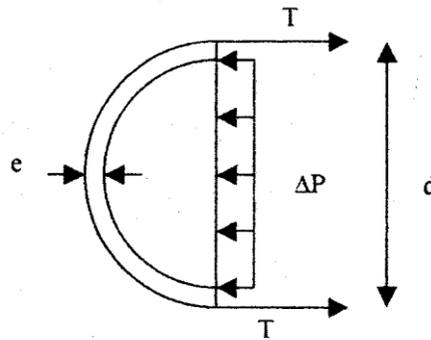
El esfuerzo de tracción para una tubería de pared delgada, se puede relacionar con el diámetro y la presión de la tubería. La figura I.3.4.A muestra la sección transversal de una tubería de longitud unitaria con espesor  $e$ , la cual esta sujeta a un incremento de presión  $\Delta P$ .

El incremento de la fuerza de tensión circunferencial  $T$ , el esfuerzo y  $\Delta P$  se relacionan por la condición de equilibrio estático  $\sum F_x = 0$

$$2T - d\Delta P = 0 \quad \text{e.c. I.3.4.H}$$

$$T = e \cdot \sigma \quad \text{e.c. I.3.4.I}$$

$$\sigma = d\Delta P / 2e \quad \text{e.c. I.3.4.J}$$



**Figura I.3.4.A Diagrama de cuerpo libre de una sección de tubería**

La deformación radial será (combinando las ecuaciones I.3.4.G y I.3.4.J)

$$\varepsilon = d\Delta P / 2e \cdot E \quad \text{e.c. I.3.4.K}$$

$\Delta A$  es igual al perímetro de la tubería por el incremento en el radio de esta.

$$\Delta A = \pi D \frac{d\Delta P}{2eE} \frac{d}{2} = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\Delta P d}{eE} = \frac{A\Delta P d}{eE} \quad \text{e.c. I.3.4.L}$$

Sustituyendo la e.c. I.3.4.L en la e.c. I.3.4.F y tomando la raíz cuadrada tenemos:

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + Kd/Ee}} \quad \text{e.c. I.3.4.M}$$

Si se desea incluir los efectos del anclaje de la tubería, la ecuación vendrá dada por:

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + (Kd/Ee)C}} \quad \text{e.c. I.3.4.N}$$

En donde:

**Caso 1.** La tubería esta anclada en ambos extremos en contra de cualquier movimiento axial.

$$C = \frac{2t}{d}(1 + \mu) + \frac{d(1 - \mu^2)}{d + t} \quad \text{e.c. I.3.4.O}$$

**Caso 2.** La tubería se encuentra anclada solamente en su extremo aguas arriba.

$$C = \frac{2t}{d}(1 + \mu) + \frac{d(1 - \mu/2)}{d + t} \quad \text{e.c. I.3.4.P}$$

**Caso 3.** Para una tubería en que cada sección esta anclada con juntas de expansión en cada sección.

$$C = \frac{2t}{d}(1 + \mu) + \frac{d}{d + t} \quad \text{e.c. I.3.4.Q}$$

Las ecuaciones I.3.4.M y I.3.4.N son solo para tuberías de sección circular de pared delgada.

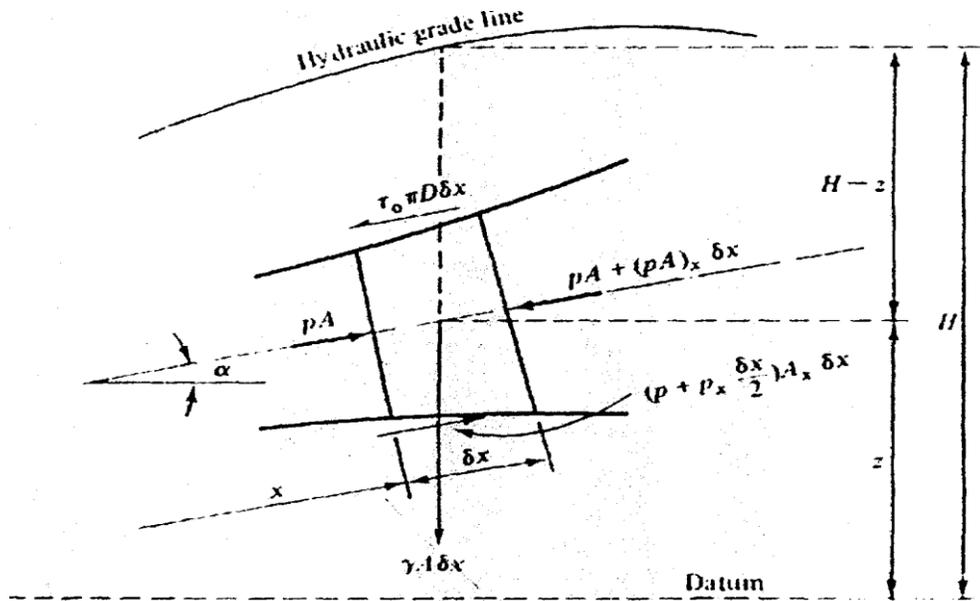
En el apéndice A.7 se muestra los módulos de elasticidad y el coeficiente de Poisson, de los materiales utilizados.

### **I.3.5) Ecuaciones diferenciales básicas para flujo transitorio**

#### **I.3.5.A) Ecuación de momentum**

La ecuación de momentum o segunda ley de Newton es desarrollada para el flujo de líquido a través de un tubo cónico (Extracto de Wylie, E. Benjamín y Streeter, Victor I., “Fluid Transients in Systems”). El tubo es permanentemente llenado con un fluido de densidad de masa  $\rho$ . Una presión promedio de sección igual a la presión de la línea central del tubo  $p(x,t)$  y una velocidad promedio de sección  $v(x,t)$  son asumidas en el desarrollo de la ecuación unidimensional. Para algunas aplicaciones la presión es transformada a línea de nivel hidráulico  $H(x,t)$ , algunas veces llamada energía piezométrica. La distancia  $x$  y el tiempo  $t$  son variables independientes.

La figura I.3.5.A muestra un cuerpo libre del fluido de área de sección  $A$  a una distancia  $x$  y de espesor  $\delta x$ . El área  $A$  es, en general, una función de  $x$ , siendo esta última la coordenada de la distancia a lo largo del eje central de la tubería desde un origen arbitrario. El tubo se encuentra inclinado con respecto a la horizontal con un ángulo  $\alpha$ , positivo cuando la inclinación incrementa en  $+x$  dirección. Las fuerzas sobre el cuerpo libre en la dirección  $x$  son la presión normal de contacto sobre las caras transversales, y los componentes de fuerza de corte y presión sobre la periferia. En adición la fuerza de gravedad tiene una componente en dirección  $x$ . El esfuerzo de corte  $\tau_0$  se considera que actúa en dirección  $-x$ . Con referencia a la figura, se establece que la sumatoria de las fuerzas externas aplicadas sobre el elemento de fluido son equivalentes al cambio de su cantidad de movimiento, esto es la derivada de la cantidad de masa por velocidad, como en este caso la masa no varía, queda masa por la derivada en el tiempo de la velocidad, es decir la aceleración.



**Figura I.3.5.A: Diagrama de cuerpo libre, fundamento del desarrollo de la ecuación de momentum**

En consecuencia tenemos:

$$pA - [pA + (pA)_x \delta_x] + \left( p + p_x \frac{\delta_x}{2} \right) A_x \delta_x - \tau_0 \pi D \delta_x - \rho g A \delta_x \text{sen} \alpha = \rho A \delta_x V \quad \text{e.c. I.3.5.A}$$

Despreciando los términos que contienen  $(\delta_x)^2$  y simplificando, nosotros obtenemos:

$$p_x A + \tau_0 \pi D + \rho g A \text{sen} \alpha + \rho A V = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.B}$$

Para los cálculos en flujo transitorio el esfuerzo cortante  $\tau_0$  es considerado el mismo que si se tratase de flujo estable, esto en términos de factor de fricción de Darcy-Weisbach es:

$$\tau_0 = \frac{\rho f V |V|}{8} \quad \text{e.c. I.3.5.C}$$

Esta ecuación es desarrollada a partir de la ecuación de Darcy- Weisbach,

$$\Delta p = \frac{\rho f L}{D} \frac{V^2}{2} \quad \text{e.c. I.3. 5.D}$$

en donde L es la longitud horizontal de la tubería, y a partir de un balance de fuerzas en la tubería en flujo estable.

$$\Delta p \frac{\pi D^2}{4} = \tau_0 \pi D L \quad \text{e.c. I.3.5.E}$$

El signo de valor absoluto sobre la velocidad en la e.c. I.3.5.C asegura que el esfuerzo cortante siempre es opuesto a la dirección de la velocidad del flujo.

El termino de aceleración  $\dot{V}$  de la e.c. I.3.5.A es para una partícula del fluido que tiene velocidad  $V$ , así pues

$$\dot{V} = VV_x + V_t \quad \text{e.c.I.3.5.F}$$

Sustituyendo la e.c I.3.5.C y la e.c I.3.5.F en la e.c I.3.5.A, esta toma la forma:

$$\frac{p_x}{\rho} + V_x V + V_t + g \sin \alpha + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.G}$$

Es de practica común que para los casos de flujo transitorio en donde el numero de Mach es bajo, se excluya el termino  $VV_x$  de la ecuación, tomando esta la sigue forma:

$$\frac{p_x}{\rho} + V_t + g \sin \alpha + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.H}$$

La altura piezométrica H puede remplazar a P. De la Figura I.3.5.A

$$p = \rho g(H - Z) \quad \text{e.c. I.3.5.I}$$

donde Z es la elevación de la línea central de la tubería en la posición x. Entonces:

$$p_x = \rho g(H_x - Z_x) = \rho g(H_x - \text{sen}\alpha) \quad \text{e.c. I.3.5.J}$$

Esta diferenciación parcial consideró que la densidad es sustancialmente constante comparada con la variación en H o Z, esto es consistente con la suposición que se realizó  $\rho = \text{cte}$ , la cual, nos permitió asumir  $V_x = 0$  para la e.c I.3.5.G. De esta manera tenemos:

$$gH_x + V_t + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.K}$$

La e.c I.3.5.G es válida para cualquier fluido. La e.c. I.3.5.H y e.c I.3.5.K están restringidas para fluidos de muy poca compresibilidad, tales como líquidos fluyendo a bajas velocidades.

### **I.3.5.B) Ecuación de continuidad**

En esta sección se presentará la derivación de la ecuación unidimensional de continuidad desarrollada por T. P. Propson. Esta es bastante general y tiene la ventaja de reseñar varias de las derivadas totales (Extracto de Wylie, E. Benjamín y Streeter, Victor I., “Fluid Transients in Systems”).

La ecuación de continuidad establece en términos simples que el flujo neto de masa a través de la superficie de control, tiene que ser igual a la tasa de cambio de masa dentro del volumen de control. En este caso nuestro volumen de control está representado por el diferencial de fluido. Dentro de este volumen de control no hay generación de masa, por lo tanto la ecuación de continuidad queda al analizar la Figura I.3.5.B

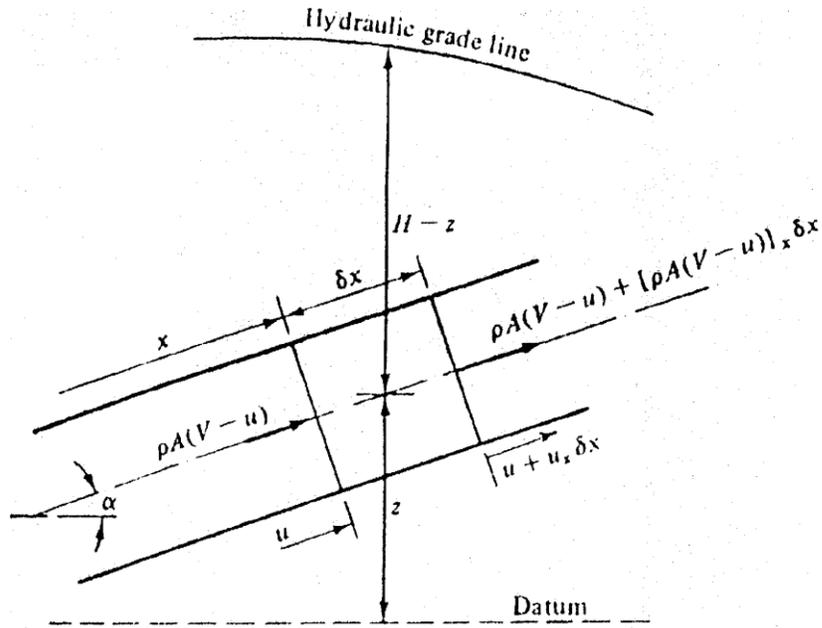


Figura I.3.5.B. Volumen de control para el desarrollo de la ecuación de continuidad.

$$-[\rho A(V - u)]_x \delta x = \frac{D'}{Dt} (\rho A \delta x) \quad \text{e.c. I.3.5.L}$$

Considerando la cara aguas arriba del volumen de control en  $x$  y siendo  $u$  la velocidad relativa de la pared de la tubería en  $x$ . La derivada total con respecto al movimiento axial de la tubería esta dada por:

$$\frac{D'}{Dt} = u \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{e.c. I.3.5.M}$$

y el tiempo de variación de incremento de la longitud  $\delta x$  del volumen de control esta dado por:

$$\frac{D'}{Dt} \delta x = u_x \delta x \quad \text{e.c. I.3.5.N}$$

Por expansiones parciales y el uso de la ecuación anterior tenemos:

$$(\rho Av)_x - (\rho Au)_x + \frac{D}{Dt}(\rho A) + \rho Au_x = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.M}$$

Adicional expansión de la ecuación anterior, usando la ley de la e.c.I.3.5.M

$$(\rho Av)_x - (\rho A)_x u - \rho Au_x + u(\rho A)_x + (\rho A)_t + \rho Au_x = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.O}$$

o por simplificación:

$$(\rho Av)_x + (\rho A)_t = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.P}$$

ecuación la cuál puede ser escrita como:

$$\rho AV_x + V(\rho A)_x + (\rho A)_t = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.Q}$$

los últimos dos términos representan la derivada de  $\rho A$  con respecto al movimiento de una partícula.

$$\frac{1}{\rho A} \frac{D}{Dt}(\rho A) + V_x = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.R}$$

en donde

$$\frac{D}{Dt} = V \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial t} \quad \text{e.c. I.3.5.S}$$

Sustituyendo tenemos

$$\frac{\dot{A}}{A} + \frac{\dot{\rho}}{\rho} + v_x = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.T}$$

Esta ecuación aplica para tuberías convergentes o divergentes, así mismo, para tuberías cilíndricas inclinadas o horizontales. Esto es además valido para cualquier fluido que llene la sección, y para tuberías rígidas o altamente deformables, al no haber sido requeridas suposiciones simplificadoras.

El segundo término de la e.c.I.3.5.T toma en consideración la compresibilidad del fluido. La presión es introducida con la definición de modulo de Bulk de la elasticidad de un fluido, Esta substitución excluye los efectos termodinámicos, limitando de esta forma los resultados de la ecuación a fluidos ligeramente compresibles solamente.

$$\frac{\dot{\rho}}{\rho} = \frac{\dot{p}}{K} \quad \text{e.c. I.3.5.U}$$

El primer termino de la e.c.I.3.5.T trata con la elasticidad de la pared de la tubería y su rata de deformación con la presión. El área es solamente función de la presión

$$\dot{A} = \frac{dA}{dp} \dot{p} \quad \text{e.c. I.3.5.V}$$

Substituyendo las ecuaciones I.3.5.U y I.3.5.V en I.3.5.T tenemos

$$v_x + \frac{\dot{p}}{k} \left( 1 + \frac{k}{A} \frac{dA}{dp} \right) = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.W}$$

esta puede ser escrita como

$$\rho a^2 V_x + \dot{P} = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.X}$$

Está última es la ecuación unidimensional de conservación de masa para fluidos ligeramente compresibles en tuberías con cualquier inclinación. Cuando la elasticidad lineal del fluido y de la pared de la tubería son considerados, la cantidad  $a^2$  es tomada como una constante que incorpora la elasticidad de la tubería y del fluido que contiene.

Al desprestigiar los términos de transportación por ser pequeños con respecto a otros términos la e.c. I.3.5.X puede escribirse como

$$\rho a^2 V_x + p_t = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.Y}$$

la cuál es una ecuación de continuidad simplificada para bajos números de Machen flujos transitorios.

La altura piezométrica puede remplazar la presión de la misma manera que se hizo con la ecuación de movimiento  $p_t = \rho g H$

$$\frac{a^2 V_x}{g} + H_t = 0 \quad \text{e.c. I.3.5.Z}$$

La ecuación I.3.5.T es una forma general de la ecuación unidimensional de continuidad para flujo transitorio. La ecuación I.3.5.X es valida para fluidos ligeramente compresibles en los cuales la ecuación I.3.5.U puede ser aplicada. Las ecuaciones I.3.5.Y y I.3.5.Z están limitadas para números de Mach bajos.

# Capítulo II

## **Causas de Golpe de Ariete, Fenómenos relacionados con el Golpe de Ariete, Control y atenuación de los efectos del Golpe de Ariete.**

### **II.1) Causas del Golpe de Ariete**

El fenómeno de Golpe de Ariete puede originarse en sistemas de tuberías por diversas causas, siempre y cuando involucren cambios bruscos en la velocidad del fluido. Estos cambios están generalmente relacionados con el accionamiento de válvulas y bombas.

Los cálculos de Golpe de Ariete producidos por el cierre de válvulas están orientados a establecer un tiempo de cierre que permita minimizar las sobrepresiones generadas y que además sea compatible con la filosofía de operación y de parada de emergencia del sistema.

En el caso de estaciones de bombeo, siempre que exista una modificación en la velocidad de giro de las bombas se generará un régimen transitorio en el flujo. El caso más crítico de Golpe de Ariete ocurre cuando hay una detención accidental de las bombas, lo que puede originar sobrepresiones y depresiones considerables en las tuberías.

#### **II.1.1) Cierre de una válvula**

Como lo hemos mencionado las válvulas juegan un papel muy importante en los estudios de Golpe de Ariete, ya que el tiempo y la velocidad de cierre de las mismas son determinantes en la magnitud de las sobrepresiones generadas. Haciendo los cierres muy lentamente se puede llevar la magnitud de estas sobrepresiones a valores muy pequeños. Pero cierres muy lentos no son siempre favorables para el proceso o para situaciones de emergencia, como por ejemplo si se requiere cerrar una válvula debido a un derrame de un fluido tóxico o contaminante.

Si el tiempo de cierre de la válvula ocurre en un tiempo menor al tiempo de fase  $t = 2L/a$ , la onda reflejada no ha tenido tiempo de llegar a la válvula. La sobrepresión inicial viene dada por la e.c. I.3.2.A. Este valor es conocido como el valor extremo del Golpe de Ariete, y representa el valor máximo que puede alcanzar la onda de presión. Entonces el caso más desfavorable es el de cierre instantáneo de válvula, o lo que es lo mismo, cierres rápidos o menores que el tiempo de fase de la tubería aguas arriba. Es por esto que es deseable conocer que tan rápido pueden hacerse los cierres de las válvulas manteniendo las sobrepresiones bajos límites tolerables.

Si el cierre de la válvula es lento, la magnitud de la sobrepresión generada depende de la ley de cierre de la válvula, la cual indica la variación del área efectiva del flujo con el tiempo durante la maniobra del cierre. Los métodos propuestos consideran cierre instantáneo y cierre uniforme (variación lineal del área de flujo en la válvula, lo que indica velocidad de cierre constante).

### **II.1.2) Detención de una bomba**

El Golpe de Ariete en estaciones de bombeo puede ocurrir como resultado de diversas condiciones de operación, y el caso más crítico ocurre debido a una interrupción instantánea del suministro de potencia. En este caso, la operación de la bomba pasa por tres zonas o fases de funcionamiento, que son:

- **Zona de Operación de la Bomba:** En el instante en que falla el suministro de energía eléctrica, la bomba comienza a detenerse pues la única energía disponible para moverla es la energía cinética de los elementos rotantes del motor, de la bomba y la del agua que está entrando a la bomba. Como esta energía es usualmente pequeña comparada con la requerida para mantener el flujo en contra de la presión en la descarga, la reducción de la velocidad de giro de la bomba es rápida, y en consecuencia el flujo también se reduce.
- **Zona de Disipación de Energía:** La velocidad de la bomba se reduce a un punto donde no puede seguir bombeando en contra de la presión existente. Si no hay

válvula de retención ocurre una reversión del flujo mientras el rotor sigue girando en sentido original.

- Zona de Operación de Turbina: Cuando el rotor se detiene por completo la bomba comienza a girar en sentido contrario actuando como turbina, y a medida que la velocidad alcanza su valor máximo el flujo que circula invertido se reduce rápidamente

Como resultado de los cambios rápidos en el flujo cuando la bomba trabaja en Zona de Operación de la Bomba, se forman ondas de presión negativa que se desplazan a lo largo de la tubería de descarga, y ondas de presión positivas que viajan aguas arriba de la bomba por la tubería de succión (que generalmente se desprecian si la longitud de la tubería es pequeña). El fenómeno de propagación de estas ondas es similar al descrito en el caso de cierre de una válvula.

Como las ondas generadas inicialmente son negativas, puede ocurrir que la presión en la tubería de descarga alcance el valor de la presión de vaporización y se presente cavitación o separación de columna de líquido.

Ahora, si hay una válvula check en la tubería de descarga esta se cierra en lo que comienza la reversión del flujo y la bomba trabajará solo en la primera zona. El cierre de esta válvula produce una sobrepresión que se transmitirá de regreso aguas abajo. La magnitud de esta sobrepresión depende de la rapidez de cierre de la válvula, entre otros de los parámetros. Si se desprecian los efectos de la fricción y se asume que la válvula cierra rápidamente en el momento de inicio de la reversión de flujo, se puede suponer que la sobrepresión en la válvula es igual a la depresión inicial generada en la bomba. Sin embargo, si el cierre de ésta válvula se retrasa momentáneamente por alguna razón (mal funcionamiento, inercia de la válvula etc.), la sobrepresión en ese punto puede ser considerablemente más alta. Es importante destacar que el valor de la onda negativa inicial en la bomba es independiente de la presencia de la válvula check si el paro de la bomba es lento.

Para conocer el comportamiento de las ondas de presión en las tuberías de descarga es necesario conocer la inercia del motor y de la bomba, y las curvas características de la

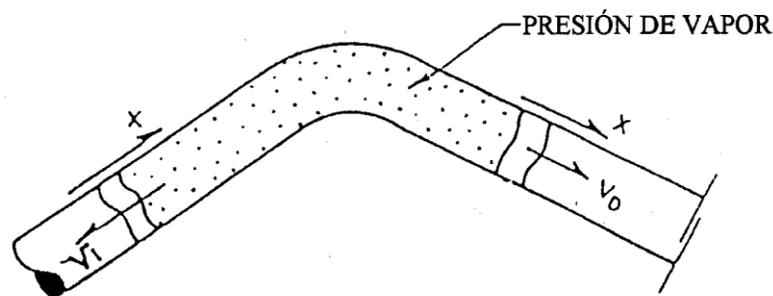
bomba en las tres zonas de operación, las cuales describen la variación del toque y la velocidad de giro en función del caudal y la presión. En la mayoría de los casos, el fabricante de la bomba sólo suministra la curva característica para la zona de operación de la bomba lo que permite una descripción bastante precisa del fenómeno hasta el punto donde comienza la reversión del flujo. Ahora, si existe una válvula check en la descarga solo se requiere conocer el comportamiento de la bomba cuando el flujo conserva dirección original.

Los métodos propuestos para resolver este caso de Golpe de Ariete se limitan al cálculo de las ondas iniciales de presión en la bomba y en la tubería de descarga, y el tiempo de detención de la bomba, entre otros. En uno de ellos es necesario conocer los parámetros de funcionamiento en condiciones normales de operación y la inercia del motor y de la bomba, además de las características de la tubería de descarga, mientras que en el otro método sólo hay que conocer el diferencial de presión en la bomba y los diámetros de las tuberías de succión y descarga.

## **II.2) Separación de columna de líquido**

Aparte de posibles daños en los equipos existentes en el sistema de tubería, el Golpe de Ariete puede causar que la tubería falla por excesiva presión o que falle por colapso debido a que la presión interna es menor que la presión atmosférica. El fenómeno de separación de columna puede ocurrir en un sistema de tubería cuando las condiciones de borde son tales que la presión en esta se vea disminuida. Una reducción de presión en el extremo aguas arriba de la tubería con flujo positivo provoca una pulsación negativa la cual se transmite aguas abajo, en consecuencia ocurre una reducción de velocidad; el fluido aguas abajo continua con su velocidad estable hasta que la onda llega. Esta diferencia de velocidades entre las dos porciones de flujo tiende a poner la columna de líquido en tensión, la cual los fluidos comerciales no pueden soportar. Cuando la presión de vapor es alcanzada, se forma una cavidad de vapor en la tubería. Cuando nos encontramos con un sistema de tubería con varias elevaciones, la separación de columna usualmente se forma cerca de uno de estos puntos altos que conforman el perfil. Esta cavidad tenderá a estar sobre el lado aguas abajo del punto alto, con el líquido fluyendo debajo de la cavidad como

se muestra en la figura II.2.A. Después de que la cavidad está formada esta puede continuar aumentando de volumen hasta que las velocidades de flujo de las dos columnas lleguen a ser iguales. Usualmente, la columna aguas arriba será acelerada y la de aguas abajo será desacelerada por las condiciones de borde, y la columna aguas arriba alcanzará la columna aguas abajo. Si la diferencia de velocidad en el instante del colapso de la cavidad de vapor es  $\Delta V$ , un incremento de presión de  $\rho a \Delta V / 2$  puede ser esperada. Este incremento de presión puede ser lo suficiente grande como para averiar la tubería.



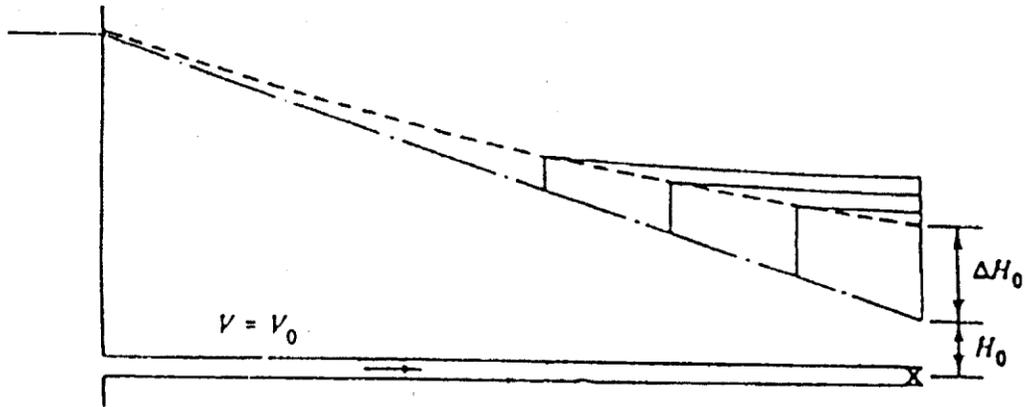
**Figura II.2.A: Fenómeno de la separación de columna de líquido**

### **II.3) Fenómenos relacionados con el Golpe de Ariete en Oleoductos**

Los estudios del fenómeno de Golpe de Ariete han sido desarrollados en su mayoría para sistemas de transporte de agua, pero existen ciertas diferencias importantes con relación a los oleoductos: las tuberías que transportan crudos generalmente son muy largas, están construidas de acero dúctil y presentan pérdidas por fricción considerables. Además, los hidrocarburos son, respecto al agua menos densos más viscosos y tienen una presión de vapor mayor.

En tuberías largas y en caso de fricción muy alta, como ocurre con 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 los efectos de la fricción la magnitud de esta onda disminuye a medida que se desplaza aguas arriba, el fenómeno es conocido como atenuación.



**Figura II.3.A Atenuación de la onda de presión en una tubería**

Por otro lado ocurre que la magnitud de la onda muchas veces no es suficiente para detener completamente el fluido a su paso. Cuando la onda de presión se transmite en la tubería se encuentra con 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 (donde el fluido se detuvo completamente). Esto ocasiona que la presión en la válvula continúe aumentando un cierto tiempo después de que se generó la primera onda. Este fenómeno de aumento de presión luego de que la onda de presión pasa es llamado **“line pack”**.

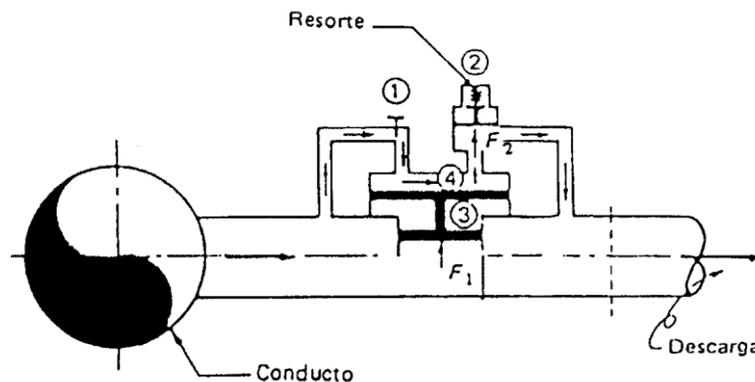
#### **II.4) Control y atenuación de los efectos del Golpe de Ariete**

La situación ideal en el diseño de un sistema de tuberías es la especificación de los elementos del sistema de manera de soportar y/o minimizar los efectos indeseables del Golpe de Ariete. Desafortunadamente no siempre es el caso, y se requiere del uso de dispositivos para el control de los mismos.

La selección de los dispositivos apropiados para el control de los efectos del Golpe de ariete no solo necesita un estudio adecuado de su efectividad, sino de los costos iniciales y las características de mantenimiento que requiere, para así llevar a cabo la selección que tenga mejor respuesta ante el fenómeno y a su vez resulte factible económicamente.

#### II.4.1) Válvulas de Alivio

Estas válvulas son dispositivos diseñados de forma tal que cuando la presión en la tubería tiende a sobrepasar cierto valor prefijado, se acciona un mecanismo de apertura que permite una transformación de la energía de presión en energía cinética del flujo de descarga, aliviando así la sobrepresión.



**Figura II.4.1.A Válvula de alivio de presión**

Estas válvulas están constituidas por elementos que se indican en la figura II.4.1.A y su funcionamiento es el siguiente:

En condiciones normales de operación la válvula 1 permanece con un cierto grado de apertura previamente calibrado, mientras que la 2, constituida por un mecanismo de resorte se encuentra cerrada, de manera tal que en la cámara 4 y en el mecanismo de la válvula 3 permanece cerrada.

Al producirse un aumento de presión en la tubería que sobrepasa la presión prefijada para mantener cerrada la válvula 2, se genera una fuerza  $F_2$ , se abre parcialmente la válvula y permite tanto el flujo a través de ella hacia la descarga como una reducción de presión en la cámara, y la generación de una fuerza  $F_1$  en el mecanismo de la válvula principal 3 que da lugar a que esta inicie su apertura hasta que la presión y el gasto alcanzan valores máximos en el instante en que se presenta la apertura total.

Como consecuencia del volumen descargado por la válvula principal, la presión en la tubería disminuye, y cuando alcanza cierto valor prefijado la válvula 2 se cierra y se establece un nuevo equilibrio de fuerzas en mecanismo de la válvula principal que ocasiona el cierre de esta.

El elemento obturador de las partes móviles de las válvulas de alivio debe tener poca inercia y diseñarse de manera tal que responda rápidamente a los cambios de presión.

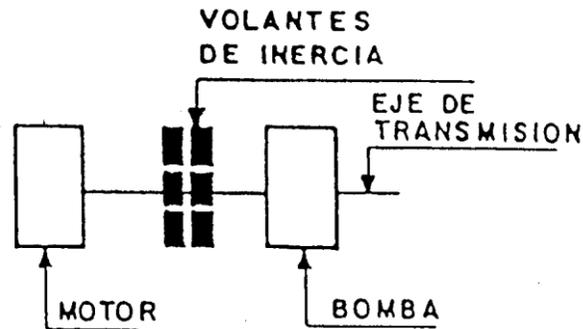
#### **II.4.2) Volantes de inercia**

Según la ecuación de inercia del conjunto moto-bomba:

$$M = -I \frac{d\omega}{dt} \quad \text{e.c. II.4.2.A}$$

se comprueba que mientras sea mayor el momento de inercia de las partes rotatorias del motor y de la bomba, menor es la desaceleración angular  $d\omega/dt$ , por lo que más lentamente se detendrá el conjunto cuando falle el suministro de la energía eléctrica.

Dependiendo de las características de las bombas y del sistema de bombeo, en ciertos casos se pueden usar volantes de inercia como elementos de atenuación del Golpe de Ariete. Los volantes de inercia están generalmente constituidos por discos metálicos que se hacen solidarios al eje de transmisión de potencia ver figura II.4.2.A, aumentando así el momento de inercia del conjunto moto-bomba.



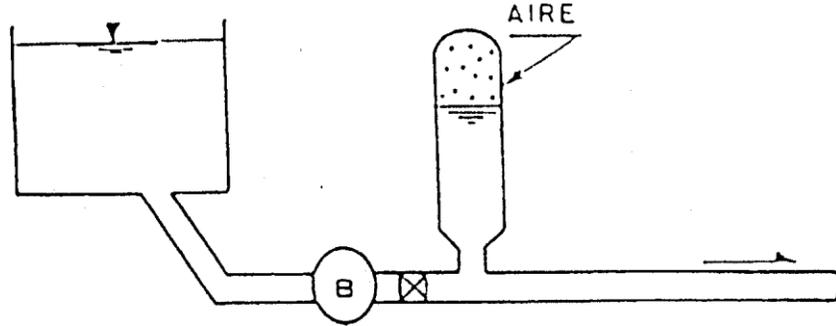
**Figura II.4.2.A Esquema de volante de inercia**

La limitación que presentan los volantes de inercia es que la inercia adicional necesaria no debe sobrepasar el requerimiento electromecánico del motor, especialmente en su fase de arranque. Su aplicabilidad se restringe a bombas horizontales.

### **II.4.3) Tanques de aire comprimido**

Los tanques de aire comprimido son elementos que se instalan generalmente en estaciones de bombeo para controlar tanto las depresiones como las sobrepresiones.

Cuando ocurre el fallo de suministro de energía eléctrica, y comienza a detenerse las bombas, la presión en la base del tanque disminuye (ver figura II.4.3.A), y como el aire que se encuentra en su interior está a una presión similar a la del régimen permanente, se establece un flujo del tanque a la tubería, aliviando así las depresiones. Por otra parte, las sobrepresiones generadas en fases posteriores del desarrollo del fenómeno de Golpe de Ariete también son disminuidas por el flujo que ingresa al tanque.



**Figura II.4.3.A Esquema de colocación de un tanque de aire comprimido**

Las dimensiones del tanque deben determinarse de que evite el ingreso de aire a la tubería a la vez que controle los efectos de Golpe de Ariete. Su funcionamiento es bastante seguro, pues el mantenimiento está asociado básicamente al compresor, necesario para reponer el aire que se pierde por dilución o por fugas.

## **II.5) Sistemas a evaluar**

Debido a que la ocurrencia del Golpe de Ariete puede comprometer la seguridad e integridad del sistema de tuberías, es importante definir aquellos sistemas que requieran análisis de este fenómeno. El código ASME B31 establece que deben calcularse las variaciones de presión originadas por el Golpe de Ariete para ser tomadas en cuenta en la determinación de la presión de diseño.

No existe un criterio específico para saber si un determinado sistema requiere de un estudio de Golpe de Ariete, pero en general, **aquellos sistemas de tuberías de gran diámetro y gran longitud se consideran críticos para los efectos del Golpe de Ariete.** Esto se debe principalmente a que:

- Las líneas de gran diámetro generalmente manejan grandes caudales, y la magnitud de la variación inicial de la presión de un sistema sujeto a Golpe de Ariete es mayor para sistemas que manejan grandes caudales.

- Las líneas de gran longitud requieren tiempos de cierre de válvulas mayores para minimizar la magnitud de las sobrepresiones.

Además, si los sistemas tienen las siguientes características, es mayor la necesidad del Golpe de Ariete:

- Líneas con estación de bombeo intermedia: la detención de bombas puede ocasionar Golpe de Ariete si no es un proceso debidamente controlado.
- Líneas sujetas a paradas de emergencia: una situación de emergencia implica generalmente cierres rápidos de válvulas, lo cual puede ocasionar Golpe de Ariete.
- Líneas cuya rotura representa gran peligro para terceros o produzcan graves daños ambientales.
- Líneas críticas para la operación: líneas cuyo servicio sea indispensable para el funcionamiento de una planta, refinería etc.
- Líneas que el cliente solicite.

# Capítulo III

## Métodos de Calculo de Golpe de ariete, Método de las características con diferencias finitas

### III.1) Principales Métodos de Cálculo del Golpe de Ariete

Los métodos más utilizados para la resolución de problemas que involucren flujo transitorio o no permanente, se basan en la resolución de expresiones derivadas de la ecuación de continuidad, movimiento y en algunos casos de la ecuación de energía. A partir de estas ecuaciones básicas, diferentes métodos, emplean diferentes suposiciones. A continuación se hace un pequeño resumen de los métodos más comunes.

#### III.1.1) Método Aritmético

Las ecuaciones que se resuelven con este método desprecian la fricción y los efectos de la inclinación de la tubería. Incluyendo las condiciones de borde se logra obtener una tabla de valores de presión y velocidad para cada paso de tiempo, usualmente de  $L/a$ .

El desarrollo teórico del método es simple pero cuando se obtienen se debe tener presente que no se toma en cuenta la fricción. Este método fue utilizado hasta el principio de la década de los treinta, cuando el método gráfico fue desarrollado.

#### III.1.2) Método Gráfico

El desarrollo teórico desprecia la fricción pero se pueden hacer correcciones para tomarla en cuenta. Se utilizan las ecuaciones de continuidad y de movimiento en derivadas parciales y una derivación de la ecuación de onda mecánica.

Siendo un método gráfico la solución obtenida permite una fácil visualización del fenómeno, pero al mismo tiempo muchas veces no puede aportar la precisión requerida, especialmente para sistemas complejos.

### **III.1.3) Método Algebraico**

Es una particularización del método de las características. Las ecuaciones en diferencias finitas para las condiciones de borde se aplican para la longitud total de la tubería, se obtienen dos ecuaciones algebraicas no lineales que incluyen los efectos de la fricción para cada tubería.

El método provee resultados bastante precisos porque toma en cuenta la fricción no lineal sin embargo las ecuaciones pueden ser difíciles de manipular en algunos casos.

### **III.1.4) Método de las Ondas Físicas**

El Método de las Ondas Físicas consiste en identificar en una sección determinada de la tubería, las ondas directas transmitidas y/o reflejadas en un periodo de tiempo suficientemente largo después de la aparición de la perturbación. A su momento dado, en esta sección, la presión será igual a la sumatoria de todas estas ondas más la presión nominal.

Este método permite calcular el flujo transitorio en las tuberías y posee un modelo matemático discreto sin ecuaciones diferenciales. El Método de las Ondas Físicas usualmente se utilizaba solamente para calcular el incremento de la presión en la primera fase, es decir, hasta que la onda reflejada regresaba a la válvula. En la tesis doctoral de H.H. Bernhart (1977) se hizo un progreso al calcular la intensidad de la onda de presión en la segunda fase poniendo en evidencia la dificultad del conteo del gran número de ondas reflejadas y transmitidas en una tubería con ramificaciones.

En los trabajos de S. Zarea y N. Vasiliu (1973,1974,1975), se generaliza el método de las Ondas Físicas y se desarrollan formulas generales que permiten calcular el valor de la presión y el caudal en cualquier sección de la tubería unifilar, en serie, ramificadas, con o sin protección. El método es sencillo, fácil de entender y aplicar.

### **III.1.5) Método de la impedancia**

Este método resuelve casos de flujo oscilatorio. Se utiliza la teoría de las líneas eléctricas de transmisión. Se utiliza la fricción no lineal para el componente promedio del flujo y lineal para el componente oscilatorio.

El método se puede aplicar a sistemas complejos pudiendo determinar los periodos fundamental y armónico. Para las condiciones de borde se debe hacer un desarrollo de las series de Fourier para cada caso.

### **III.1.6) Método de las características**

Este método se basa en la transformación de las ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad, las cuales forman un par de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. La conversión de estas ecuaciones en ecuaciones diferenciales ordinarias, resolviéndolas luego mediante a un esquema explícito de diferencias finitas, permite hallar las condiciones de flujo generadas por el Golpe de Ariete.

## **III.2) Desarrollo del Método de las Características**

En esta sección se desarrollaran las ecuaciones empleadas para aplicar el método de las características, para ello es necesario partir de las ecuaciones desarrolladas en el análisis de cantidad de movimiento y continuidad (Extracto de Wylie, E. Benjamín y Streeter, Victor I., “Fluid Transients in Systems”).

### **III.2.1) Ecuaciones características**

Las ecuaciones de Continuidad y Movimiento forman un par de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas cuasiliniars en términos de dos variables dependientes, velocidad y altura piezométrica, y dos variables independientes, distancia a lo largo de la tubería y tiempo. Las ecuaciones son transformadas en cuatro ecuaciones diferenciales

ordinarias a través del método de las características. En esta sección los términos de menor importancia son omitidos de las ecuaciones para proveer la introducción más simple posible en el análisis teórico de una tubería simple.

Las ecuaciones simplificadas de movimiento y continuidad son identificadas como  $L_1$  Y  $L_2$

$$L_1 = gH_x + V_t + \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad \text{e.c. III.2.1.A}$$

$$L_2 = \frac{a^2 V_x}{g} + H_t = 0 \quad \text{e.c. III.2.1.B}$$

Estas ecuaciones son combinadas linealmente usando un multiplicador desconocido  $\lambda$ :

$$L = L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left( H_x \frac{g}{\lambda} + H_t \right) + \left( V_x \lambda \frac{a^2}{g} + V_t \right) + \frac{f|V|V}{2D} = 0 \quad \text{e.c. III.2.1.C}$$

Cualquiera de dos valores distintos reales de  $\lambda$  producirá dos ecuaciones en términos de los dos variables dependientes H y V que son de cualquier forma las equivalentes de las ecuaciones e.c. III.2.1.A y e.c. III.2.1.B Una apropiada selección de dos particulares valores de  $\lambda$  conducirá a la simplificación de la ecuación e.c. III.2.1.C. En general, ambas variables V y H son funciones de x y t. Si la variable independiente x es función de t, tenemos:

$$\frac{dH}{dt} = H_x \frac{dx}{dt} + H_t \quad \text{e.c. III.2.1.D}$$

$$\frac{dV}{dt} = V_x \frac{dx}{dt} + V_t \quad \text{e.c. III.2.1.E}$$

Ahora, por inspección de la ecuación e.c. III.2.1.C con la ecuación e.c. III.2.1.D, se puede constatar que si

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \frac{\lambda a^2}{g} \quad \text{e.c. III.2.1.F}$$

la ecuación e.c. III.2.1.C se convierte en la ecuación diferencial ordinaria:

$$\lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad \text{e.c. III.2.1.G}$$

La solución de la ecuación e.c. III.2.1.E dará los dos valores particulares de  $\lambda$

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad \text{e.c. III.2.1.H}$$

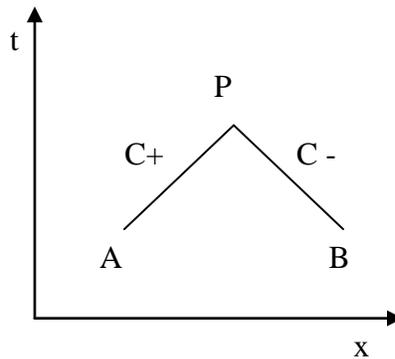
La sustitución de este valor  $\lambda$  en la ecuación III.2.1.F producirá un par de ecuaciones las cuales son agrupadas e identificadas como ecuaciones  $C^+$  y  $C^-$

$$C^+: \quad \begin{cases} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 & \text{e.c.III.2.1.I} \\ \frac{dx}{dt} = +a & \text{e.c.III.2.1.J} \end{cases}$$

$$C^-: \quad \begin{cases} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 & \text{e.c.III.2.1.K} \\ \frac{dx}{dt} = -a & \text{e.c.III.2.1.L} \end{cases}$$

De esta forma dos valores reales de  $\lambda$  han sido usados para convertir las dos ecuaciones diferenciales parciales originales en dos ecuaciones diferenciales totales e.c. III.2.1.I y e.c. III.2.1.K cada una con la restricción de que son validas solo cuando las respectivas ecuaciones III.2.1.J y III.2.1.L son validas.

Es conveniente visualizar la solución en un plano  $xt$ , en el cual se pueden observar las líneas “características” donde las ecuaciones III.2.1.I y e.c. III.2.1.K son validas. Ninguna aproximación matemática ha sido echa en esta transformación de las ecuaciones diferenciales parciales originales. Así mismo toda solución de este conjunto será una solución del sistema original dado por las ecuaciones III.2.1.A y III.2.1.B.



**Figura III.2.1.A Líneas características en el plano  $xt$**

### III.2.2) Ecuaciones por diferencias finitas

Una tubería es dividida en  $N$  partes iguales, cada una de longitud  $\Delta x$  como se muestra en la figura III.2.2.A. Una medida de tiempo es calculado como  $\Delta t = \Delta x/a$ , y la ecuación III.2.1.J es satisfecha por una diagonal positiva de la cuadrícula ilustrada por la recta  $AP$ . Dado que  $N$  es un entero constante el periodo uniforme de tiempo  $\Delta t$  es así mismo un submúltiplo del tiempo de transición,  $L/a$ . Si las variables dependientes  $V$  y  $H$  son conocidas en  $A$ , entonces la ecuación III.2.1.I, la cual es valida a lo largo de la línea  $C^+$ , puede ser integrada entre los límites  $A$  y  $P$ , y en consecuencia ser escrita en términos de

variables desconocidas V y H en el punto P. La ecuación III.2.1.L es satisfecha por una diagonal negativa de la cuadrícula, ilustrada por la recta *BP*. La integración de la línea *C*<sup>-</sup> entre los límites B y P, con condiciones conocidas en B y desconocidas en P, conduce a la segunda ecuación en términos de la mismas dos desconocidas variables V y H en P. Una simultánea solución de dichas ecuaciones arroja resultados en un tiempo y posición en particular representado en el plano xt por el punto P.

Al multiplicar la ecuación III.2.1.I por  $a \cdot dt/g = dx/g$ , y al introducir el área de la tubería para poder de esta manera escribir la ecuación en términos de caudal en lugar de velocidad, la ecuación es transformada a una forma apropiada para ser integrada a lo largo de la línea característica *C*<sup>+</sup> ( Fig III.2.2.A).

$$\int_{H_A}^{H_P} dH + \frac{a}{gA} \int_{Q_A}^{Q_P} dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_A}^{x_P} Q|Q|dx = 0 \quad \text{e.c. III.2.2.A}$$

La variación de Q en x en la integral del ultimo termino es desconocida a priori, por lo tanto una aproximación debe ser introducida en esta evaluación. Existe un numero de opciones. El objetivo es mantener una simple forma que proveerá razonable precisión en flujos inestables generales y que mantendrá condiciones estables durante flujos estables. Una integración por partes es usada:

$$\int_{x_A}^{x_P} Q^2 dx = Q^2 x \Big|_{x_A}^{x_P} - \int_{x_A}^{x_P} x dQ^2 = Q^2 x \Big|_{x_A}^{x_P} - 2 \int_{x_A}^{x_P} x Q dQ \approx Q_P |Q_A| (x_P - x_A) \quad \text{e.c. III.2.2.B}$$

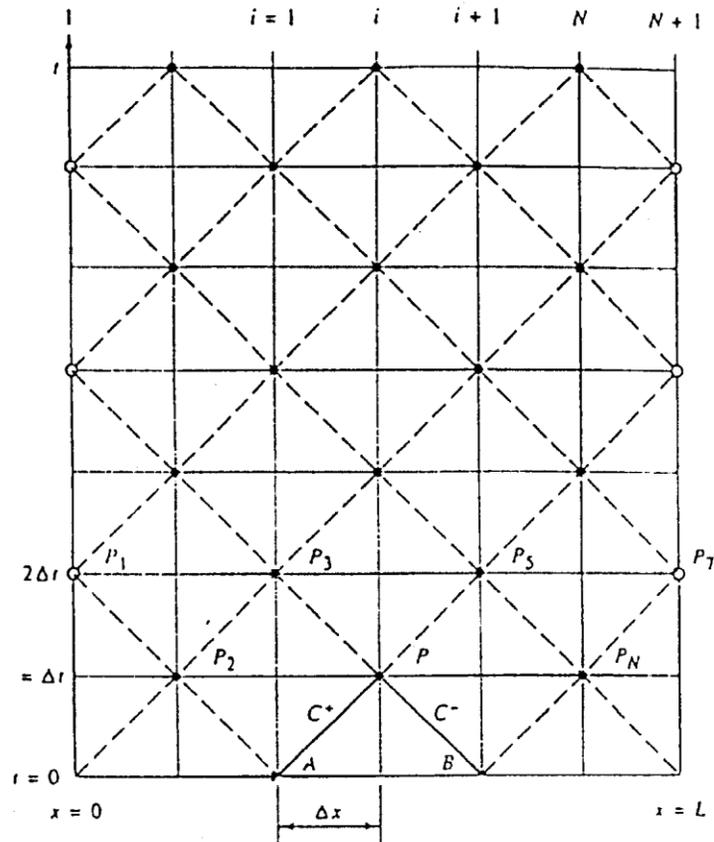
Seguindo el mismo procedimiento de B a P, se obtienen las siguientes soluciones:

$$C^+: \quad H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{f \Delta x}{2gDA^2} Q_P |Q_A| = 0 \quad \text{e.c. III.2.2.C}$$

$$C^-: H_P - H_B - \frac{a}{gA}(Q_P - Q_B) - \frac{f\Delta x}{2gDA^2} Q_P |Q_B| = 0 \quad \text{e.c. III.2.2.D}$$

Estas dos ecuaciones compatibles son relaciones algebraicas básicas que describen la propagación transitoria de la altura piezométrica y caudal en la tubería.

En un plano  $x-t$ , como se muestra en la figura III.2.2.A, se representan entonces las condiciones de flujo en cada uno de estos tramos  $N$  para determinados intervalos de tiempo.



**Figura III.2.2.A Malla rectangular para la solución de problemas de tubería simple.**

Para cada punto P del interior de la malla en una sección i, las dos ecuaciones de compatibilidad, válidas a lo largo de las dos líneas características  $C^+$  y  $C^-$ , son resueltas simultáneamente para las incógnitas  $Q_i$  y  $H_i$  y pueden ser escritas como:

$$C^+ : H_i = C_P - B_P Q_i \quad \text{e.c. III.2.2.E.a}$$

$$C^- : H_i = C_M - B_M Q_i \quad \text{e.c. III.2.2.E.b}$$

donde los coeficientes  $C_P$ ,  $B_P$ ,  $C_M$  y  $B_M$  son constantes conocidas al momento de aplicar las ecuaciones, ya que dependen de las condiciones de flujo en el intervalo de tiempo anterior. Vienen dados por:

$$C_P = H_{i-1} + B Q_{i-1} \quad \text{e.c. III.2.2.F}$$

$$B_P = B + R |Q_{i-1}| \quad \text{e.c. III.2.2.G}$$

$$C_M = H_{i+1} - B Q_{i+1} \quad \text{e.c. III.2.2.H}$$

$$B_M = B + R |Q_{i+1}| \quad \text{e.c. III.2.2.I}$$

Donde:

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{e.c. III.2.2.J}$$

$$R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2} \quad \text{e.c. III.2.2.K}$$

La constante  $B$ , generalmente llamada impedancia característica de la tubería, depende de las propiedades físicas del fluido y la tubería.  $R$  es el coeficiente de resistencia de la tubería, donde el factor de fricción  $f$  puede ser una constante o ser ajustado durante los cálculos con el número de Reynolds local en cada tramo para cada intervalo tiempo.

Resolviendo el sistema formado por las ecuaciones III.2.2.E.a y III.2.2.E.b se obtiene:

$$H_i = \frac{C_P B_m + C_M B_P}{B_P + B_M} \quad \text{e.c. III.2.2.L}$$

$$Q_i = \frac{C_P - C_M}{B_P + B_M} \quad \text{e.c. III.2.2.M}$$

La notación de subíndices usadas en las ecuaciones anteriores, las cuales son convenientes para los cálculos con procesadores, son mostradas en la figura III.2.2.A. En esta representación se puede notar que el subíndice  $i$  es referida para cualquier punto de intersección en la dirección  $x$ . Los valores de los subíndices de  $H$  y  $Q$  en cada sección siempre son dados por el procedimiento, ambos son dados por condiciones iniciales o son el resultado de un paso previo de cálculo. Para completar la solución para cualquier tiempo deseado, es necesario introducir apropiadamente condiciones finales, también designadas como condiciones de borde.

# Capítulo IV

## **Descripción física y operacional del Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación, Descripción de los productos de embarque**

### **IV.1) INTRODUCCIÓN**

El terminal de Almacenaje para Exportación de Jose-Sur (TAEJ-S), Unidad 8200, es una de las facilidades incluidas en el Proyecto SINCOR Downstream (aguas abajo) construido en Jose, Edo. Anzoategui, Venezuela. El objetivo de este proyecto fue mejorar el crudo proveniente de los campos de Zuata (alto contenido de azufre y baja gravedad API: 8° API) y producir un crudo sintético mejorado en °API (32 °API) competitivo en el mercado de crudos de bajo contenido de azufre.

La finalidad del TAEJ-S es proporcionar un área de almacenamiento para los productos de exportación de SINCOR.

El terminal de almacenamiento y embarque de Jose está compuesto por dos patios de tanques, llamados Terminal de Almacenaje para Exportación de Jose-Norte (TAEJ-N) y Terminal de Almacenaje para Exportación de Jose-Sur (TAEJ-S). Cada patio de tanques cuenta con las facilidades necesarias para la recepción, almacenamiento y despacho de crudos y productos que son exportados a través del muelle de embarque perteneciente al TAEJ-N, el cual cuenta con una plataforma (Norte) con 8 brazos de carga y se tiene previsto la construcción de la plataforma sur. Los crudos y productos ha ser embarcados por el terminal pertenecen a PDVSA y Asociaciones Estratégicas como lo son:

- CERO NEGRO ( PDVSA / MOBIL / VEBA OIL)
- AMERIVEN (PDVSA / ARCO / TEXACO / PHILLIPS )

- PDVSA / EXXON
- SINCOR ( PDVSA / TOTAL / STATOIL )

## **IV.2) DESCRIPCIÓN DEL PROCESO**

El proyecto de SINCOR Downstream (Aguas Abajo) es parte del proyecto global SINCOR, el cual produce y transporta Bitumen del área del Orinoco en Venezuela hacia la Planta Mejoradora ubicada en la costa, donde es convertido en un Crudo Sintético de Bajo Contenido de Azufre (LSSC).

Las unidades de la Planta Mejoradora (Upgrader) de SINCOR son las siguientes:

- Unidad de Destilación de Crudo (CDU)
- Unidad de Destilación al Vacío (VDU)
- Unidad de Coquización Retardada (DCU)
- Unidad recuperadora de Gas (GRU)
- Unidad Hidrotasadora de Nafta (NDHDT)
- Unidad de Hidrocraqueo Moderado (MHC)
- Unidad de Producción de Hidrógeno (HMU)
- Unidad de Regeneración de Aminas (ARU)
- Unidad de Despojamiento de Aguas Agrias (SWS)
- Unidad Recuperadora de Azufre

El objetivo del Proyecto SINCOR Downstream es producir un crudo sintético mejorado en °API ( 32° API ) y competitivo en el mercado de los crudos de bajo contenido de azufre. Este crudo sintético contiene una fracción de diesel con un aceptable número de cetano y una fracción de gasoil de buena calidad para emplearse como alimentación para una unidad de Craqueo Catalítico. En la Planta Mejoradora también se obtienen como subproductos coque y azufre.

El crudo sintético fuera de especificación también puede ser almacenado y exportado desde el TAEJ-S y se denomina Crudo Sintético de Mediano Contenido de

Azufre (MSSC). Los distintos tipos de MSSC que pueden ser recibidos en el TAEJ-S según el caso operacional que los genere son:

- LSSC OF SPEC ( Caso Parada de la Unidad NDHDT de la Planta Mejoradora)
- MSSC1 ( Caso Parada de la Unidad NDHDT de la Planta Mejoradora con producción de LSSC y MSSC )
- MSSC 2 ( Caso Parada de la Unidad MHC de la Planta Mejoradora)
- MSSC 3 ( Caso Parada de la Unidad MHC de la Planta Mejoradora con Residuos Húmedos)

Las facilidades de SINCOR (tanques y equipos asociados) estan localizadas en las parcelas S-1 y S-2 del Condominio Industrial de Jose en el Distrito Bolívar de Edo. Anzoátegui. La interconexión entre la Planta Mejoradora de SINCOR y el TAEJ-S se realiza a través de dos tuberías de 20” y 26” de diámetro, las cuales están ubicadas en el corredor definido por el condominio de Jose, con una longitud aproximada de 6 km paralelas a la troncal 9.

Las instalaciones del patio de tanques TAEJ-S y la s tuberías de interconexión con la Planta Mejoradora de SINCOR y la Estación de Bombeo de Jose (JPS) operan en dos fases: Fase de producción Inicial (IPP) donde solo se exporta Crudo Diluido (DCO), y Fase de Producción Normal (NPP) con la Panta Mejoradora (Upgrader) en operación. Esta ultima presenta dos niveles de operación de cuerdo al ciclo del proceso de Coquización Retardada: 18 o 15 horas. Estos niveles son conocidos como NPP-I y NPP-II y la principal diferencia entre ellos lo constituyen los niveles de producción.

Durante IPP, hasta que la Planta Mejoradora inicie su operación, el crudo es extraído de los pozos y diluido con Crudo Mesa en las unidades aguas arriba de SINCOR (Upstream). Desde las unidades aguas arriba de SINCOR (Upstream) el Crudo Diluido (DCO de 15 °API a 17°API) es transportado por un sistema de bombeo, que incluye la Estación de Bombeo de Jose (JPS), hasta el TAEJ-S donde es almacenado como producto y posteriormente enviado a los muelles para su embarque, a través de las bombas existentes en el TAEJ-N.

El Crudo Mesa se encuentra disponible en el múltiple N°1 ubicado en el TAEJ-N, desde el cual es transportado a través de la línea de 48” hacia el tanque TA2-T-01 en el TAEJ-S, y desde allí es enviado con las bombas 08-P-20-01 A/B, a través de la línea de 20” , a la succión de las bombas booster de Petrozuata ubicadas en la Estación de Bombeo de Jose (JPS), las cuales se encargan de transportarlo hasta los pozos en Zuata.

Durante NPP, el Crudo Diluido (solo DCO a 17° API) constituye una mezcla de Crudo Zuata y un corte de Nafta de 47°API proveniente de la Planta Mejoradora, el cual es bombeado hacia Zuata por el sistema de bombas de JPS. Este DCO de 17° API es bombeado desde Zuata hasta el Patio de Almacenaje Intermedio de SINCOR Unidad (5100), desde el cual se alimenta la Planta Mejoradora (Upgrader) para su procesamiento. Durante esta fase, el TAEJ-S recibe en sus tanques los productos de la Planta Mejoradora que consiste en el Crudo Sintético de Bajo Contenido de Azufre (LSSC), a través de la línea de 20”, y ocasionalmente productos fuera de especificación: los distintos tipos de Crudo Sintético de Mediano Contenido de Azufre (MSSC) y residuos secos y húmedos (Dry & Wet Slops ), a través de la línea de 26”. Estos productos son almacenados en el TAEJ-S y luego son enviados al TAEJ-N para exportación. Para vaciar los productos dejados en los fondos de los tanques y evitar contaminación entre ellos, se lleva a cabo una operación de transporte de volumen muerto de un tanque a otro usando las bombas 08-P-20-01 A/B.

Además de las operaciones mostradas anteriormente, durante NPP la Planta Mejoradora detiene su funcionamiento para mantenimiento general por 6 semanas cada 4 años y el TAEJ-S vuelve a una operación equivalente al modo IPP, enviando una mezcla de crudo de Zuata y Crudo Mesa para exportación.

El manejo de productos desde el TAEJ-S hacia el muelle de embarque se lleva a cabo a través de la línea de 48” que se une a los cabezales de 60” ubicados en el TAEJ-N, donde se encuentra una estación de bombeo compuesta por bombas principales y secundarias, todas centrífugas verticales. La operación de embarque presente tres etapas: las etapas inicial y final operan con una bomba secundaria para cumplir con las tasas mínimas de carga exigidas para llenado de buque, mientras que en la etapa intermedia la tasa máxima es alcanzada usando una combinación de bombas principales y secundarias en paralelo de acuerdo a los requerimientos del barco.

La capacidad de operación del TAEJ-S 3.1 MMBLS, distribuidos en cinco tanques de techo flotante de 500 MBLS cada uno y un tanque de 600 MBLS. Tres de estos tanques están en servicio durante el IPP o operación equivalente y cinco en servicio durante NPP, el sexto tanque, el de mayor capacidad, se estima que será culminado a mediados del mes de Julio del 2002.

Cada tanque está provisto de una boquilla para recepción/despacho de productos. Una válvula motorizada es conectada a la boquilla del tanque y a la entrada/salida de la tubería. La tubería es conectada a la entrada del múltiple. Las válvulas motorizadas localizadas en la entrada del múltiple son activadas en secuencia lógica de cierre/apertura permitiendo que los productos sean recibidos/despachados hasta/desde el tanque de almacenamiento. Las válvulas motorizadas de los tanques abren y cierran según un sistema de control integrado.

Los productos son almacenados de la siguiente manera:

- El diluyente (Crudo Mesa) es almacenado en tanque TA2-T-01 durante IPP.
- El crudo Diluido (DCO 15° API a 17° API) es almacenado en los, tanques TA2-T-02/03 durante IPP. En NPP durante la vuelta del TAEJ-S al modo equivalente a IPP, el DCO pudiera ser almacenado en cualquiera de los tanques disponibles en ese momento (TA2-T-02/03/04/05/06).
- El LSSC, MSSC y los Residuos Secos y Húmedos son almacenados en los tanques, TA<sup>2</sup>-T-01/02/03/04/05/06 durante NPP

Durante IPP, el cabezal de embarque de 48” se utiliza tanto para la importación de Crudo Mesa como para el despacho de DCO. Debido a esta limitación operativa ambas operaciones no pueden realizarse simultáneamente.

Durante NPP, las facilidades del TAEJ-S permiten simultáneamente la recepción y el despacho de productos en los tanques de almacenamiento uno a la vez a través de los diferentes cabezales de 20”, 26” y 48”.

### IV.3) DESPACHO DE PRODUCTOS

Los tanques de almacenamiento son llenados hasta el nivel deseado , el llenado es detenido y el producto se le permite reposar por un periodo de 2 a 4 horas con el objetivo de separar el agua contenido en el producto. Cada tanque cuenta con cuatro líneas de 6” para el drenaje del agua, cada una con una válvula normalmente cerrada a través de la cual el agua es transportada a la planta de tratamiento de agua-crudo TAEJ-N. El proceso de drenado es completamente manual y debe ser hecho ante todo para el DCO, Crudo Mesa y Residuos Húmedos y Secos, que son los productos con mayor contenido de agua. Seguidamente, tan pronto como la carga ha sido apropiadamente supervisada y certificada se chequea que la temperatura del producto no sea mayor de 55°C (temperatura máxima recomendada para las bombas de embarque) ni menor de 40.5 °C para el DCO 15° API y el MSSC 2 (los productos de mayor viscosidad), el despacho de productos es ejecutado desde el TAEJ-S a través del TAEJ-N. Tomando esto en consideración solo es posible manejar un producto a la vez, existe una línea dedicada para este propósito: la línea 48”-P-08-20-0521-AA2Y.

La carga de productos al muelle del TAEJ-N se realizará a través de las bombas de embarque ubicadas en la casa de bombas del TAEJ-N. El flujo volumétrico (carga) de embarque se determinara dependiendo del tamaño del carguero y del tiempo de llenado. Para algunos productos de exportación existe un máximo flujo volumétrico permitido, dado por el NPSH requerido de las bombas de embarque a muelle del TAEJ-N. Debido a que no existe ningún controlador en el TAEJ-S que permita regular el flujo hacia la casa de bombas será el TAEJ-N quien lo regule a través del número de bombas principales y secundarias encendidas, operando en paralelo y embarcando a muelle. Debe tenerse especial cuidado de informar a TAEJ-N acerca del máximo flujo volumétrico permitido ya que de excederse este valor se arriesga la seguridad de un equipo perteneciente a un operador distinto a SINCOR.

LA salida de los productos de SINCOR desde el patio de tanques será como sigue:

### IV.3.1) Despacho durante IPP

Los tanques de Crudo Diluido (DCO) TA2-T-02/03 son descargados uno a la vez a través del múltiple de entrada y el cabezal de descarga de 48"-P-08-20-0521-AA2Y con la válvula motorizada 08-20-MV-084 cerrada y las válvulas motorizadas 08-20-MV-081 y 08-20-MV-083 (o 087) abiertas. El TAEJ-S será interconectado a través del múltiple general de interconexión a los cabezales de succión de las bombas del TAEJ-N 60"-P-TA1-125-AA1 y 60"-P-TA1-126-AA1. El flujo máximo de embarque será de 50 MBPH, de cualquier forma, para el DCO 15° API cargando desde el tanque TA2-T-02, el TAEJ-S debe alertar al TAEJ-N para evitar un caudal de embarque mayor de 45 MBPH y para garantizar NPSH requerido por las bombas de embarque.

Durante IPP:

CASO	DESDE	HACIA	FLUIDO	CAUDAL	
				MBPD	M <sup>3</sup> /H
Envío de diluyente a Zuata	Tanque TA2-T-01	Estación de bombeo de Jose	Crudo Mesa	1080	530
Embarque a muelle	Tanque TA2-T-01	Muelle en TAEJ-N	Crudo Diluido 15° API	1080	7154
			Crudo Diluido 17° API	1200	7949
Embarque a muelle	Tanque TA2-T-01	Muelle en TAEJ-N	Crudo Diluido 15° API	1200	7949
			Crudo Diluido 17° API	1200	7949

**Tabla IV.3.1 Despacho durante IPP**

### IV.3.2) Despacho durante NPP

Los tanques de LSSC, MSSC y Residuos Secos y Húmedos (Dry & Wet Slops) son descargados uno a la vez a través del múltiple de entrada y el cabezal de descarga 48"-P-08-20-0521-AA2Y con la válvula motorizada 08-20-MV-084 cerrada y las válvulas motorizadas 08-20-MV-081 y 08-20-MV-083 (o 087) abiertas. El TAEJ-S será interconectado a través del múltiple general de interconexión a los cabezales de succión de las bombas del TAEJ-N 60"-P-TA1-125-AA1 y 60"-P-TA1-126-AA1. El flujo máximo de embarque será de 50 MBPH, de cualquier forma, para el MSSC2 cargando desde el tanque TA2-T-02, el TAEJ-S debe alertar al TAEJ-N para evitar un caudal de embarque mayor de 45 MBPH y para garantizar NPSH requerido por las bombas de embarque. (Ver DRW-880-1-90-P03-009)

Durante NPP:

CASO	DESDE	HACIA	FLUIDO	CAUDAL	
				MPBD	M <sup>3</sup> /H
Embarque a Muelle	Tanques TA2 T-01/02	Muelle en TAEJ-N	LSSC	1200	7949
			LSSC OF SPEC	1200	7949
			MSSC 1	1200	7949
			MSSC 2	1080	7154
			MSSC 3	1200	7949
			Residuos Húmedos y Secos	1200	7949
Embarque a Muelle	Tanques TA2 T-03/04/05/06	Muelle en TAEJ-N	LSSC	1200	7949
			LSSC OF SPEC	1200	7949
			MSSC 1	1200	7949
			MSSC 2	1200	7949
			MSSC 3	1200	7949
			Residuos Húmedos y Secos	1200	7949

**Tabla IV.3.2 Despacho durante NPP**

#### **IV.4) DESPLAZAMIENTO**

La operación de desplazamiento consiste en limpiar las tuberías cuando es cambiado el producto a ser despachado. El desplazamiento del producto se realizará usando Crudo Mesa enviado desde el TAEJ-N a través de líneas de las líneas 30"-P-TA1-128-AA1 y 30"-P-08-20-0704-AA2Y con la válvula motorizada 08-20-MV-081 cerrada y las válvulas motorizadas 08-20-MV-084 y 08-20-MV-083 (o 087) abiertas. Esta operación ocurrirá durante el IPP o operación equivalente para desplazar DCO y durante NPP para desplazar el crudo sintético.

#### **IV.5) DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL SISTEMA**

En esta sección se exponen los parámetros físicos de los distintos elementos que comprenden el Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo a analizar, así como también el arreglo en el cual están dispuestos los diversos componentes de dicho sistema.

##### **IV.5.1) Descripción General :**

El Sistema de almacenamiento y Embarque de crudo está compuesto inicialmente por un patio de tanques cuya función principal es la de almacenar los productos (crudo sintético mejorado) para exportación de SINCOR provenientes de la Planta Mejoradora de SINCOR (Upgrader). Este patio consta de seis tanques de almacenamiento cuya capacidad total de operación es de 3.1 MMBLS, cada tanque esta asociado a una línea de descarga/recepción de 48" de diámetro a través de una válvula de compuerta motorizada ON/OFF.

Estas líneas asociadas de descarga/recepción de cada tanque de almacenamiento convergen a un cabezal principal de descarga cuyo diámetro nominal también es de 48" y el cual es el responsable de transportar los productos de exportación del TAEJ-S al TAEJ-N . Es importante destacar que durante IPP, el cabezal de embarque de 48" se utiliza tanto para la importación de Crudo Mesa (diluyente) como para el despacho de

DCO. Debido a esta limitación operativa ambas operaciones no pueden realizarse simultáneamente.

El cabezal principal de descarga como también las líneas asociadas de descarga/recepción de cada tanque comprenden válvulas motorizadas que controlan los distintos casos operacionales relacionados con el almacenamiento y embarque de crudo para exportación. Ver DRW plano TAEJ completo.

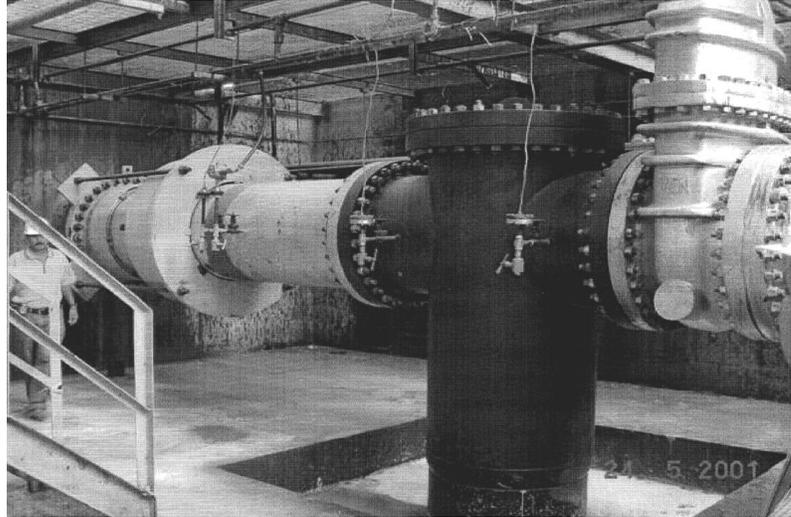
El TAEJ-S se conecta con los cabezales de 60" y 36" de diámetro pertenecientes al TAEJ-N a través del múltiple de válvulas #1 por medio de las válvulas motorizadas (MV 083 o MV 087) y la válvula 06 MV 01011 respectivamente.

El cabezal de 60" de diámetro transporta el producto para exportación desde el límite de batería con el TAEJ-S hasta los cabezales de succión de las bombas de embarque contenidas en la sala de bombas del TAEJ-N y las cuales son las responsables de suministrarle al crudo la energía necesaria para cargar los buques tanqueros anclados en el muelle.

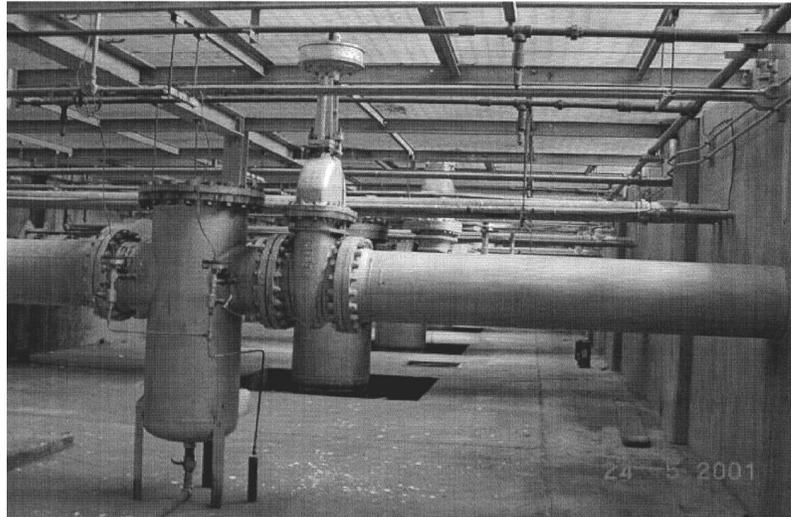


**Fotografía IV.5.1.A Vista de las líneas de 60" asociadas a los cabezales de succión de las bombas de embarque del TAEJ-N**

Los cabezales de succión son de 36" Y 20" de diámetro según la bomba a la que estén asociados. Existen válvulas y filtro en la succión de las bombas según los requerimientos del proceso de embarque.

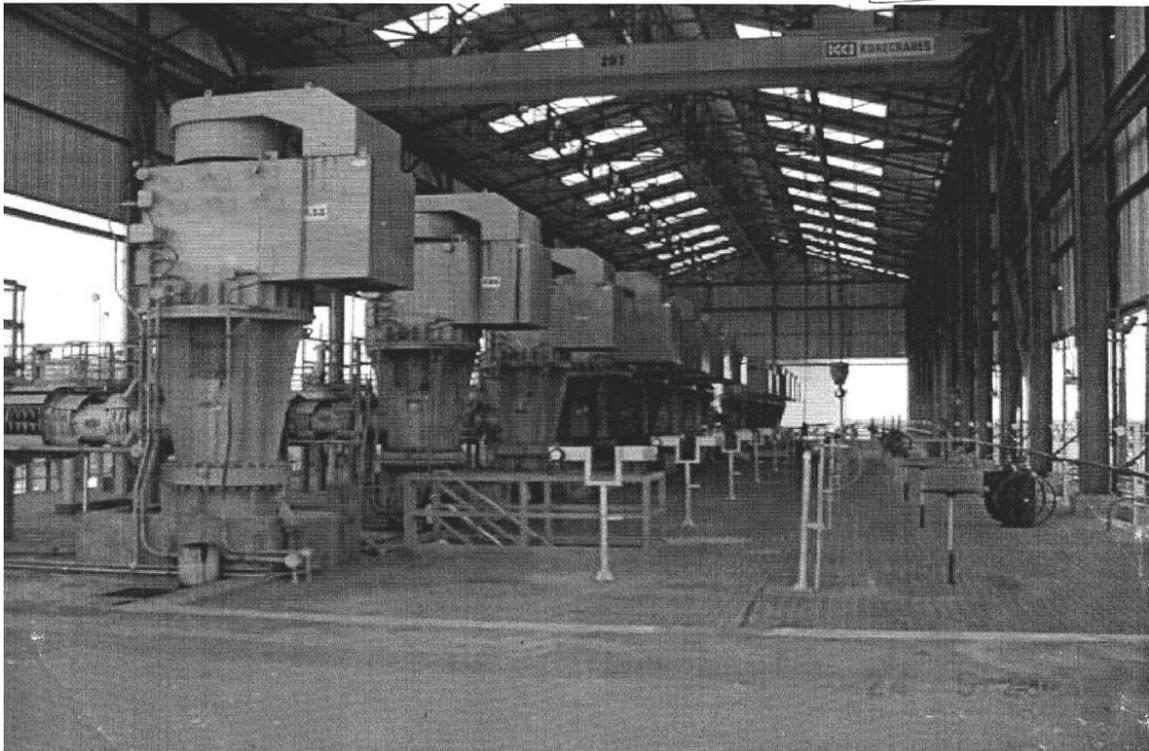


**Fotografía IV.5.1.B Vista del cabezal de succión de 36" asociado a una de las bombas principales de embarque del TAEJ-N**



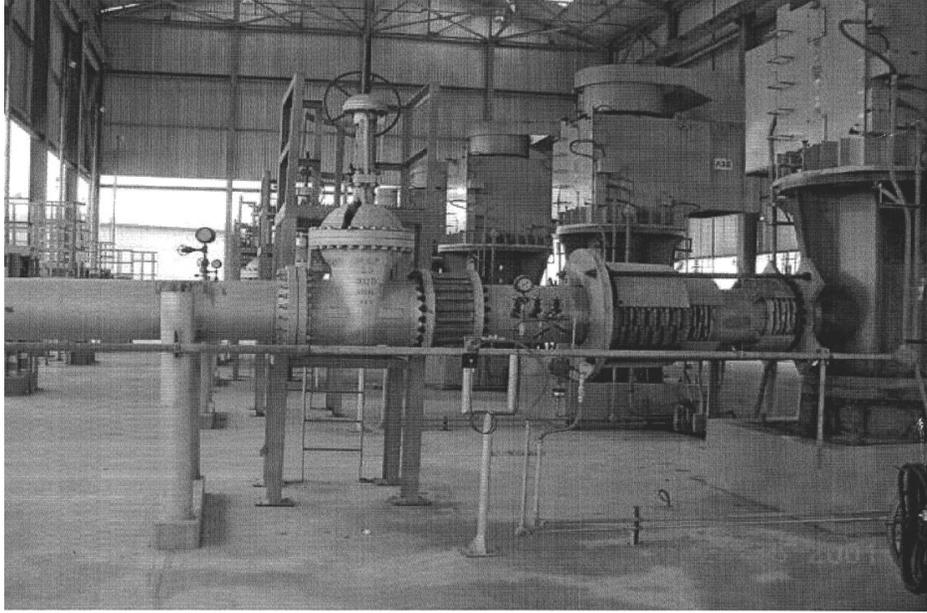
**Fotografía IV.5.1.C Vista del cabezal de succión de 20" asociado a una de las bombas secundarias de embarque del TAEJ-N**

Las bombas de embarque todas centrifugas verticales son de dos tipos, principales y secundarias, esto en consonancia con los caudales manejados por estas de 14000 y 7000 GPM respectivamente según el caso operacional y al etapa de embarque. La estación de bombeo comprende 8 bombas principales y 5 bombas secundarias dispuestas como sigue: la Nave 1 abarca 4 principales y 2 secundarias y la Nave 2 abarca 4 principales y 3 secundarias.

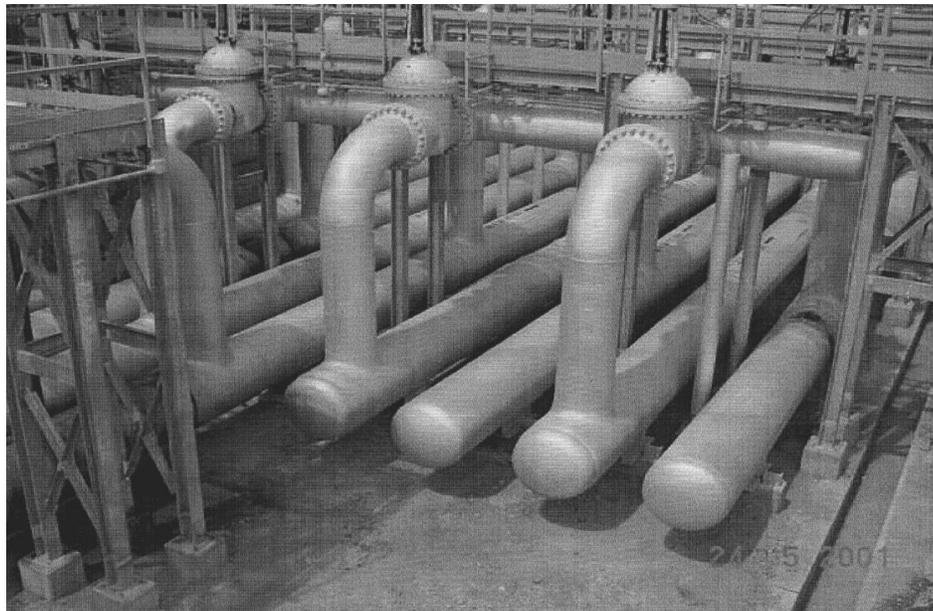


**Fotografía IV.5.1.D Vista de la casa bombas de embarque del TAEJ-N**

Los cabezales de descarga son de 24" Y 20" de diámetro según la bomba a la que estén asociados. Existen válvulas de servicio y check a la descarga de dichas bombas y todos estos cabezales de descarga están asociados a líneas de 36" a través de las cuales es transportado el crudo desde la descarga de las bombas hasta el muelle de embarque.



**Fotografía IV.5.1.E Vista del cabezal de descarga de 24” asociado a una de las bombas principales de embarque del TAEJ-N**



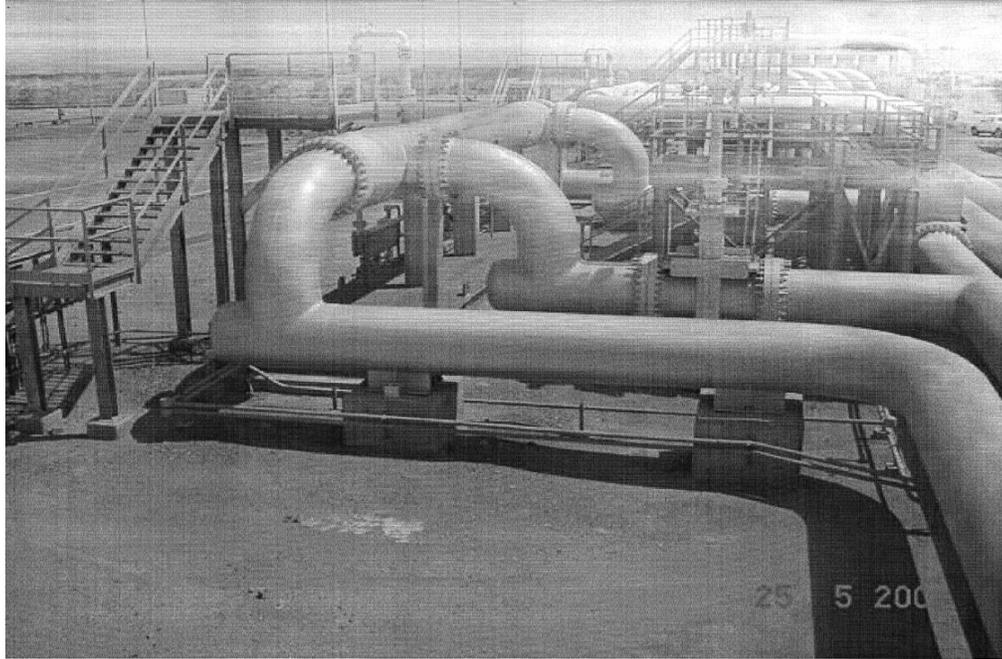
**Fotografía IV.5.1.F Vista del cabezal de descarga de una de las bombas de embarque asociado a las líneas de 36” que transportan el crudo hasta la Plataforma de Embarque**



**Fotografía IV.5.1.G Corredor de las líneas de 36” con conexiones para futuros cabezales de descarga**

Son cuatro las líneas de 36” que asocian las descargas de las bombas de embarque con la Plataforma de carga Norte existente, de las cuales dos líneas operan transportando crudo hacia el muelle para poder este ser embarcado en los buques tanqueros y dos líneas de retorno que permite el desplazamiento del crudo residual en las líneas de embarque y de esta manera evitar la contaminación entre los distintos crudos a ser embarcados, conformando de esta manera dos lazos cuyo retorno sucede en la plataforma de embarque. Se planea la construcción de una segunda plataforma de carga (Sur) con sus respectivas líneas de descarga asociadas la cual se estima que culmine para mediados del 2003.

La línea de descarga desde las bombas hasta la costa tiene una longitud aproximada de 2 KM y en la cual existen diversos accesorios como válvulas de control, de servicio; equipos estáticos como lo son mezcladores; patio de raspa tubos, en donde son introducidos los raspadores encargados de mantener las líneas del sistema de embarque en optimas condiciones de servicio y operación.



**Fotografía IV.5.1.H Vista del área de mezcladores perteneciente al TAEJ-N**



**Fotografía IV.5.1.I Vista del área de raspa tubos perteneciente al TAEJ-N**

La línea submarina tiene una longitud aproximada de 6.1 KM y cuya máxima profundidad es de 24 m en la base de la plataforma de carga para luego ascender verticalmente hasta el nivel del mar y conectarse a las instalaciones de la Plataforma de Embarque Norte en la válvula 05XSV/8211 o 05XSV/8204. Ver apéndice A.10

En toda la trayectoria desde las descargas de las bombas hasta la Plataforma de Embarque Norte se mantiene un diámetro nominal constante de 36”.



**Fotografía IV.5.1.J Vista de los dos lazos de descarga de crudo de 36” hacia la Plataforma de Embarque Norte mar adentro.**

La Plataforma de Embarque Norte cuenta con ocho brazos de carga que están dispuestos en dos grupos de cuatro brazos cada uno a cada lado de la plataforma para el embarque simultaneo de buques tanqueros. Los brazos están conectados a cada lazo de embarque por una línea de 24” . La longitud aproximada de los brazos es de 40 m con un diámetro nominal de 16”. Ver fotografía siguiente.



**Fotografía IV.5.1.K Vista de la Plataforma de Embarque Norte, en donde se puede apreciar cuatro de los brazos de carga retraídos.**

Es importante resaltar que el despacho de producto para exportación se efectúa desde tanques de almacenamiento que se encuentran a 48m SNM (sobre el nivel del mar) y la pendiente en la trayectoria de despacho normalmente es decreciente hasta la base de la plataforma de embarque -24m SNM.

#### IV.5.2) Descripción de equipos, tuberías y accesorios :

Entre los elementos que intervienen en el despacho de productos y que componen el Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación se encuentran principalmente:

##### IV.5.2.A) Tanques de Almacenamiento:

Los seis tanques de almacenamiento de los productos para exportación de SINCOR se encuentran en el TAEJ-S. Siendo el tanque más alejado de las bombas de embarque y el de mayor capacidad de operación el designado como TA2-T-06.

Tag:	TA2-T-01/02/03/04/05
Tipo:	Techo flotante
Capacidad (MBLS):	600
Capacidad de operación (MBLS):	500
Dimensiones DxH (mxm):	80.2x19.5
Presión de diseño:	ATM
Temperatura de diseño(°C):	75°

**Tabla IV.5.2.A.a Descripción de los tanques TA2-T-01/02/03/04/05**

Tag:	TA2-T-06
Tipo:	Techo flotante
Capacidad de operación (MBLS):	600
Presión de diseño:	ATM
Temperatura de diseño(°C):	75°

**Tabla IV.5.2.A.b Descripción de los tanques TA2-T-06**

#### IV.5.2.B) Tuberías de despacho:

Las tuberías que intervienen en el despacho de producto para exportación de SINCOR varían su diámetro nominal desde 60" como máximo hasta 16" como mínimo en los brazos de embarque. Existen trayectorias sobre la superficie del terreno, enterradas y submarinas según lo demande la disposición del sistema. Ver Apéndice A.11.

Las líneas están identificadas y caracterizadas según el proyecto al que pertenecen. Ver piping class anexo.

- **48"-P-08-20-0503-BA2Y-PP:** Es la línea tipo que esta asociada a los tanques de almacenamiento y la cual esta conectada directamente a la boquilla de recepción/despacho del tanque. Ver anexo.

Diametro Nominal :	48" (1219,2 mm)
Diametro Interno :	47" (1193,8 mm)
Diametro Extern:	48" (1219,2 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Material:	API5LX52-W
Normas que Aplican:	Asme 31.3
Espesor de coorrosión:	0,063" (1,60 mm)
Rating:	300/RF
Espesor comercial:	0,5" (12,7 mm)
SCH	XS
Espesor Final:	0,5" (12,7 mm)
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.a Descripción de la línea 48"-P-08-20-0503-BA2Y-PP**

- **48"-P-08-20-0521-AA2Y:** Es la línea principal en la que convergen las tuberías de despacho de los seis tanques de almacenamiento del TAEJS.

Diametro Nominal:	48" (1219,2 mm)
Diametro Interno:	47" (1193,8 mm)
Diametro Extern:	48" (1219,2 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811PSI (206,9 GPA)
Material:	API5L-X42-ERW
Normas que Aplican:	Asme 31.3
Espesor de coorrosión:	0,063" (1,60 mm)
Rating:	150/RF
Espesor comercial:	0,5" (12,7 mm)
SCH	XS
Espesor Final:	0,5" ((12,7 mm)

**Tabla IV.5.2.B.b Descripción de la línea 48"-P-08-20-0521-AA2Y**

- **60"-P-TA1-126-AA1:** Esta es la tubería de mayor diámetro nominal. Sirve de interface entre el TAEJ-S y los cabezales de succión de las bombas de embarque contenidas en el TAEJ-N. Su longitud aproximada es de 1.2 Km.

Diametro Nominal:	60" (1524 mm)
Diametro Interno:	59" (1498,6 mm)
Diametro Externo:	60" (1524 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Material:	ASTM A53 Gr B
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	150# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.c Descripción de la línea 60"-P-TA1-126**

- **36"-P-TA1-1027J-AA1:** Cabezal de succión asociada a la bomba principal con una longitud aproximada de 23 m.

Diametro Nominal:	36" (914,4 mm)
Diametro Interno:	35,25" (895,35 mm)
Diametro Externo:	36" (914,4 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
SCH	std
Material:	ASTM A53 Gr B
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	150# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.d Descripción de la línea 36"-P-TA1-1027J-AA1**

- **20"-P-TA1-1045F-AA1:** Cabezal de succión asociada a la bomba secundaria con una longitud aproximada de 23 m.

Diametro Nominal:	20" (508 mm)
Diametro Interno:	19,25" (488,95 mm)
Diametro Externo:	20" (508 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Schd:	20
Material:	ASTM A53 Gr B
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	150# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.e Descripción de la línea 20"-P-TA1-1045F-AA1**

- **24"-P-TA1-1019-BA1:** Cabezal de descarga asociado a la bomba principal con una longitud aproximada de 14 m.

Diametro Nominal:	24" (609,6 mm)
Diametro Interno:	22,876" (581,05 mm)
Diametro Externo:	24" (609,6 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Schd:	30
Material:	ASTM A53 Gr B
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	300# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.f Descripción de la línea 24"-P-TA1-1019-BA1**

- **20"-P-TA1-1046-BA1:** Cabezal de descarga asociado a la bomba secundaria con una longitud aproximada de 14 m.

Diametro Nominal:	20" (508 mm)
Diametro Interno:	19" (482,6 mm)
Diametro Externo:	20" (508 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Schd:	30
Material:	ASTM A53 Gr B
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	300# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.g Descripción de la línea 20"-P-TA1-1046-BA1**

- **36"-P-TA1-214-BA1:** Línea asociada a las descargas de las bombas principales y secundarias hasta el área de mezcladores perteneciente al TAEJ-N.

Diametro Nominal:	36" (914,4 mm)
Diametro Interno:	34,75" (882,65 mm)
Diametro Externo:	36" (914,4 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Schd:	30
Material:	ASTM A53 Gr B
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	300# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.h Descripción de la línea 36"-P-TA1-214-BA1**

- **36"-CR-IN-27-BA4:** Línea que interconecta el área de mezcladores de crudo con la estación de raspa tubo pertenecientes al TAEJ-N.

Diametro Nominal:	36" (914,4 mm)
Diametro Interno:	35" (889 mm)
Diametro Externo:	36" (914,4 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Material:	API 5L X-52
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	300# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.i Descripción de la línea 36"-CR-IN-27-BA4**

- **36"-CR-IN-28-DA1:** Línea que interconecta la estación de raspatubos hasta la plataforma de carga mar adentro. Esta línea comprende una sección en tierra firme(T.F.) de aproximadamente 1.72 Km. y una sección submarina (Sm) de aproximadamente 1.28 Km. de longitud.

Diametro Nominal:	36" (914,4 mm)
Diametro Interno:	35" T.F.- 34.5" Sm.
Diametro Externo:	36" (914,4 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Material:	API 5L X-52
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	600# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.j Descripción de la línea 36"-CR-IN-28-DA1**

- **36"-CR-IN-29-BA4:** Línea que comprende el lazo de despacho / retorno dispuesto en la plataforma de embarque.

Diametro Nominal:	36" (914,4 mm)
Diametro Interno:	35" (889 mm)
Diametro Externo:	36" (914,4 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Material:	API 5L X-52
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosió:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	300# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.k Descripción de la línea 36"-CR-IN-29-BA4**

- **24"-CR-IN-29A-BA4:** Línea que interconecta el lazo de despacho de 36" dispuesto en la Plataforma de Embarque con los brazos de carga.

Diametro Nominal:	24" (609,6 mm)
Diametro Interno:	22.62" (574,54 mm)
Diametro Externo:	24" (609,6 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Material:	ASTM A106 Gr B
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	300# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.1 Descripción de la línea 24"-CR-IN-29A-BA4**

- **16"-CR-IN-30-AA1:** Línea que conforma los brazos de carga dispuestos en la Plataforma de Embarque Norte.

Diametro Nominal:	16" (406,4 mm)
Diametro Interno:	15,376" (309,55 mm)
Diametro Externo:	16" (406,4 mm)
Rugosidad Absoluta:	0,00015 ft (0,457 mm)
Modulo de Elasticidad:	30022811 PSI (206,9 GPA)
Material:	ASTM A53 GR B
Normas que Aplican:	ASME Section VII
Espesor de coorrosión:	0,0625" (15,87 mm)
Rating:	150# RF
Relación de Poisson´s:	0,292

**Tabla IV.5.2.B.m Descripción de la línea 16"-CR-IN-30-AA1**

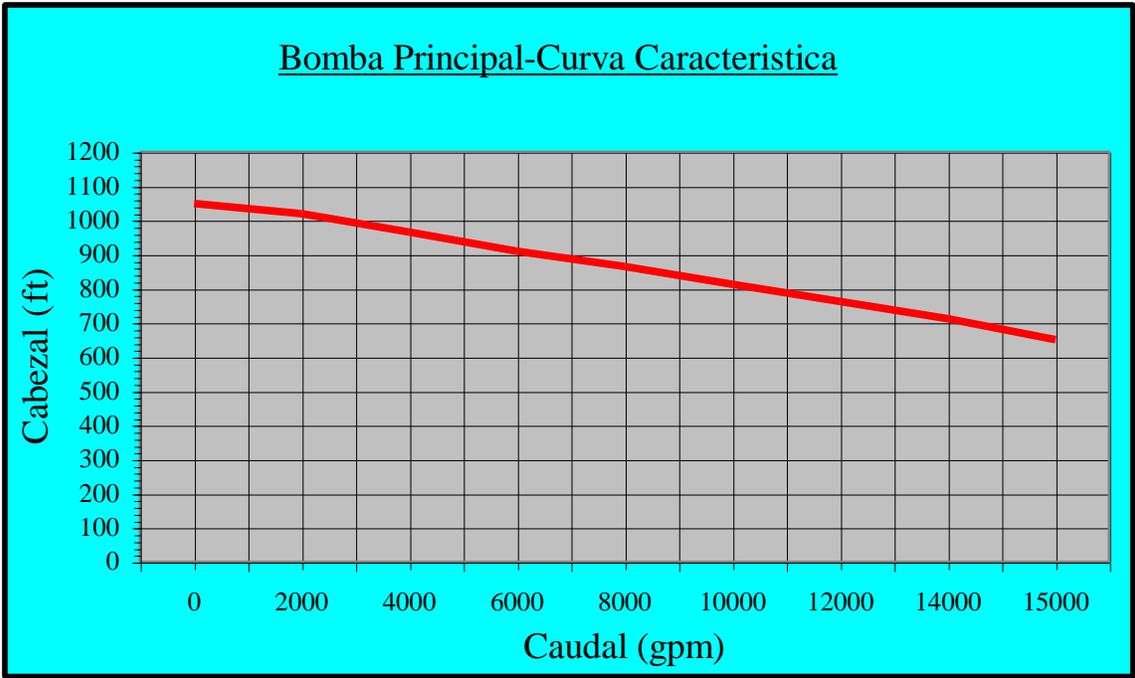
#### IV.5.2.C) Bombas de Embarque pertenecientes al TAEJ-N

El Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación opera con la combinación de dos tipos de bombas conformando de esta manera un total de 13 bombas de las cuales 8 son designadas como bombas principales y 5 son designadas como bombas secundarias. Una combinación de bombas principales y secundarias en paralelo se efectúa de acuerdo a el caudal de operación deseado y a los requerimientos de carga del buque tanquero.

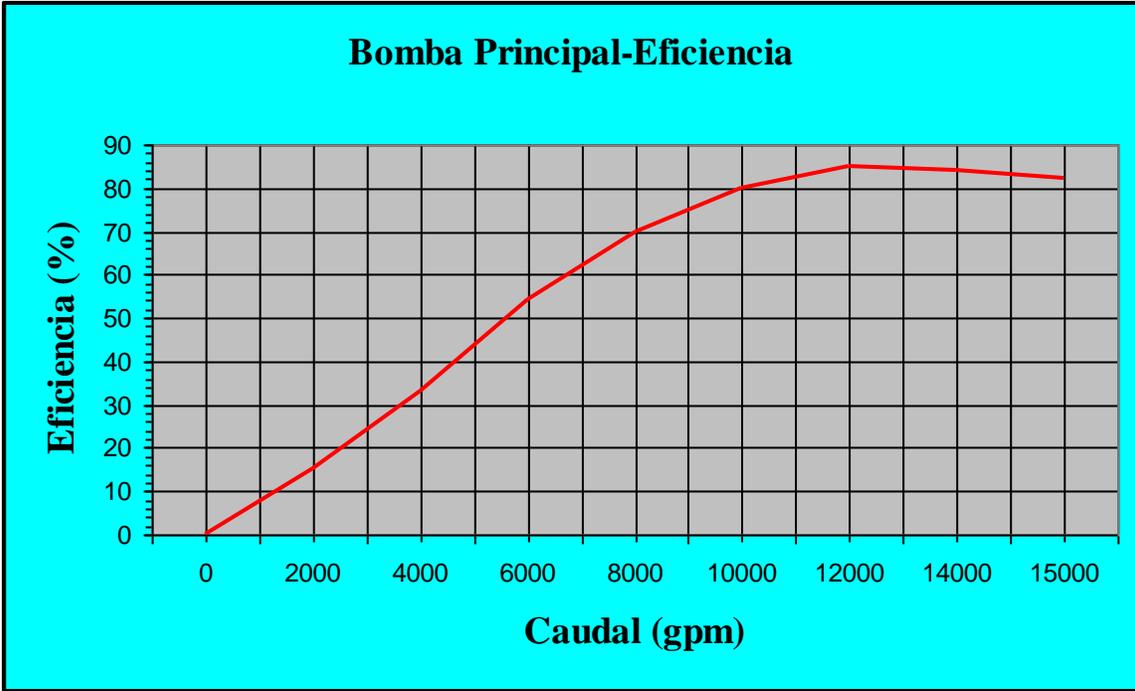
##### IV.5.2.C.a Bomba Principal:

Bomba		Motor	
Tag:	TA1-B-01A	MFR:	ABB
Capacidad (GPM):	14000	HP:	4000
Cabezal (ft):	720	RPM:	1200
RPM:	1180	Tipo:	TEAAC
Tipo:	VMT	Fase:	3
Representante:	Byron Jackson	Frecuencia (HZ):	60
Dimensión:	32KXFSKXL2H1-4 STG	Voltios:	6600
Material Impulsor:	13 Chr 4 Ni		
Material Carcaza:	Acero fundido		
Sello Mecánico		Acoplamiento	
MFR:	Borg Warner	MFR:	BW/IP
Tipo/Dimensión:	BSTXX/5500	Tipo:	Rígido con espaciamento

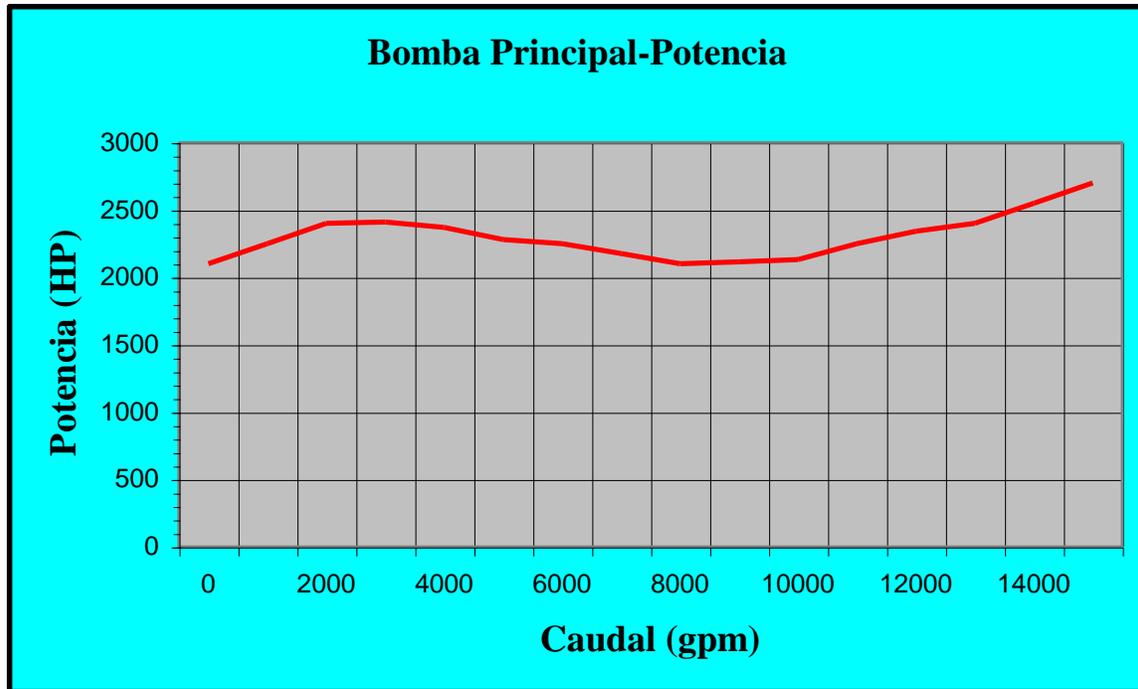
Tabla IV.5.2.C.a Descripción Bomba Principal



**Grafica IV.5.2.C.a Bomba Principal-Curva Característica**



**Grafica IV.5.2.C.b Bomba Principal-Eficiencia**

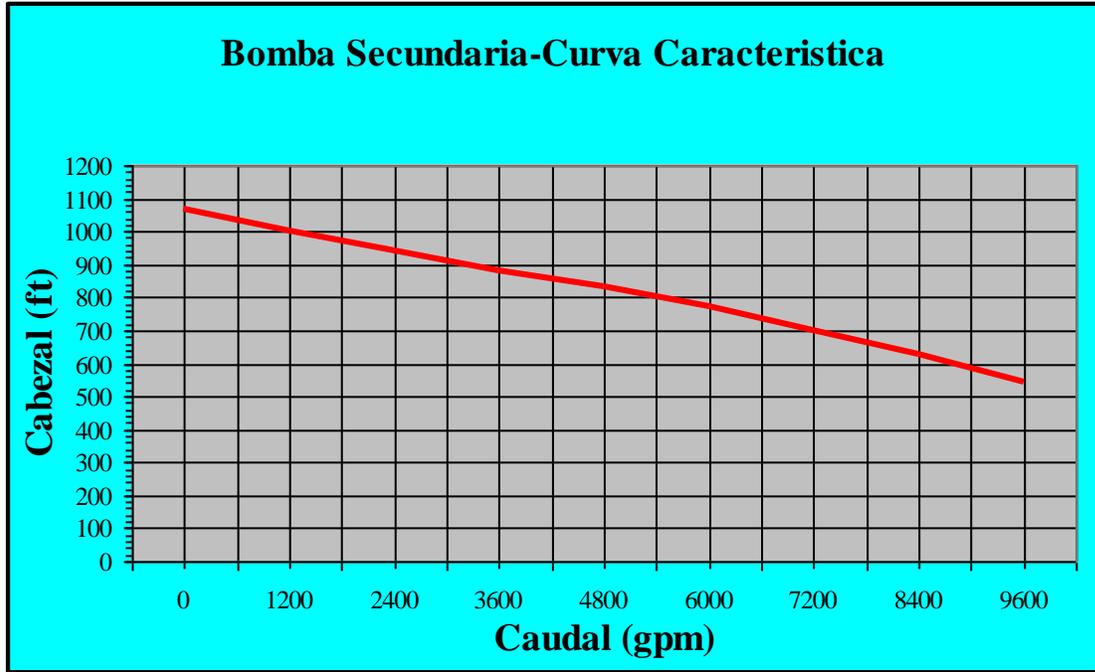


**Grafica IV.5.2.C.c Bomba Principal-Potencia**

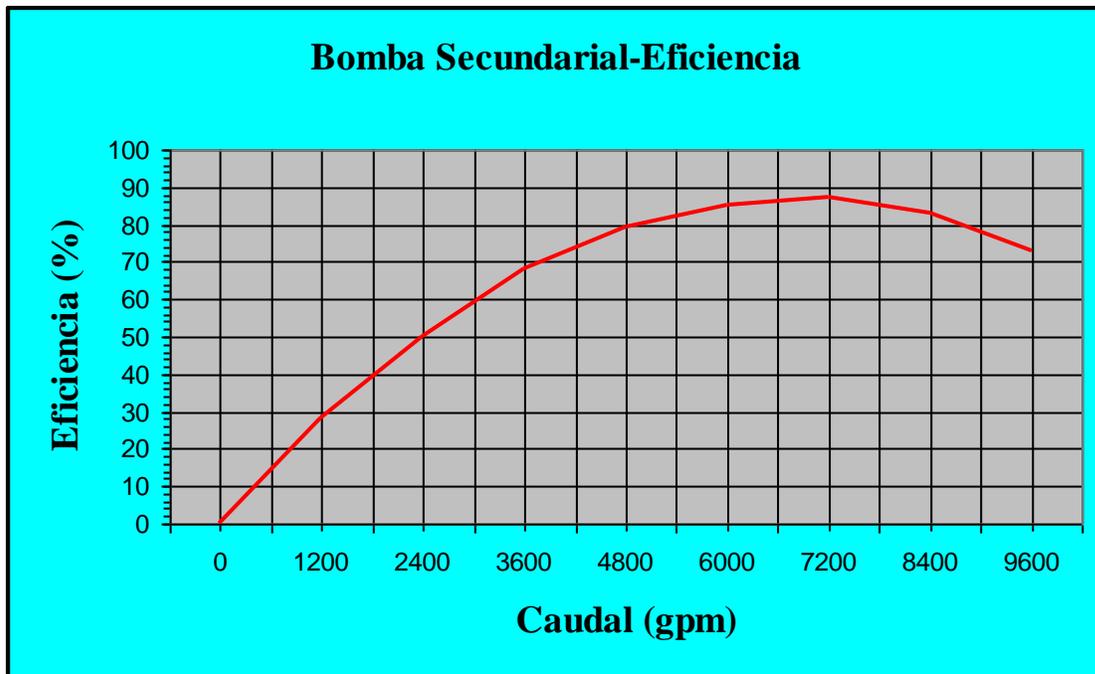
**IV.5.2.C.b Bomba Secundaria:**

Bomba		Motor	
Tag:	TA1-B-02A	MFR:	ABB
Capacidad (GPM):	7000	HP:	2500
Cabezal (ft):	720	RPM:	1800 Sinc.
RPM:	1770	Tipo:	TEAAC
Tipo:	VMT	Fase:	3
Representante:	Byron Jackson	Frecuencia (HZ):	60
Dimensión:	24KXFS KXL2-3 STG	Voltios:	6600
Material Impulsor:	13 Chr 4 Ni		
Material Carcaza:	Acero fundido		
Sello Mecánico		Acoplamiento	
MFR:	Borg Warner	MFR:	BW/IP
Tipo/Dimensión:	BSTXX/4250	Tipo:	Rígido con espaciamento

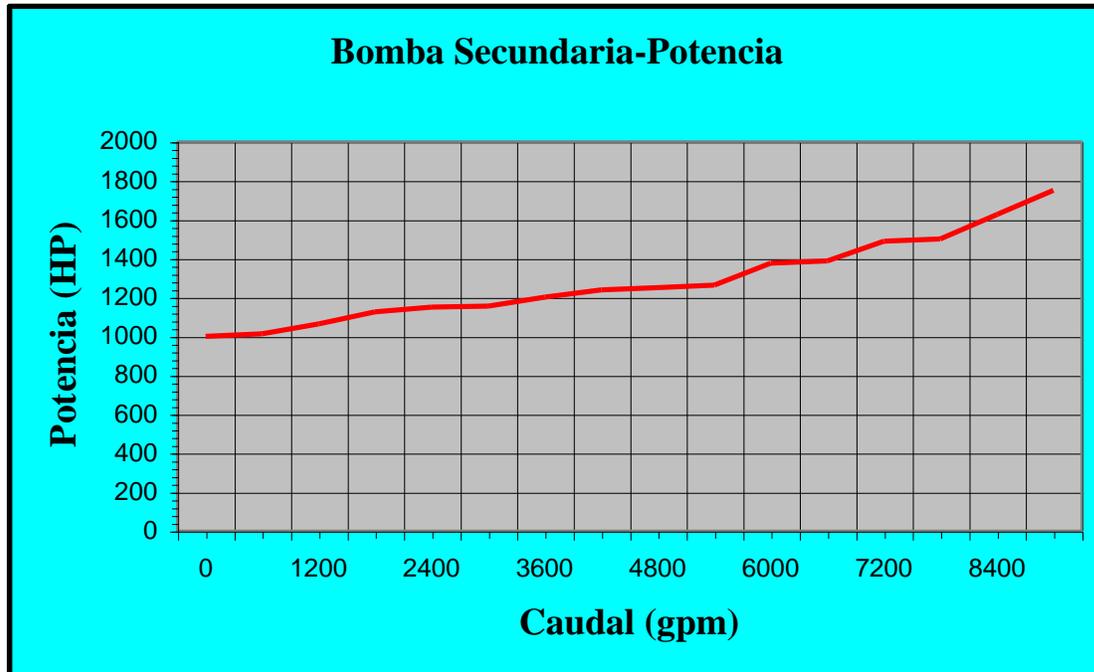
**Tabla IV.5.2.C.b Descripción Bomba Secundaria.**



Gráfica IV.5.2.C.d Bomba Secundaria-Curva Característica



Gráfica IV.5.2.C.e Bomba Secundaria-Eficiencia



**Gráfica IV.5.2.C.c Bomba Secundaria-Potencia**

#### **IV.5.2.D Válvulas del sistema de embarque**

En el Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación, así como también, en cualquier sistema de mejoramiento de crudo, recepción/despacho, almacenamiento u otro, en donde sea necesario el control preciso de los flujos involucrados, la operación del conjunto de válvulas envueltas en dichos sistemas juega un papel de suma importancia para la sincronización de los diversos elementos que conforman tales procesos.

##### **IV.5.2.D.a Válvulas TAEJ-S**

Las válvulas involucradas en TAEJ-S para el despacho de productos tienen 48” de diámetro nominal exceptuando las válvulas que asocian directamente los seis tanques de

almacenamiento con las líneas de descarga, dichas valvulas tiene un diámetro nominal de 42” . Todas estas válvulas son de tipo motorizada ON/OFF (compuerta) . Ver anexo.

<b>Válvula-Tanque</b>	
Tag:	Mv 050
Diametro:	42"
Accionamiento	Motorizado
Tipo:	Compuerta
Rating:	300 #
Acabado:	Cara resaltada
Cuerpo:	A216-WCB
Internos:	# 8

**Tabla IV.5.2.D.a Descripción Válvula- Tanque 05**

<b>Válvula-Línea (48")</b>	
Tag:	Mv 081
Diametro:	48"
Accionamiento	Motorizado
Tipo:	Compuerta
Rating:	150 #
Acabado:	Cara resaltada
Cuerpo:	A216-WCB
Internos:	# 8

**Tabla IV.5.2.D.b Descripción Válvula- Línea (48")**

#### **IV.5.2.D.b Válvulas TAEJ-N**

El conjunto de válvulas principales que intervienen en el despacho de crudo en el TAEJ-N varían su diámetro nominal desde 48” en el caso del múltiple de válvulas #1 (Limite de batería) hasta un diámetro nominal de 16” en los brazos de carga.

<b>Válvula-Succión de Bombas</b>	
ASTM A216 Gr WCB	
Diametro:	36"-20"
Accionamiento	Volante/Engranaje
Tipo:	Compuerta
Rating:	150 #
Brida:	Cara resaltada (RF)
Guarnición:	13% Cr
Dimensiones:	Según ANSI B16.10.
Cv	108000/31000
Otros:	Asiento duro-Cuña soldada

**Tabla IV.5.2.D.c Descripción Válvula –Succión Bombas**

<b>Válvula-Descarga de Bombas</b>	
ASTM A216 Gr WCB	
Diametro:	24"-20"
Accionamiento	Engranaje
Tipo:	Compuerta
Rating:	Class 300 #
Brida:	Cara resaltada (RF)
Guarnición:	13% Cr
Dimensiones:	Según ANSI B16.10.
Cv	44000/30000
Otros:	Asiento duro

**Tabla IV.5.2.D.d Descripción Válvula-Descarga Bombas**

<b>Válvula-Retención</b>	
ASTM A216 Gr WCB	
Diametro:	24"-20"
Tipo:	Doble clapeta
Dimensiones:	Según ANSI B16.10.
Rating:	Class 300 #
Cv:	20000/13500
Brida:	Sin Brida
Guarnición:	13% Cr
Cuerpo:	Acero al Carbono Fundido

**Tabla IV.5.2.D.e Descripción Válvula-Retención**

<b>Válvulas- Plataforma</b>	
ASTM A216 Gr WCB	
Diametro:	24"-36"
Tipo:	Compuerta
Rating:	Class 300 #
Cv:	44000/108000
Brida:	Cara resaltada (RF)
Guarnición:	13% Cr
Accionamiento:	Volante/Engranaje
Otros:	Asiento duro y cuña solida

**Tabla IV.5.2.D.f Descripción Válvulas-Plataforma**

<b>Válvulas-QCDC (*)</b>	
ASTM A216 Gr WCB	
Diametro:	16"
Tipo:	Bola
Rating:	Class 150 #
Brida:	Cara resaltada (RF)
Características:	Paso completo con doble bloqueo y purga

**Tabla IV.5.2.D.g Descripción Válvulas-QCDC (\*)**

(\*) **Válvulas QCDC ( Quick close Design Coupling)** : Estas válvulas se encuentran en el extremo final de los brazos de carga. El objetivo de esta válvula es producir un corte violento del flujo de dichos brazos como consecuencia de una situación de emergencia como por ejemplo la separación incontrolada del buque con respecto a la plataforma de carga, evitando de esta manera el derrame del producto que esta siendo embarcado. Confirmar especificación. Ver anexo.

#### **IV.6 Descripción de los Productos de Despacho**

Los productos a ser almacenados y despachados (crudo sintético mejorado) son provenientes de la Planta Mejoradora de SINCOR. Según las unidades de mejoramiento

de la planta que estén activas y la fase de producción en la que se este operando (IPP o NPP), se obtendrán diversos productos para exportación

#### IV.6.1 Crudo Diluido 17° API (DCO)

Esta es una mezcla de crudo Zuata y un corte de Nafta de 47°API producido durante la fase IPP o en la fase NPP durante la vuelta del TAEJ-S al modo equivalente a IPP por mantenimiento general.

<b>DCO 17° API</b>	
Caudal:	50 MBPH
Temperatura:	31°C
Densidad:	945 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad:	405 CP
Presión de Vapor:	1,88 PSIA
Modulo de Bulks:	200000 PSI

**Tabla IV.6.1 Descripción DCO 17° API**

#### IV.6.2 Crudo Sintético de Bajo Contenido de Azufre (LSSC)

Este crudo es producido durante la fase NPP con la Planta Mejoradora operando con todas sus unidades, siendo el producto con menor contenido de azufre.

<b>LSSC</b>	
Caudal:	50 MBPH
Temperatura:	27-37°C
Densidad:	862-855 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad:	9,6-7,1 CP
Presión de Vapor:	5,22-8,12 PSIA
Modulo de Bulks:	170000 PSI

**Tabla IV.6.2 Descripción LSSC**

#### **IV.6.3 Crudo Sintético de Bajo Contenido de Azufre fuera de especificación (LSSC OF SPEC)**

Este crudo es producido en la fase NPP Caso Parada de la Unidad NDHDT de la Planta mejoradora.

<b>LSSC OF SPEC</b>	
Caudal:	50 MBPH
Temperatura:	38°C
Densidad:	891 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad:	9,2 CP
Presión de Vapor:	5,07 PSIA
Modulo de Bulks:	200000 PSI

**Tabla IV.6.3 Descripción LSSC OF ESPEC.**

#### **IV.6.4 Crudo Sintético de Mediano Contenido de Azufre #1 (MSSC 1)**

Este crudo es producido en la fase NPP Caso Parada de la Unidad NDHDT de la Planta mejoradora con producción de LSSC y MSSC.

<b>MSSC 1</b>	
Caudal:	50 MBPH
Temperatura:	40.5 °C
Densidad:	958 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad:	157 CP
Presión de Vapor:	0,275 PSIA
Modulo de Bulks:	200000 PSI

**Tabla IV.6.4 Descripción MSSC 1.**

#### IV.6.5 Crudo Sintético de Mediano Contenido de Azufre #2 (MSSC 2)

Este crudo es producido en la fase NPP Caso Parada de la Unidad MHC de la Planta Mejoradora.

<b>MSSC 2</b>	
Caudal:	45 MBPH
Temperatura:	40.5 °C
Densidad:	980 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad:	1029 CP
Presión de Vapor:	0,26 PSIA
Modulo de Bulks:	200000 PSI

**Tabla IV.6.5 Descripción MSSC 2.**

#### IV.6.6 Crudo Sintético de Mediano Contenido de Azufre #3 (MSSC 3)

Este crudo es producido en la fase NPP Caso Parada de la Unidad MHC de la Planta Mejoradora con Residuos Húmedos.

<b>MSSC 3</b>	
Caudal:	50 MBPH
Temperatura:	40.5 °C
Densidad:	876 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad:	16,84 CP
Presión de Vapor:	0,23 PSIA
Modulo de Bulks:	200000 PSI

**Tabla IV.6.6 Descripción MSSC 3.**

#### IV.6.7 RESIDUOS SECOS Y HÚMEDOS (DRY & WET SLOPS)

Producto almacenado y despachado durante la fase NPP de la Planta Mejoradora.

DRY & WET SLOPS	
Caudal:	50 MBPH
Temperatura:	38.5 °C
Densidad:	756 Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad:	1,3 CP
Presión de Vapor:	0,33 PSIA
Modulo de Bulks:	200000 PSI

**Tabla IV.6.7 Descripción DRY & WET SLOPS.**

# Capítulo V

## SIMULACIÓN DE EVENTOS TRANSITORIOS EN EL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO PARA EXPORTACIÓN

### V.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

La simulación de los eventos transitorios evaluados en el Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación se llevaron a cabo con la aplicación del software PIPENET™ Leading the Way in Fluid Flow Analysis producto representado por SUNRISE SYSTEMS LIMITED ([www.sunrise-sys.com](http://www.sunrise-sys.com)).

#### V.1.1 PIPENET INTRODUCCIÓN

El software PIPENET es una herramienta para el análisis de sistemas o arreglos de ductos y tuberías. Puede ser utilizado en la fase de diseño, arrojando datos principales como dimensiones de la tubería y selecciones de bombas bajo condiciones de flujo en estado estable entre otros. PIPENET corre bajo ambiente Microsoft® Windows™ haciendo un completo uso de la tecnología que este ofrece

El software PIPENET es dividido en módulos independientes, permitiendo la selección de soluciones para cada necesidad particular del usuario. Los módulos que comprende dicho software son:

- PIPENET Estándar Module
- PIPENET Transient Module
- PIPENET Spray/Sprinkler Module

## **V.1.2 MODULO DE FLUJO TRANSITORIO**

PIPENET Transient Module es aplicado para el análisis de casos de flujo transitorio tales como Golpe de Ariete, prediciendo incrementos o disminuciones tanto de la velocidad como de la presión de flujo en un sistema determinado. Entre sus bondades existe la capacidad de modelación de arreglos de tuberías con elementos tales como válvulas de operación, velocidad variable de bombas, válvulas de alivio y eliminación de vacío, acumuladores y tuberías entre otros. No solo puede predecir separación de columna de líquido sino también puede modelar la formación y colapso de esta.

Contiene una gran selección de funciones y tablas predeterminadas para la modelación de diversas condiciones de borde.

El software puede determinar el estado estable inicial y final del evento modelado o usar valores iniciales suministrados por el usuario. El periodo de tiempo (time step) para los cálculos puede ser determinado por el programa o especificado por el usuario como también puede ser manipulado para la tabulación de los datos y graficas resultantes según las necesidades del usuario. Con el software cualquier variable puede ser seleccionada por el usuario para ser presentada en forma gráfica o tabular.

## **V.2 ECUACIONES DE MODELACIÓN DEL SOFTWARE**

En esta sección se presentan las ecuaciones utilizadas por el software PIPENET para modelar los diversos elementos que conforman el sistema de tuberías a evaluar, así como también, las ecuaciones que modelan las especificaciones producto de las condiciones de borde. Se describen los parámetros a ser introducidos por el usuario según el elemento que se quiere modelar.

### **V.2.1 ECUACIONES DE FLUJO**

El Modulo de Flujo Transitorio resuelve numéricamente las ecuaciones de Movimiento y Continuidad para presiones y flujos en el sistema de tuberías.

Ecuación de Movimiento:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \sin \alpha + \frac{4f}{d} \frac{u|u|}{2} = 0$$

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{1}{\rho A} u \frac{\partial \rho A}{\partial x} + \frac{1}{\rho A} \frac{\partial \rho A}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

Donde:

*P*: Presión en la tubería

*u*: Velocidad del fluido a lo largo de la tubería

*x*: Distancia a lo largo de la tubería

*t*: Tiempo

*A*: Área de la sección transversal de la tubería

*d*: Diámetro de la tubería

$\rho$ : Densidad del fluido

$\alpha$ : Angulo de la tubería respecto a la horizontal

*f*: Factor de fricción

## V.2.2 ECUACIÓN DE VELOCIDAD DE ONDA

Para que el Modulo de Flujo Transitorio calcule automáticamente la velocidad de onda el usuario de proveer el schedule de la tubería y definir el modulo de compresibilidad del fluido. Esta información es indispensable para que la velocidad de onda pueda ser determinada.

La velocidad de onda es calculada usando:

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \left(\frac{KD}{Et}\right)c_1}}$$

Donde:

*K*: Modulo de compresibilidad del fluido

*E*: Modulo de elasticidad de la tubería

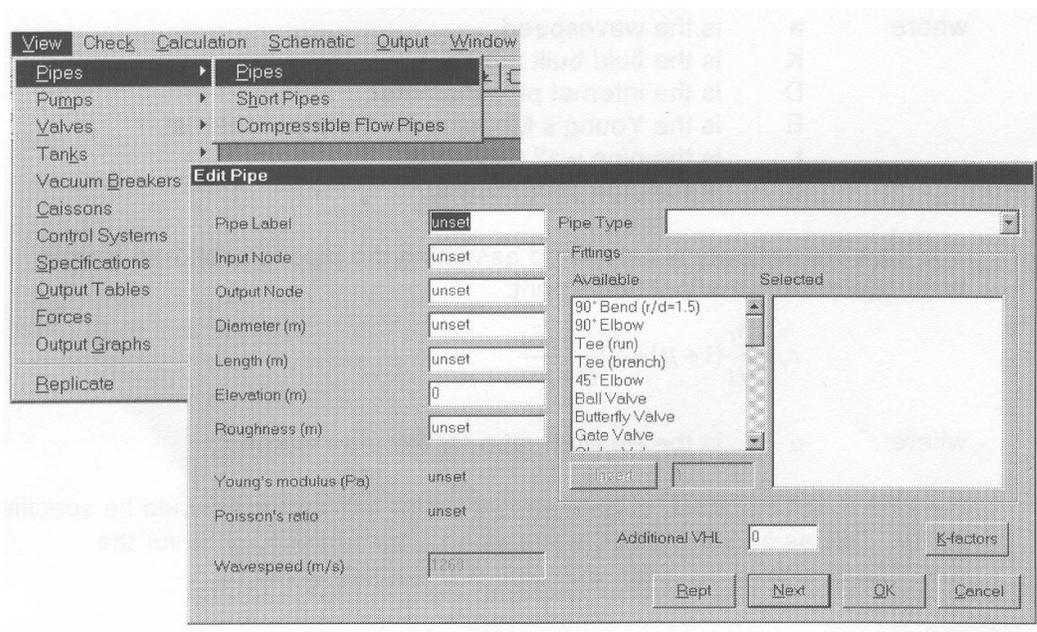
*t*: Espesor de la tubería

*C<sub>1</sub>*: Distensibilidad de la tubería

### V.2.3 ECUACIONES DE LA TUBERÍA ELASTICA

La tubería se asume con sección transversal uniforme.

Ejemplo de la ventana de dialogo para la introducción de los parámetros



**Figura V.2.3 Ventana de dialogo para la introducción de parámetros Tubería-Elástica**

### V.2.3.A Parámetros a introducir por el usuario son:

- Diameter: Diámetro interno de la tubería
- Length: Longitud de la tubería a modelar
- Elevation: La elevación de la tubería (no puede ser mayor a la longitud de esta)
- Roughness: Rugosidad de la superficie interna de la tubería
- Pipe Type: Seleccionar de los tipos predefinidos de tubería (del programa o por el usuario)
- Fittings: Selección de la lista de accesorios predefinidos
- Available VHL : Se especifica K-factor adicional

### V.2.3.B Ecuaciones de Modelación:

Ecuaciones de flujo: Son las ecuaciones de Movimiento y Continuidad descritas en la sección V.2.1

Perdida de presión por fricción: La pérdida de presión debido a los efectos de fricción esta dada por la ecuación de Darcy. Esta ecuación es derivada por la comparación de los resultados experimentales de presión en tuberías con resultados teóricos obtenidos del uso de la ecuación de Bernoulli (la cual ignora los efectos de fricción)

$$P_f = \frac{2fL}{D} \rho u^2$$

Donde:

*P<sub>f</sub>*: Es la pérdida de presión

*u*: Velocidad del fluido

*f*: Es de Fanning factor de fricción

*L*: Longitud de la tubería

*D*: Diámetro interno de la tubería

El factor de fricción Fanning es función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la tubería. PIPENET usa las siguientes formulas empíricas para determinar el factor de fricción.

- Flujo laminar:

$$f = \frac{16}{\text{Re}}$$

- Flujo Turbulento:

$$\frac{1}{f} = -1.768 \ln \left( \frac{0.27r}{D} + \frac{1.252}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

- Flujo transitorio: f es determinado por la interpolación entre el valor laminar en Re=2000 y el valor turbulento en Re=3000.

#### **V.2.4 ECUACIÓN PARA ACCESORIOS DE TUBERIA:**

Los accesorios de tuberías tales como codos, piezas T, válvulas y filtros ocasionan una adicional perdida de presión por fricción a lo largo de la tubería. Ya que PIPENET trata los accesorios asociándolos con las tuberías individuales como se describió en la sección V.2.3.A un gran número de accesorios pueden ser fácilmente incorporados en el arreglo.

La perdida de presión por fricción a través del accesorio está dado por:

$$P = \frac{1}{2} k \rho u^2$$

Donde:

*P: Es la perdida de presión*

*K: Es el factor K del accesorio*

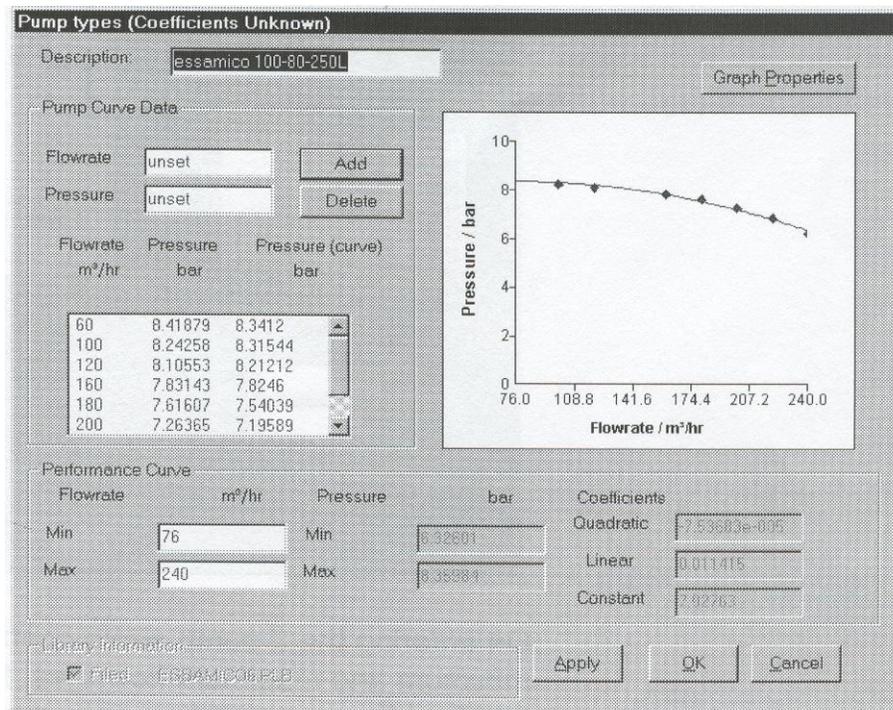
*u: Velocidad del fluido a través del accesorio.*

## V.2.5 ECUACIÓN PARA BOMBAS:

### V.2.5.A Descripción

La bomba provee un incremento de presión en el sistema. Este incremento de presión depende de la velocidad de la bomba y de su curva característica. La bomba se define introduciendo su curva característica como un tabla de datos. PIPENET calculará automáticamente la relación cuadrática entre la pérdida de presión y el caudal. Ver figura V.2.5.A

Al introducir un mínimo de 3 puntos de datos entre el caudal máximo y mínimo de operación, PIPENET calculará automáticamente los tres coeficientes de la curva cuadrática y representará un gráfico de la curva característica de la bomba. El gráfico será automáticamente actualizado cada vez los datos sean modificados logrando de esta manera definir la bomba.



**Figura V.2.5.A Ventana de dialogo para definir curva característica de la bomba por el usuario**

### V.2.5.B Parámetros a introducir por el usuario

Una vez definida la bomba por su curva característica como se expuso en la sección V.2.5.A (Ver figura anterior), se procederá a integrarla en el arreglo del sistema, para esto se asignaran valores para: Pump Type (selección de la bomba predefinida en la sección anterior), Nodo de entra, salida y de información o especificación que involucra la bomba.

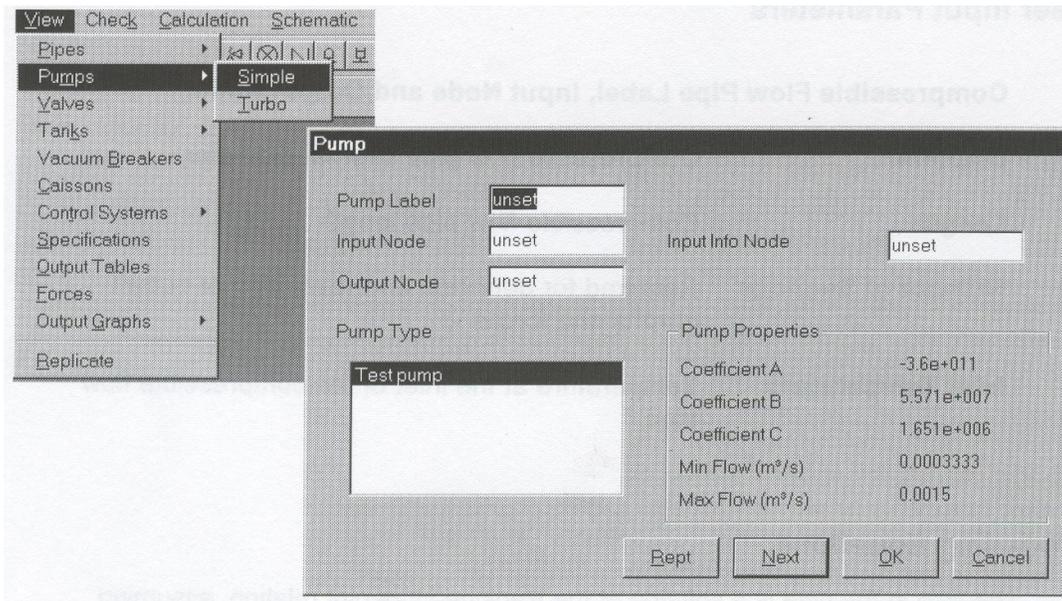


Figura V.2.5.B Ventana de dialogo para la introducción de parámetros Bombas.

### V.2.5.C Ecuación de modelación

El incremento de presión producido por la bomba será dado por:

$$P = AQ^2 + BsQ + Cs^2$$

Donde:

*s*: Operación de la bomba

*Q*: Caudal a través de la bomba

*A, B, C*: Coeficientes del comportamiento de la bomba

Los coeficientes del comportamiento de la bomba son introducidos directamente o son calculados por PIPENET para una curva específica de la bomba en Libraries..Pum Types. El usuario siempre especifica un rango de operación para el caudal manejado por la bomba. Es recomendación suministrar el punto dato con caudal cero cuando se define la curva de la bomba.

El valor  $s$  debe ser entre 0 y 1. Un valor  $s=0$  representa la bomba no esta en operación, mientras que  $s=1$  representa que la bomba está operando a su máxima velocidad.

## **V.2.6 ECUACIONES PARA VALVULAS:**

### **V.2.6.A Descripción**

Las válvulas son componentes que proporcionan una resistencia variable al flujo, produciendo una caída de presión a través de la válvula.

La caída de presión a través de la válvula es función de un número de factores incluyendo el caudal que cruza dicho elemento, las características de la válvula, la apertura de la válvula y de las propiedades físicas de esta.

PIPENET representa la apertura de la válvula por un número  $s$  el cual varía entre cero (válvula completamente cerrada) y uno (válvula completamente abierta). Ejemplo de esto:

$S=0$	100% Cerrada
$S=0,25$	25% Abierta
$S=0,667$	66,7% Abierta
$S=1$	100% Abierta

Dependiendo del tipo de válvula  $s$  puede ser especificado por el usuario, determinado por un sistema de control o calculado basándose en la condiciones de flujo y de las propiedades físicas de la válvula.

## V.2.6.B Características de la válvula

Las características de la válvula pueden ser definidas en términos de factor-K o Coeficiente de flujo.

- **Factor-K de la válvula**

La caída de presión a través de una válvula abierta en unidades SI esta determinada por:

$$\frac{1}{2} k \rho Q |Q| = s^2 A^2 (P_1 - P_2)$$

Donde:

$P_1$ : Presión de entrada

$P_2$ : Presión de salida

$Q$ : Caudal

$K(s)$ : Factor-K

$S$ : Apertura

$A$ : Área transversal de la válvula

$\rho$ : Densidad del fluido

El valor  $K(s)$  es el factor-K de la válvula y representa la resistencia a el flujo. La característica de la válvula es la curva  $K$  en función de  $s$  pudiendo ser definida por el usuario o especificada por una curva predefinida de la librería del programa.

- **Coeficiente de flujo de la válvula**

La caída de presión a través de la válvula abierta esta determinada por:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho Q |Q|}{\rho_0 C_v^2}$$

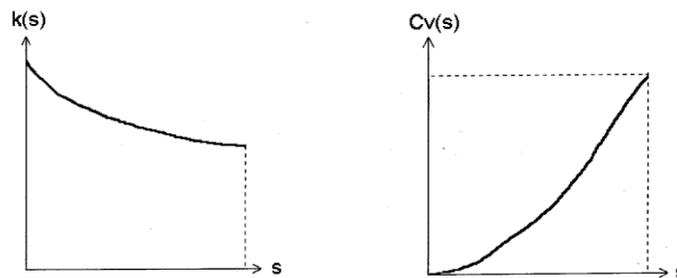
Donde:

$C_v(s)$ : Coeficiente de flujo

$\rho_0$ : Densidad del agua

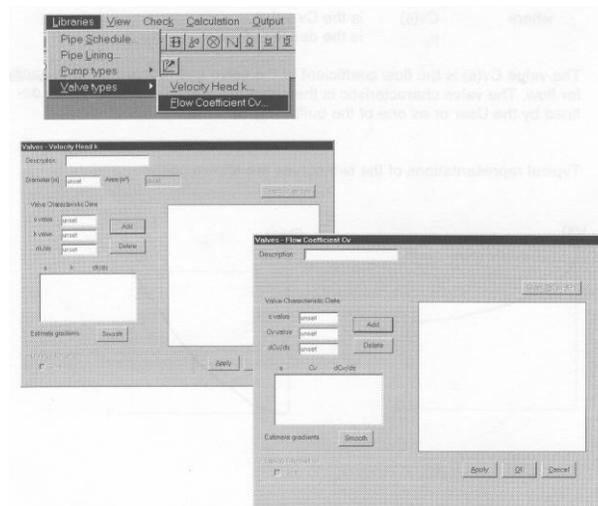
El valor  $C_v(s)$  es el coeficiente de flujo de la válvula y representa su capacidad de flujo. La característica de la válvula es la curva  $C_v$  en función de  $s$  pudiendo ser definida por el usuario o especificada por una curva predefinida de la librería del programa.

Una típica representación de las dos curvas esta dada por:

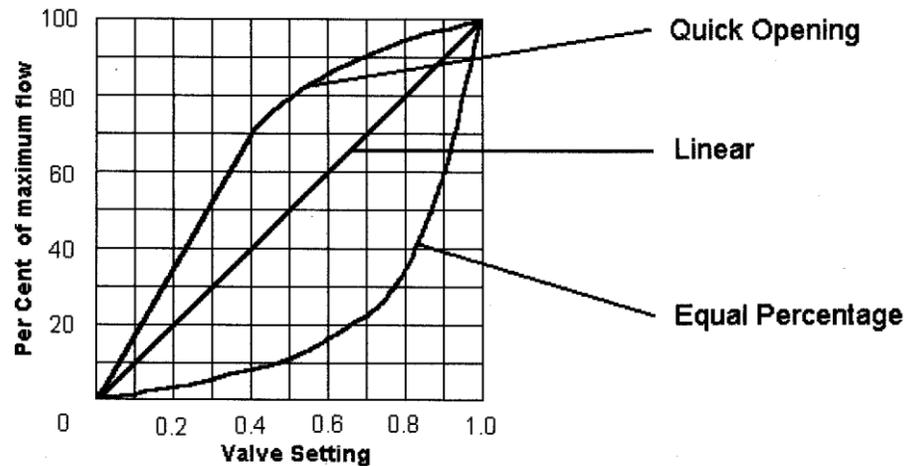


### V.2.6.C Especificación de una válvula

El usuario puede determinar la curva característica de una válvula definiendo la curva que la representa a través de una serie de puntos o seleccionándola de la librería del programa Libraries..Valve Types. La curva característica puede ser definida en base a el Coeficiente de Flujo ( $C_v$ ) o el factor-K.



Tres tipos de curva característica de válvula están disponibles por el usuario. Estas pueden ser seleccionadas desde las ventanas de dialogo de válvulas como Factor-K o Coeficiente de flujo Cv.



**Gráfica V.2.6.C Tipos de curvas características disponibles por el usuario**

- Operación lineal de la válvula: El flujo a través de la válvula es proporcional al porcentaje de apertura de esta.
- Igual porcentaje de apertura de la válvula: Igual incremento de desplazamiento de la válvula produce igual incremento de flujo. Las variaciones de flujo son pequeñas en pequeños valores de s, pero incrementa gradualmente con la apertura de la válvula.
- Rápida apertura de válvula: Los máximos cambios de flujo ocurren en pequeños valores de s. Al aumentar el porcentaje de apertura, las variaciones de flujo decrece.

## V.2.6.D Válvula de operación

### V.2.6.D.a Descripción

Las válvulas de operación son válvulas que pueden ser manipuladas por el usuario a través de un nodo de información por el cual se especifican parámetros de operación como lo es el tiempo y la forma de cierre.

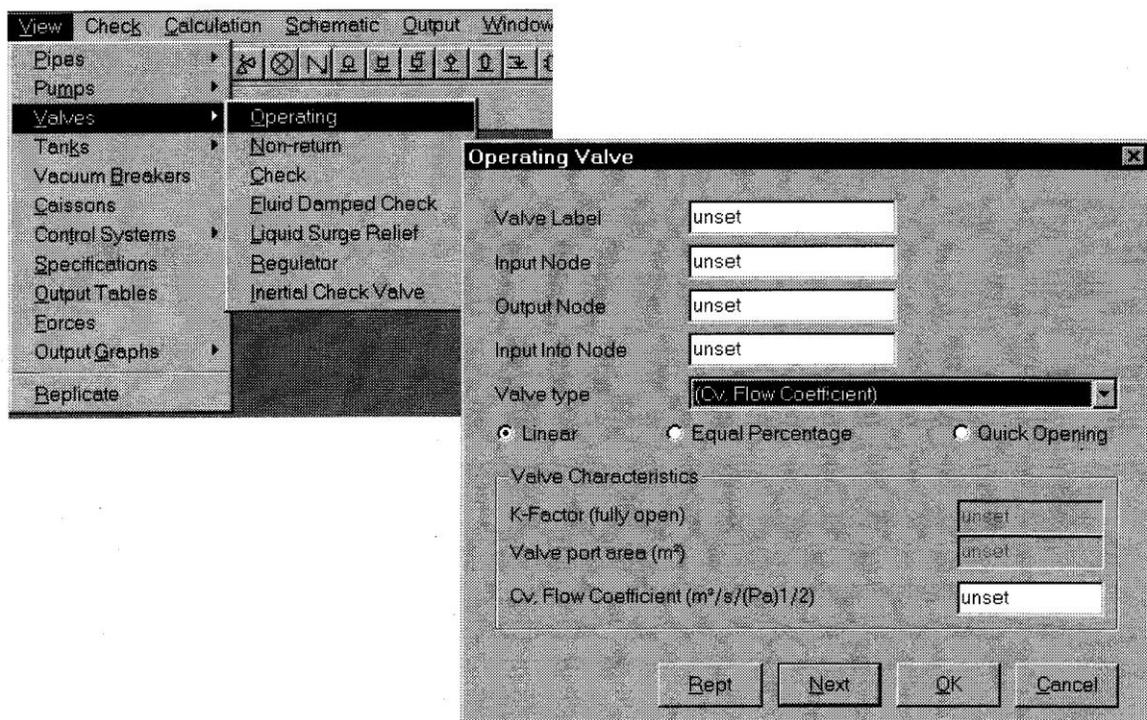


Figura V.2.6.D Ventana de dialogo para definir Válvulas de Operación

### V.2.6.D.b Parámetros a introducir por el usuario

Los parámetros a introducir por el usuario son: Designación de la válvula, nodo de entrada y salida de flujo, designación del nodo de información (nodo que recibirá la especificación posteriormente) y tipo de válvula.

El tipo de válvula se selecciona de una lista predefinida por el usuario (Ver sec V.2.6.c) o de los tipos de válvula que ofrece PIPENET, Si se selecciona de esta ultima forma se deberá especificar el máximo valor del factor-K y el área de máxima apertura o el valor del coeficiente de flujo CV para máxima apertura según sea el caso, además se deberá especificar el tipo de comportamiento de la curva característica de la válvula seleccionándola de la ventana de dialogo.

#### **V.2.6.D.c Ecuación de modelación**

Las ecuaciones de modelación serán dadas por:

Válvula abierta Factor-K:

$$\frac{1}{2} k \rho Q |Q| = s^2 A^2 (P_1 - P_2)$$

Válvula abierta Cv:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho Q |Q|}{\rho_0 C_v^2}$$

Donde:

$P_1$ : Presión de entrada

$P_2$ : Presión de salida

$Q_1$ : Caudal de entrada

$Q_2$ : Caudal de salida

$s$ : Apertura especificada

$A$ : Área de la sección transversal de la válvula

$\rho$ : Densidad del fluido

$\rho_0$ : Densidad del agua

## V.2.6.E Válvula de retención

### V.2.6.E.a Descripción

La válvula de retención es una manera de proteger bombas y otros equipos de incrementos de presión y caudal que viajen en sentido contrario de la normal dirección de flujo.

La válvula se cierra instantáneamente si la presión de entrada es inferior a la presión de salida.

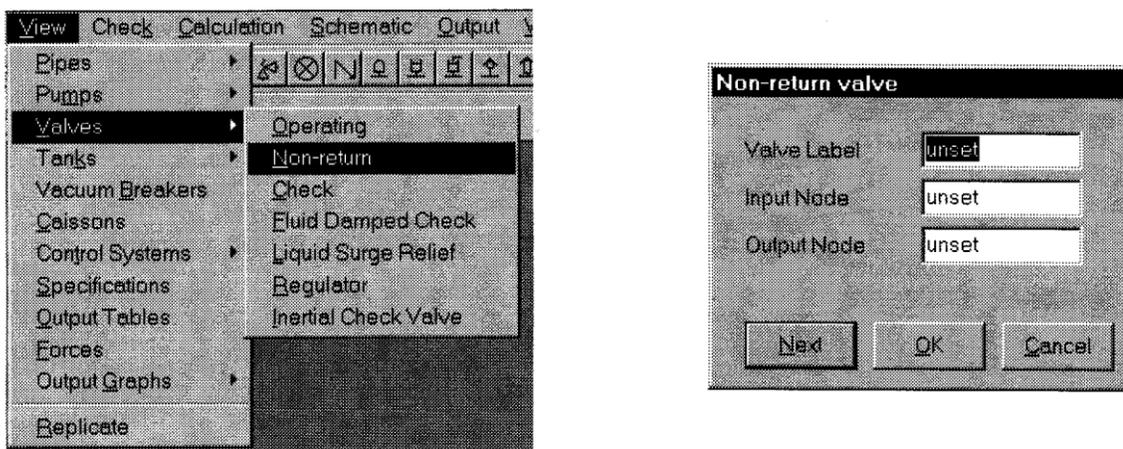


Figura V.2.6.E Ventana de dialogo para definir válvulas de retención

### V.2.6.E.b Parámetros a introducir por el usuario

Los parámetros a introducir por el usuario son: Designación de la válvula, nodo de entrada y salida de flujo

### V.2.6.E.c Ecuación de modelación

Válvula abierta:

$$P_1 = P_2$$

Válvula cerrada:

$$Q_1 = 0$$

Donde:

$P_1$ : Presión de entrada

$P_2$ : Presión de salida

$Q_1$ : Caudal de entrada

### V.2.7 Ecuación para especificaciones del usuario

#### V.2.7.A Descripción

Las especificaciones son usadas por el usuario para describir el comportamiento de válvulas y bombas en el arreglo, así como también, valores de presión y flujo en la modelación.

Una especificación de presión o flujo es requerida en todo punto de entrada y salida del modelo.

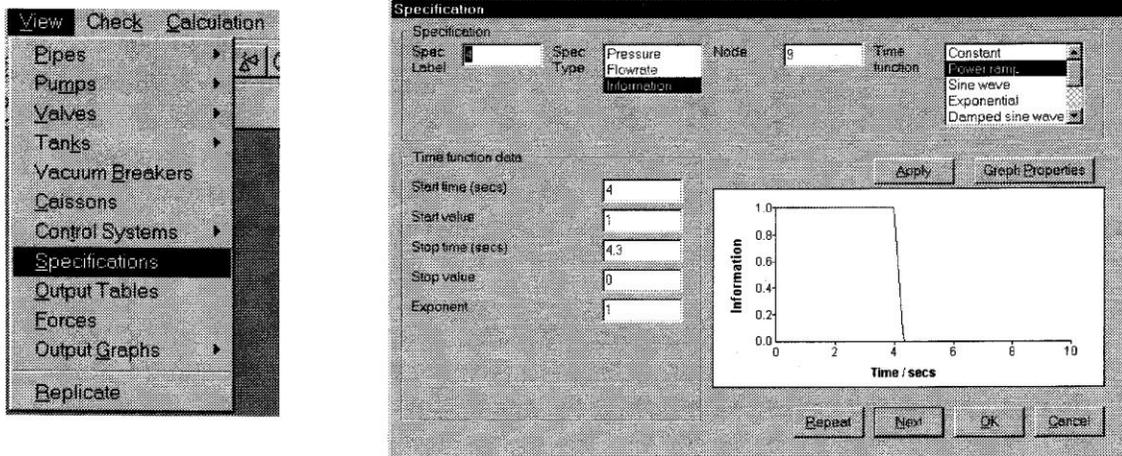
Note que:

- PIPENET usa la convención de que el flujo es positivo si entra y negativo si sale del modelo

- Debe haber al menos una especificación de presión en cualquier parte del modelo
- Solo una especificación es permitida en cada nodo
- No se permite una especificación de presión o flujo en un nodo interno del modelo.

Una especificación de información es usada para controlar la operación de una bomba o válvula. El valor de la especificación debe estar entre 0 y 1 (0 para la válvula totalmente cerrada o la bomba parada y 1 para la válvula totalmente abierta o máxima velocidad de la bomba). La especificación de información debe ser adjuntada a un nodo de información no teniendo otros elementos asociados a este.

### V.2.7.B Parámetros a introducir por el usuario



### V.2.7.B Ventana de dialogo para definir especificaciones

Los parámetros a introducir por el usuario son:

- Specification Label: Designación o nombre de la especificación
- Specification Type: Presión o Flujo para los nodos de entrada o salida del modelo.

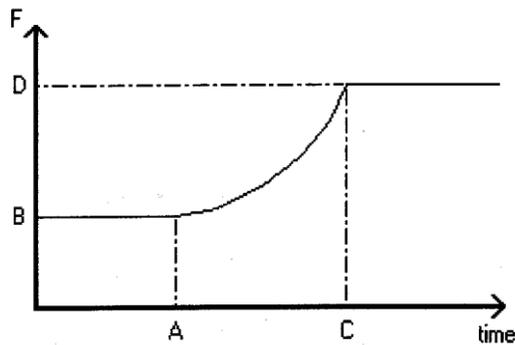
- Node: Nodo al cual la especificación se aplica
- Time Function: Selección de la función de tiempo disponible por el software y sus correspondientes parámetros asociados.

### V.2.7.C Ecuación de modelación

El usuario puede elegir entre nueve tipos de especificaciones. En cada caso el software calcula el valor de especificación en cada tiempo. Se expondrá a continuación la especificación Power Ramp que es la usada para nuestro modelo.

**Power Ramp:** Arroja los cambios en el valor de especificación en un periodo de tiempo especificado. El valor de especificación es asumido constante antes y después de Power Ramp.

La función que describe la especificación esta dada por:



$$F = \begin{cases} B & (t < A) \\ |F|^E & (A < t < C) \\ D & (C < t) \end{cases}$$

Siendo F':

$$F' = \frac{(C - t) \left( \frac{B}{|B|} \right) (|B|)^{\frac{1}{E}} + (t - A) \left( \frac{D}{|D|} \right) (|D|)^{\frac{1}{E}}}{C - A}$$

Donde:

*A: Tiempo de inicio de la especificación*

*B: Valor inicial de la especificación*

*C: Tiempo de finalización de la especificación*

*D: Valor final de la especificación*

*E: Exponente*

### **V.3 MODELACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y EMBARQUE DE CRUDO**

#### **V.3.1 Consideraciones**

Previo a la modelación del sistema se realizaron una serie de consideraciones que determinan los casos a evaluar y los parámetros que deben ser tomados en cuenta, apegándose a la filosofía de operación y al arreglo real propiamente dicho.

##### **V.3.1.A Casos más desfavorables**

Haciendo referencia a la sección II.1 CAUSAS DE GOLPE DE ARIETE en donde se expone con detalles las situaciones más desfavorables de dicho fenómeno transitorio, se determinó que los casos más críticos a evaluar debido a los cambios bruscos de velocidad del fluido y por ende los que generan mayor perturbación en el flujo, son: Cierre de Válvulas y Parada de bombas.

##### **V.3.1.B Caudal de operación**

Las simulaciones se llevaron a cabo con un caudal de operación de 50 MBPH (miles de barriles por hora) como se parametrizó en la sección IV.3 DESPACHO DE PRODUCTOS y que comprende la descripción del proceso.

### **V.3.1.C Fluido de simulación**

Entre los 7 productos de despacho que se simularon se seleccionó el MSSC 1 ( Crudo sintético de mediano contenido de azufre #1) cuyas características se describen en la Tabla IV.6.4 de la sección IV.6 DESCRIPCIÓN DE LOS PRODUCTOS DE DESPACHO, debido a que este crudo fue el que arrojó los máximos valores de sobrepresión para las mismas condiciones de simulación.

### **V.3.1.D Numero de bombas usadas en la simulación**

Del total de 13 bombas de embarque que comprende el TAEJ-N se seleccionaron para las simulaciones tres de ellas, dos bombas principales y una secundaria, cuyas características se exponen en las tabla Tablas IV.5.2.C.a-b, sección IV.5.2.C Bombas de Embarque pertenecientes al TAEJ-N, debido a que la suma de sus capacidades de operación es de 35000 GPM (galones por minuto), realizando la conversión 50 MBPH, se verifica que cumple con el caudal de operación parametrizado en la simulación

### **V.3.1.E Cierre de válvulas**

Las válvulas en el modelo del Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación seleccionadas para ser cerradas en la simulación, están localizadas en los extremos finales de cada brazo de carga. Estas válvulas virtuales son especificadas para modelar dos tipos de válvulas según sea el caso, las válvulas QCDC (Quick Close Design Coupling) y las válvulas de embarque ( Ship valves), las cuales varían entre si en tiempo de cierre y características físicas. Las demás válvulas existentes en el modelo se simulaban 100% abiertas y no se manipularon en la simulación.

### **V.3.1.F Parada de bombas**

La parada de bombas se supondrá como consecuencia de una falla eléctrica en el suministro de energía del sistema de embarque, por consiguiente las tres bombas fallan al

mismo tiempo. Las curvas características de las bombas se corrigen para el manejo de MSSC 1, procedimiento descrito en la Sección 4 Propiedades de los Líquidos, CAMERON HYDRAULIC DATA.

### **V.3.1.G Condiciones de borde**

La presión de entrada del flujo (nodo de entrada) en el modelo se mantiene constante, teniendo como valor la presión atmosférica, ya que el modelo se inicia en el tanque de almacenamiento TA2-T-06 descrito en la tabla IV.5.2.A.b de la sección IV.5.2.A Tanques de Almacenamiento, siendo este de tipo techo flotante.

El caudal de salida del sistema (nodos de salida) en el modelo es de 50 MBPH (miles de barriles por hora) dividido en cuatro caudales iguales para cada brazo de carga (12.5 MBPH), realizando la conversión de unidades,  $0.5520 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Estos valores paramétricos requeridos por los nodos de frontera son para las condiciones de flujo estable estado inicial de las simulaciones propuestas.

### **V.3.1.H Ruta de flujo en el modelo**

Para la modelación se escogió el tanque de almacenamiento más alejado del muelle de embarque designado como T-A2-06, ya que este involucra la ruta de mayor longitud y es el de mayor capacidad de operación.

### **V.3.1.I Lazos de embarque**

De los dos lazos de embarque de 36” disponibles en el sistema, se considero solo uno de ellos en la modelación del arreglo, ya que por el caudal manejado de 50 MBPH (barriles por hora) y de las dimensiones de la tubería 34.75” de diámetro interno obtenemos una velocidad de flujo de 3.36 m/s valor aceptable entre los rangos de velocidades recomendadas (max 3.7 m/s para diámetros mayores a 10”). Ver anexo

### V.3.2 Descripción

El arreglo del Sistema de almacenamiento y embarque de Crudo para Exportación se modeló como una serie de tuberías elásticas y tuberías cortas interconectadas entre si por válvulas, nodos y bombas, teniendo cada uno de estos elementos, características propias consonas con la realidad del elemento que se quiere modelar. A continuación se presenta el esquema de modelación realizado por el software en donde se puede apreciar el ruteo de tuberías, las bombas en paralelo y le representación de los cuatro brazos de carga.

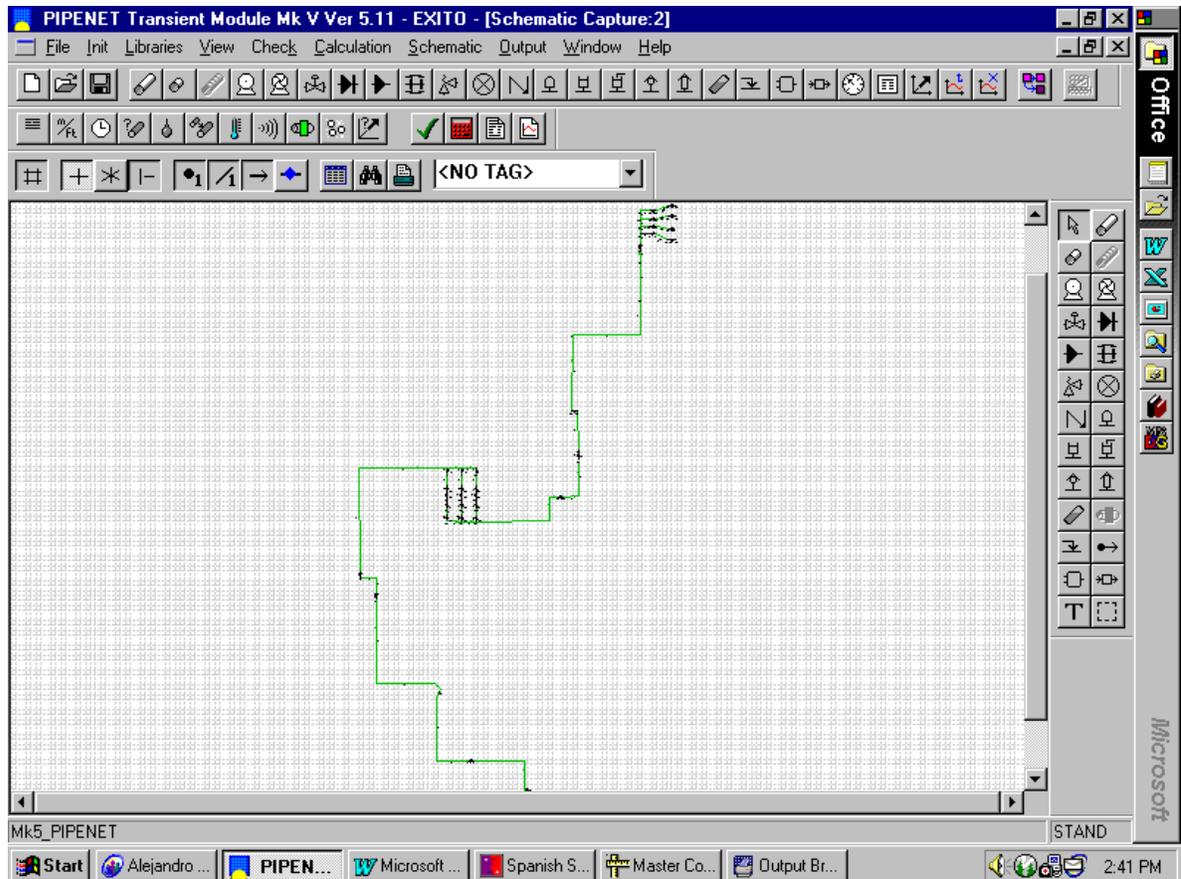


Figura V.3.2 Esquema de modelación del arreglo

### V.3.2.A Modelación de tuberías

El numero total de tuberías en el modelo es de 33 de las cuales 12 son tipo Short pipe y 21 tipo Elastic pipe, ver la sección V.2 Ecuaciones de modelación del software.

Todas las longitudes y elevaciones del perfil de tubería del modelo se obtuvieron de los planos recolectados en la fase de recopilación de datos, siendo estos planos listados en el anexo. A continuación se ejemplifican las ventanas de introducción de datos para tuberías elásticas (elastic pipe)

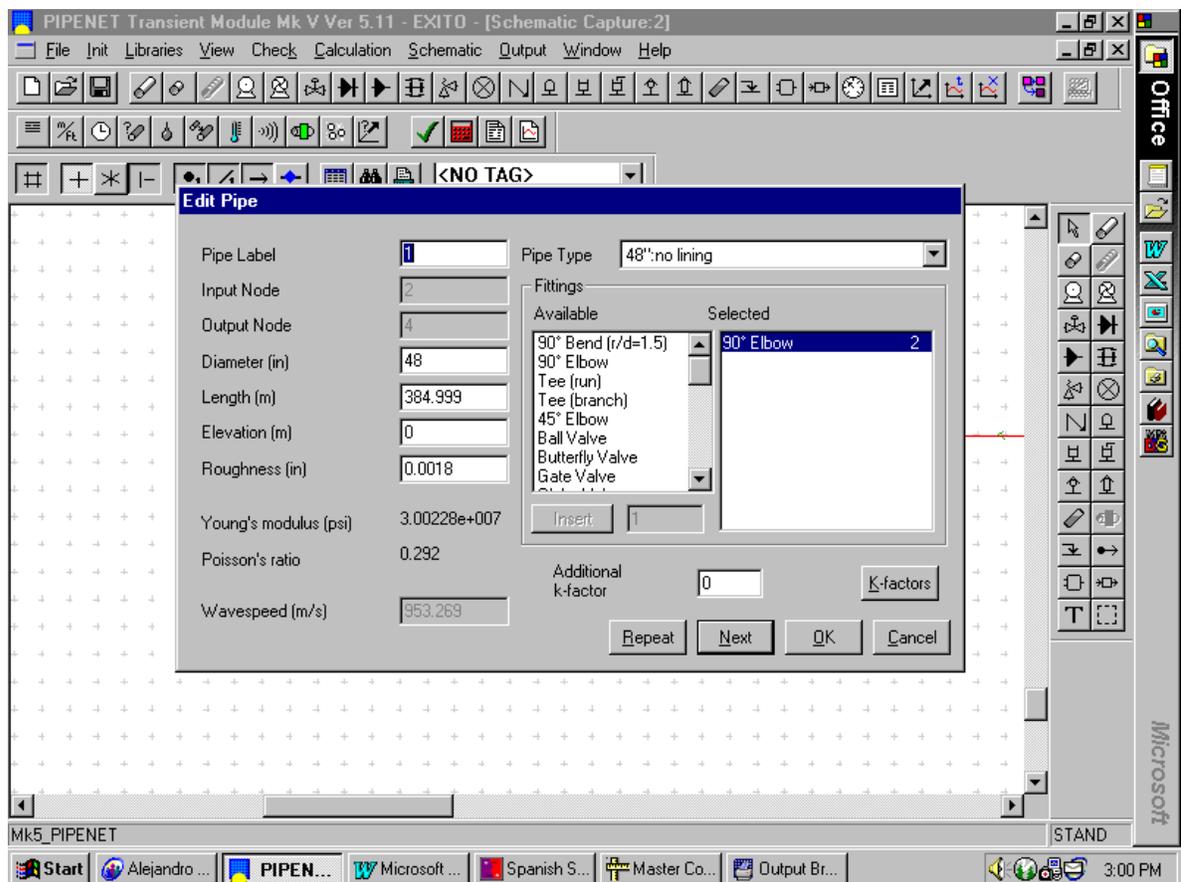


Figura V.3.2.A Tubería elástica

### V.3.2.A.a Data de tuberías elásticas y cortas

Identificación	Longitud (m)	Elevación (m)	Línea a modelar	Nodo	
				Entrada	Salida
1	385	0	48-P-08-20-0503-BA2Y-PP	2	4
2	1764	-34	48-P-08-20-0521-AA2Y	5	6
3	25	0	48-P-08-20-0521-AA2Y	8	10
4	1150	-8	60"-P-TA1-126-AA1	11	13
5	23	1.16	36"-P-TA1-1027J-AA1	16	22
6	23	1.16	36"-P-TA1-1028J-AA1	18	23
7	23	1.16	20"-P-TA1-1045F-AA1	20	24
8	14	-3.45	24"-P-TA1-1019-BA1	40	95
9	14	-3.45	24"-P-TA1-1020-BA1	42	96
10	14	-3.45	20"-P-TA1-1046-BA1	44	97
11	204	-1.49	36"-P-TA1--214-BA1	48	49
12	77	-0.73	36"-P-TA1--214-BA1	50	52
13	63	0	36"-CR-IN-27-BA4	57	54
14	580	-2.5	36"-CR-IN-27-DA1	60	64
15	1140	-7.5	36"-CR-IN-27-DA1	61	62
16	6170	-21	36"-CR-IN-28-DA1	62	63
17	32	31	36"-CR-IN-28-DA1	63	64
18	31	24	16"-CR-IN-30D-AA1	75	83
19	31	24	16"-CR-IN-30C-AA1	77	84
20	31	24	16"-CR-IN-30B-AA1	79	85
21	31	24	16"-CR-IN-30A-AA1	81	86

Tabla V.3.2.A.a Data Tubería Elástica

Identificación	Longitud (m)	Elevación (m)	Línea a modelar	Nodo	
				Entrada	Salida
1	7	0	60"-P-TA1-126-AA1	13	14
2	7	0	60"-P-TA1-126-AA1	14	15
3	7	0	36"-P-TA1--214-BA1	46	47
4	7	0	36"-P-TA1--214-BA1	47	48
5	4	0	36"-CR-IN-28-DA1	65	67
6	4.5	0	36"-CR-IN-28-DA1	67	68
7	4.5	0	36"-CR-IN-28-DA1	68	69
8	4.5	0	36"-CR-IN-28-DA1	69	70
9	3.84	0	24"-.-CR-IN-29A-BA4	70	74
10	3.84	0	24"-.-CR-IN-29B-BA4	69	73
11	3.84	0	24"-.-CR-IN-29C-BA4	68	72
12	3.84	0	24"-.-CR-IN-29D-BA4	67	71

Tabla V.3.2.A.b Data Tubería corta

### V.3.2.B Modelación de válvulas

En el modelo se colocaron 28 válvulas, 8 de estas los brazos de carga (dos en c/u), 6 en los cabezales de succión (2 en c/u), 6 en los cabezales de descarga (2 en c/u), 1 a la salida del tanque de almacenamiento y las demás a lo largo de la ruta de embarque. Es importante recordar que las válvulas de mayor importancia para la simulación son la de los extremos finales de los brazos de carga, ya que estas son las que son manipuladas por el usuario (Válvulas QCDC y Válvulas de Embarque) cuyas características se determinaron en base a la analogía realizada con respecto a un estudio de flujo transitorio efectuado por M.W. Kellogg en el TAEJ-N en condiciones similares. Ver anexo. A continuación se presentan a una ejemplificación de la ventana de datos requeridos.

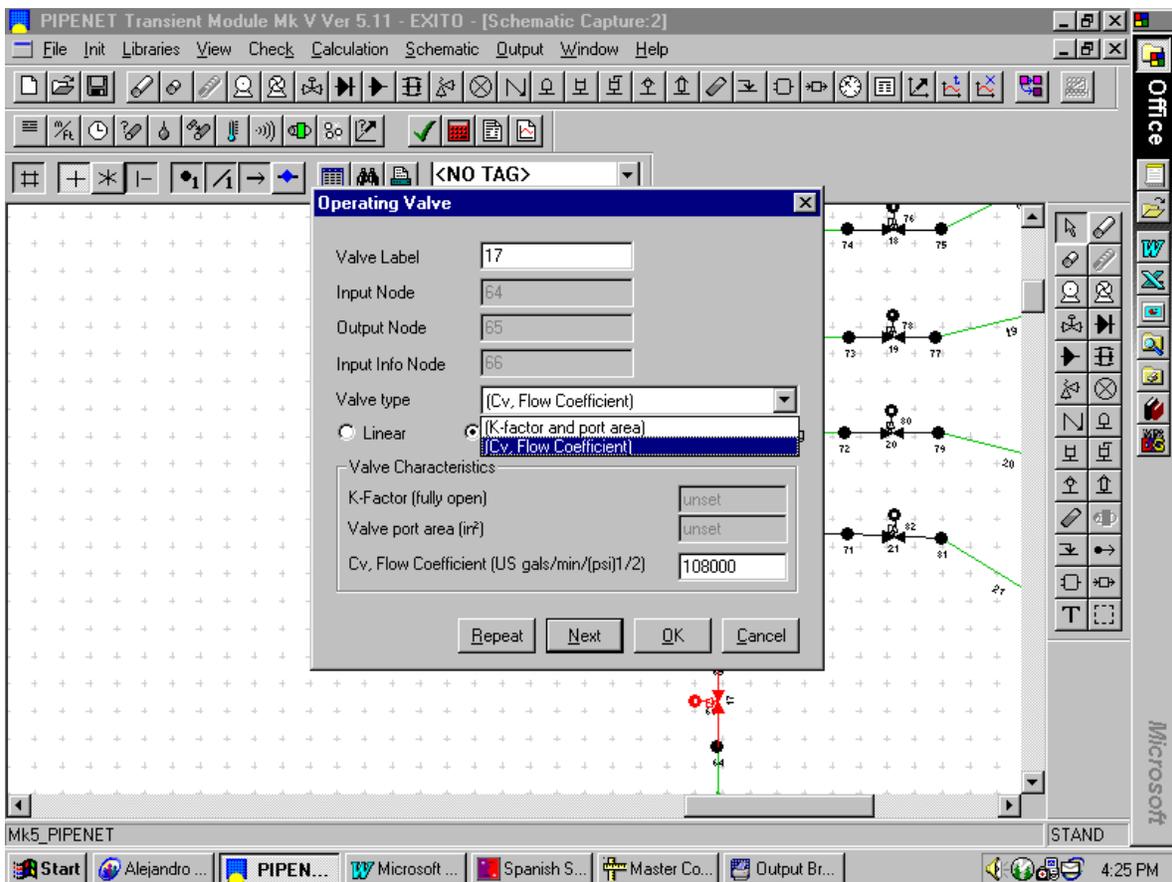


Figura V.3.2.B Modelación de válvulas

### V.3.2.B.a Data de Válvulas de operación y de retención

Válvulas QCDC						
Identificación	Tipo de Válvula	Curva característica	Nodo			Cv
			Entrada	Salida	Información	
22	Bola	Igual porcentaje de apertura	83	87	88	31100
23	Bola		84	89	90	31100
24	Bola		85	91	92	31100
25	Bola		86	93	94	31100

Tabla V.3.2.B.a.1 Data válvula QCDC

Válvulas de Embarque						
Identificación	Tipo de Válvula	Curva característica	Nodo			Cv
			Entrada	Salida	Información	
22	Mariposa	Igual porcentaje de apertura	83	87	88	11800
23	Mariposa		84	89	90	11800
24	Mariposa		85	91	92	11800
25	Mariposa		86	93	94	11800

Tabla V.3.2.B.a.2 Data válvula de Embarque

Válvulas de Retención		
Identificación	Nodo	
	Entrada	Salida
1	31	37
2	33	38
3	35	39

Tabla V.3.2.B.a.3 Data válvula de Retención

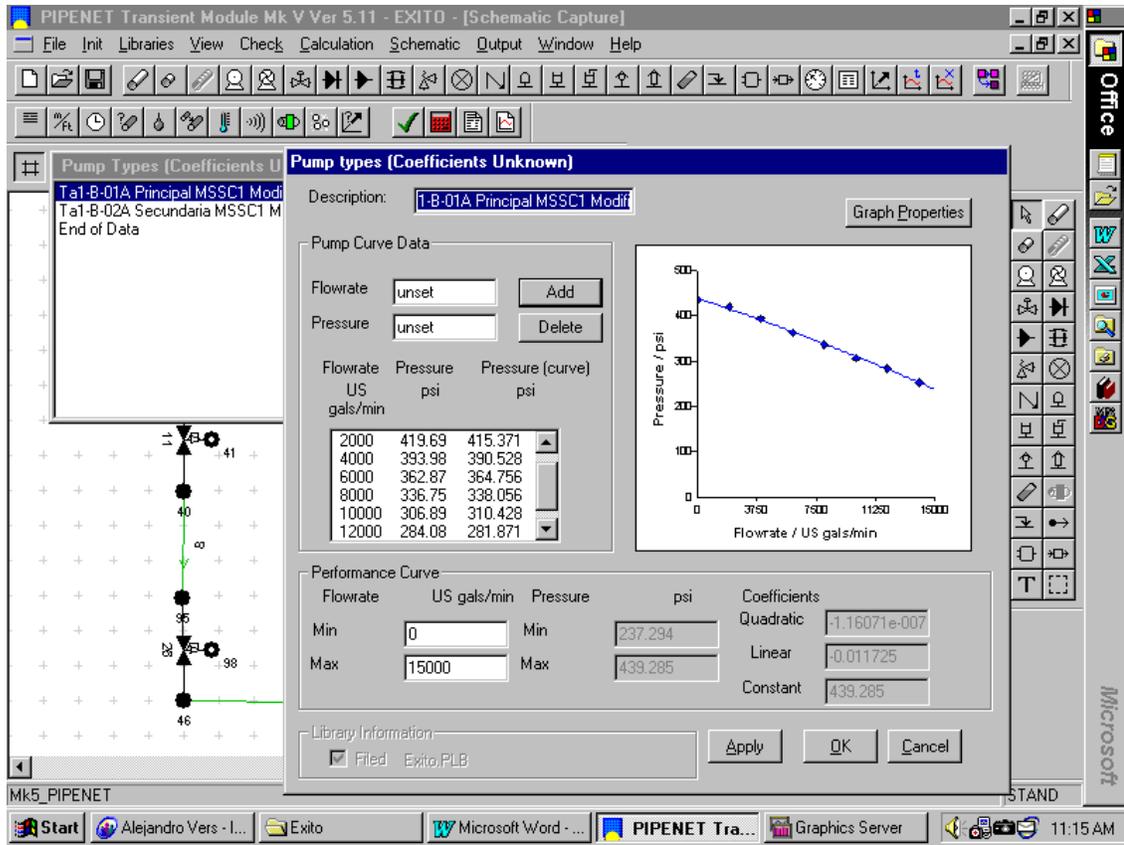
Válvulas del Sistema						
Identificación	Tipo de Válvula	Curva característica	Nodo			Cv
			Entrada	Salida	Información	
Plataforma 76/78/80/82	Compuerta	Igual porcentaje de apertura	74/73/72/71	75/77/79/81	76/78/80/82	44000
Succión de Bombas 5/6/7/8/9/10	Compuerta		13/14/15/22/ 23/24	16/18/20/25/ 27/29	17/19/21/26/28 /30	108000/ 31000
Descarga de Bombas 11/12/13/26 /27/28	Compuerta		37/38/39/95/ 96/97	40/42/44/46/ 47/48	41/43/45/98/99 /100	45000/ 31000
Descarga del Tanque 1	Compuerta		1	2	3	142000
Línea de 48" TAEJ-S	Compuerta		4/7/10	5/8/11	6/9/12	190000
Línea de 36" TAEJ-N	Compuerta		49/52/57/64	50/54/60/65	14/53/55/60	108000

**Tabla V.3.2.B.a.4 Data válvulas del Sistema**

### V.3.2.C Modelación de Bombas

Se modelaron tres bombas, dos principales y una secundaria. Durante las simulaciones de cierre de válvulas (QCDC y de embarque) se consideró que las bombas operan a su máxima velocidad; para el caso de parada de bombas, la velocidad de estas es manipulada por el usuario desde su máximo valor hasta cero. Las curvas características de estas bombas son corregidas por efectos viscosos para el MSSC 1 según el procedimiento descrito en la sección 4 del CAMERON HYDRAULIC DATA (ver referencias bibliográfica)

A continuación se ejemplifica la ventana de introducción de la data necesaria de la curva característica corregida para la bomba principal, procedimiento análogo para la curva característica de la bomba secundaria. Los datos ha ser introducidos por el usuario comprende la curva característica de la bomba junto con el flujo máximo y mínimo de esta.

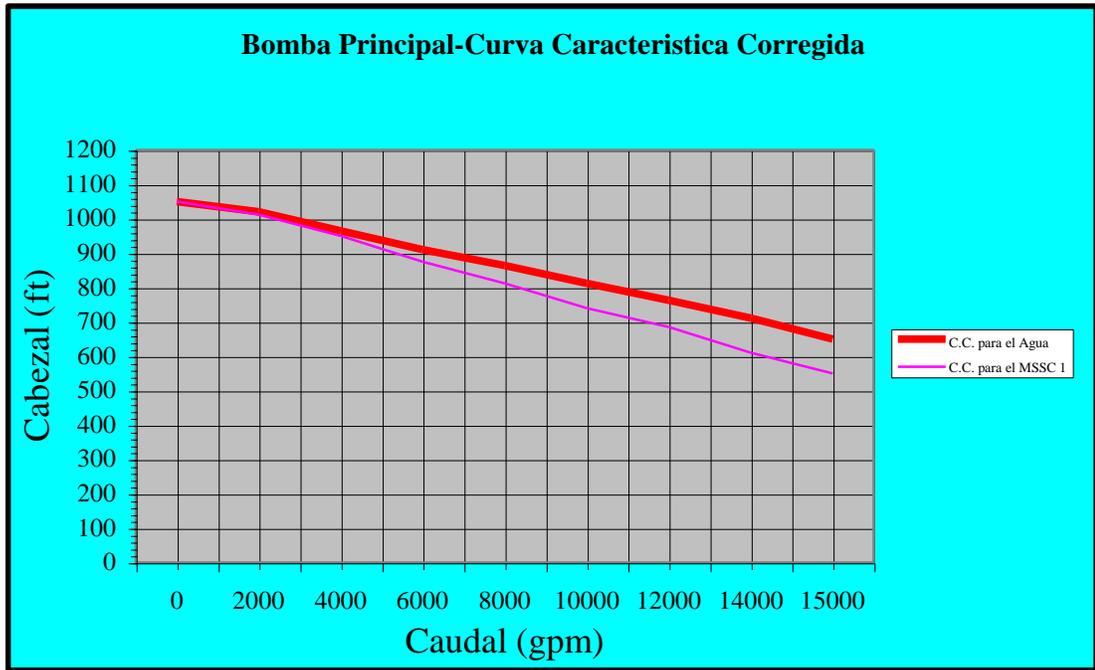


**Figura V.3.2.C Introducción de la data Bomba-Principal**

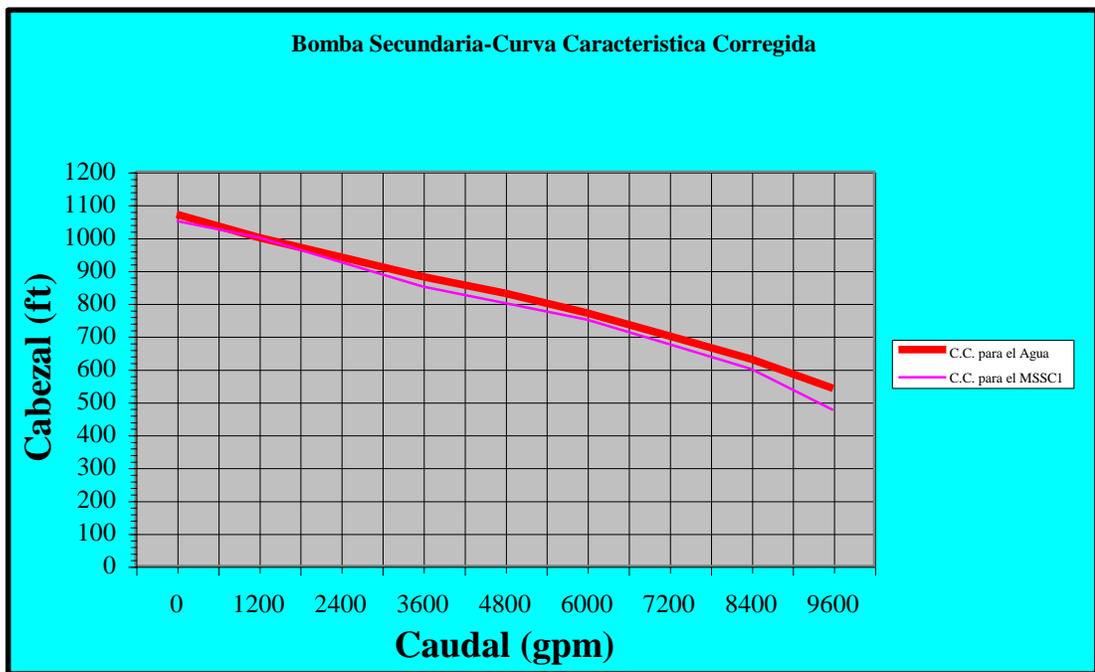
Bombas de Embarque				
Identificación		Nodos		
		Entrada	Salida	Información
Principal	32	25	31	32
	34	27	33	34
Secundaria	36	29	35	36

**Tabla V.3.2.C Modelación de Bombas**

### V.3.2.C Corrección de las curvas características de las bombas por efectos viscosos



Gráfica V.3.2.C.a Bomba Principal-Curva Característica Corregida



Gráfica V.3.2.C.b Bomba Secundaria- Curva Característica Corregida

### V.3.2.D Modelación de especificaciones

Las especificaciones a modelar en el sistema son: Presión en la entrada del sistema, flujo a la salida del sistema, parada de bombas, cierre de válvulas QCDC y cierre de válvulas de embarque. Estas especificaciones son asociadas a los elementos de interés a través de sus respectivos nodos de información, Ver sección V.2.7 Ecuación para especificación del usuario. Es importante destacar que a través de estas especificaciones, es que el usuario puede obtener diversas simulaciones para el mismo arreglo base. A continuación se presenta una ejemplificación de la ventana de introducción de la data de especificaciones.

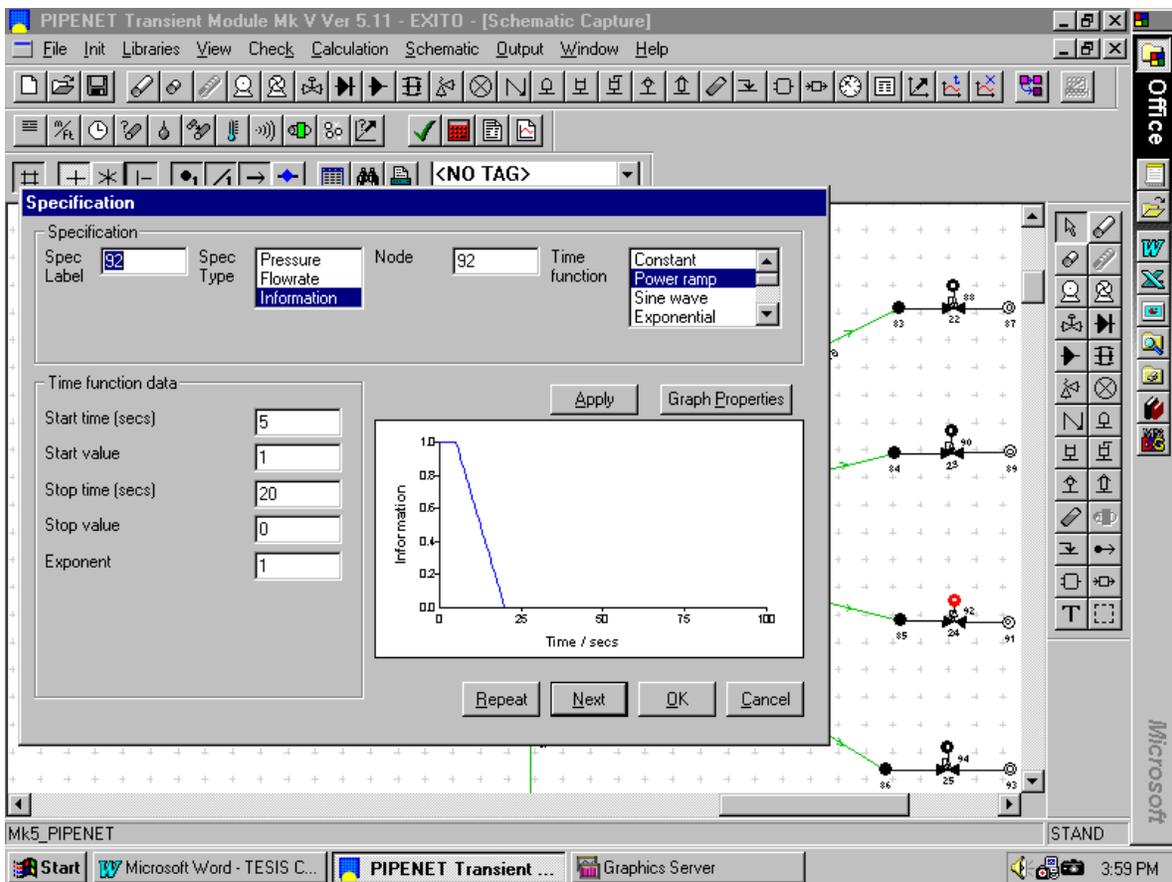


Figura V.3.2.D Ventana para la data de especificaciones

### V.3.2.D.a Data de especificaciones

Presión a la entrada del sistema			
Identificación	Tipo de especificación	Tipo de función	Valor constante
1	Presión	Constante	14.7 PSIA

**Tabla V.3.2.D.a Especificaciones-Entrada del sistema**

Flujo de salida del sistema			
Identificación	Tipo de especificación	Ti'po de función	Valor constante
87	Flujo	Constante	12.5 MBPH
89	Flujo	Constante	12.5 MBPH
91	Flujo	Constante	12.5 MBPH
93	Flujo	Constante	12.5 MBPH

**Tabla V.3.2.D.b Especificaciones-Salida del sistema**

Cierre de válvulas QCDC ( 5 seg)							
Identificación	Tipo de especificación	Nodo de información	Función de tiempo	Valor inicial	Valor final	Tiempo inicial	Tiempo final-
88	información	88	Power Ramp	1	0	5	10
90	información	90	Power Ramp	1	0	5	10
92	información	92	Power Ramp	1	0	5	10
94	información	94	Power Ramp	1	0	5	10

**Tabla V.3.2.D.c Especificaciones-Cierre de válvula QCDC**

<b>Cierre de válvulas de Embarque (15 seg)</b>							
Identificación	Tipo de especificación	Nodo de información	Función de tiempo	Valor inicial	Valor final	Tiempo inicial	Tiempo final
88	Información	88	Power Ramp	1	0	5	20
90	Información	90	Power Ramp	1	0	5	20
92	Información	92	Power Ramp	1	0	5	20
94	Información	94	Power Ramp	1	0	5	20

**Tabla V.3.2.D.d Especificaciones-Cierre de válvula de embarque**

<b>Parada de bombas (*)</b>							
Identificación	Tipo de especificación	Nodo de información	Función de tiempo	Valor inicial	Valor final	Tiempo inicial	Tiempo final
32	Información	32	Power Ramp	1	0	5	55
34	Información	34	Power Ramp	1	0	5	55
36	Información	36	Power Ramp	1	0	5	55

**Tabla V.3.2.D.e Especificaciones-Parada de bombas**

(\*) La parada de bomba se especifico al aproximar el comportamiento de detención (velocidad de operación) expuesto por el estudio CORPOVEN HYDRAULIC TRANSIENT ANALYSIS CRUDE LOADING SYSTEM realizado por M.W Kellogg e identificado con la corrida # 4031 Trip of Loading Pumps y en el cual se simulan las mismas bombas que nuestro arreglo. Ver gráfica anexa.

## V.4 RESULTADOS OBTENIDOS

Se procedió a simular todos los casos referidos según la data expuesta y las características de modelación descritas, obteniendo para cada tubería modelada un rango de presión y caudal en el cual el flujo varía producto del fenómeno transitorio Golpe de Ariete. A continuación se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones considerando los valores extremos de presión y caudal alcanzados por cada tubería, pero anexo se encuentran las corridas del programa describiendo con mas detalle el comportamiento interno de estos rangos de valores con sus respectivos tiempos de ocurrencia. Es importante destacar que estos resultados son específicos para la modelación del Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación, tomando en cuenta las consideraciones y especificaciones particulares mencionadas en las secciones anteriores.

### V.4.1 Caso-Flujo estable del Sistema

Esta es una simulación previa a los casos de flujo transitorio, en donde las bombas operan a su máxima y constante velocidad y todas las válvulas permanecen 100% abiertas en todo momento, no existe perturbación en el sistema de ninguna índole.

Flujo Estable en tuberías Cortas (*)					
	Identificación/ Especificación	Longitud (m)	Diametro Nominal	Presion (PSIA)	Caudal (m <sup>3</sup> /Seg)
1	60"-P-TA1-126-AA1	7	60	52.434	1.34
2	60"-P-TA1-126-AA1	7	60	52.433	0.489
3	36"-P-TA1--214-BA1	7	36	300.626	0.859
4	36"-P-TA1--214-BA1	7	36	300.527	1.719
5	36"-CR-IN-28-DA1	4	36	86.815	2.208

**Tabla V.4.1.a Presión y Caudal Caso-Flujo Estable del Sistema  
Tuberías cortas.**

Flujo Estable en tuberías Cortas (*)					
Identificación/ Especificación		Longitud (m)	Diametro Nominal	Presion (PSIA)	Caudal (m <sup>3</sup> /Seg)
6	36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	86,755	1,656
7	36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	86,725	1,104
8	36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	86,716	0,552
9	24"-.CR-IN-29A-BA4	3,84	24	86,761	0,552
10	24"-.CR-IN-29B-BA4	3,84	24	86,701	0,552
11	24"-.CR-IN-29C-BA4	3,84	24	86,672	0,552
12	24"-.CR-IN-29D-BA4	3,84	24	86,663	0,552

**Tabla V.4.1.a Continuación Presión y Caudal Caso-Flujo Estable del Sistema Tuberías cortas.**

(\*) Usando el modelo de tubería corta como un sustituto del modelo de tubería elástica ofrece un gran ahorro en el tiempo de procesamiento de datos, dado que, la longitud de la tubería determina el periodo de tiempo entre cada fase de cálculo. Este modelo asume que la presión transitoria viaja a través de la tubería corta instantáneamente, suposición valedera, debido a las pequeñas longitudes de tuberías modeladas con respecto a la longitud del sistema.

Flujo Estable en tuberías Elásticas								
Identificación/ Especificación		Longitud (m)	Diametro Nominal	Presion (PSIA)				Caudal (m <sup>3</sup> /Seg)
				Minima	Distancia desde la entrada	Maxima	Distancia desde la entrada	
1	48-P-08-20-0503-BA2Y	385	48	12.094	385	14.642	0	2.208
2	48-P-08-20-0521-AA2Y	1764	48	12.06	0	45.504	1764	2.208

**Tabla V.4.1.b Caudal y Rango de Presiones Caso-flujo estable Tuberías elásticas**

Flujo Estable en tuberías Elásticas								
Identificación/ Especificación	Longitud (m)	Diametro Nominal	Presion (PSIA)				Caudal (m <sup>3</sup> /Seg)	
			Minima	Distancia desde la entrada	Maxima	Distancia desde la entrada		
3	48-P-08-20-0521-AA2Y	25	48	45.317	0	45.483	25	2.208
4	60"-P-TA1-126-AA1	1150	60	45.284	0	52.44	1150	2.208
5	36"-P-TA1-1027J-AA1	23	36	50.459	23	52.425	0	0.859
6	36"-P-TA1-1028J-AA1	23	36	50.453	23	52.419	0	0.859
7	20"-P-TA1-1045F-AA1	23	20	48.91	23	52.373	0	0.489
8	24"-P-TA1-1019-BA1	14	24	298.097	0	300.747	14	0.859
9	24"-P-TA1-1020-BA1	14	24	297.998	0	300.718	14	0.859
10	20"-P-TA1-1046-BA1	14	20	297.489	0	300.591	14	0.489
11	36"-P-TA1--214-BA1	204	36	295.278	204	300.527	0	2.208
12	36"-P-TA1--214-BA1	77	36	293.382	77	295.177	0	2.208
13	36"-CR-IN-27-BA4	63	36	289.855	63	293.281	0	2.208
14	36"-CR-IN-27-DA1	580	36	277.124	580	289.754	0	2.208
15	36"-CR-IN-27-DA1	1140	36	257.331	1140	277.124	0	2.208
16	36"-CR-IN-28-DA1	6170	36	130.329	6170	257.331	0	2.208
17	36"-CR-IN-28-DA1	32	36	87.003	32	130.329	0	2.208
18	16"-CR-IN-30D-AA1	31	16	50.348	31	86.625	0	0.552
19	16"-CR-IN-30C-AA1	31	16	50.357	31	86.634	0	0.552
20	16"-CR-IN-30B-AA1	31	16	50.387	31	86.663	0	0.552
21	16"-CR-IN-30A-AA1	31	16	50.446	31	86.723	0	0.552

**Tabla V.4.1.b Continuación Caudal y Rango de Presiones Caso-flujo estable. Tuberías elásticas**

#### V.4.2 Caso-Cierre de Válvulas de Embarque (15 seg)

Esta es la primera simulación de flujo transitorio, en donde las bombas operan a su máxima y constante velocidad y las válvulas de embarque son cerradas en 15 seg , el inicio del cierre de válvulas se especificó a los 5 seg de simulación, alcanzando un cierre completo a los 20 seg de esta.

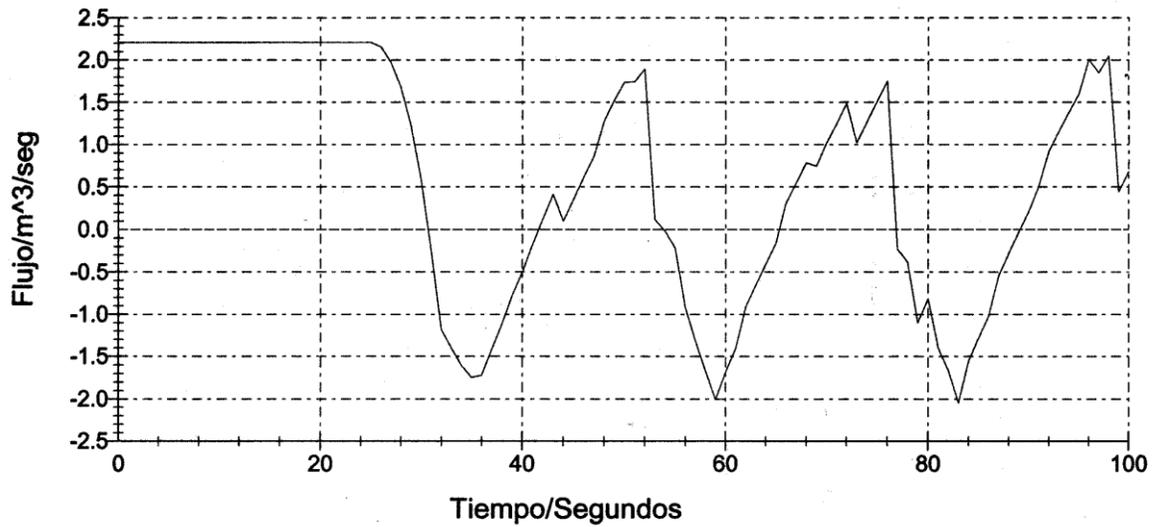
Cierre de válvula de embarque (15 seg) Tubería Corta							
Identificación/ Especificación	Longitud (m)	Diametro Nominal	Rango de presión de operación (PSIA)		Variación de Caudal en la tubería (m <sup>3</sup> /Seg)		
			Maxima	Minima	Maximo	Minimo	
1 60"-P-TA1-126-AA1	7	60	269,942	0,285	1,349	-0,471	
2 60"-P-TA1-126-AA1	7	60	269,96	0,275	0,489	-0,102	
3 36"-P-TA1--214-BA1	7	36	749,247	300,626	0,859	-0,03	
4 36"-P-TA1--214-BA1	7	36	749,247	300,527	1,719	-0,006	
5 36"-CR-IN-28-DA1	4	36	753,836	86,815	2,208	-0,008	
6 36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	753,836	86,755	1,656	-0,006	
7 36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	753,837	86,725	1,104	-0,004	
8 36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	753,837	86,716	0,552	-0,002	
9 24"-.-CR-IN-29A-BA4	3,84	24	753,836	86,761	0,552	-0,002	
10 24"-.-CR-IN-29B-BA4	3,84	24	753,837	86,701	0,552	-0,002	
11 24"-.-CR-IN-29C-BA4	3,84	24	753,837	86,672	0,552	-0,002	
12 24"-.-CR-IN-29D-BA4	3,84	24	753,837	86,663	0,552	-0,002	

**Tabla V.4.2.a Rango de Presión y variación de caudal Caso-Cierre de válvulas de Embarque (15 seg) Tubería Corta.**

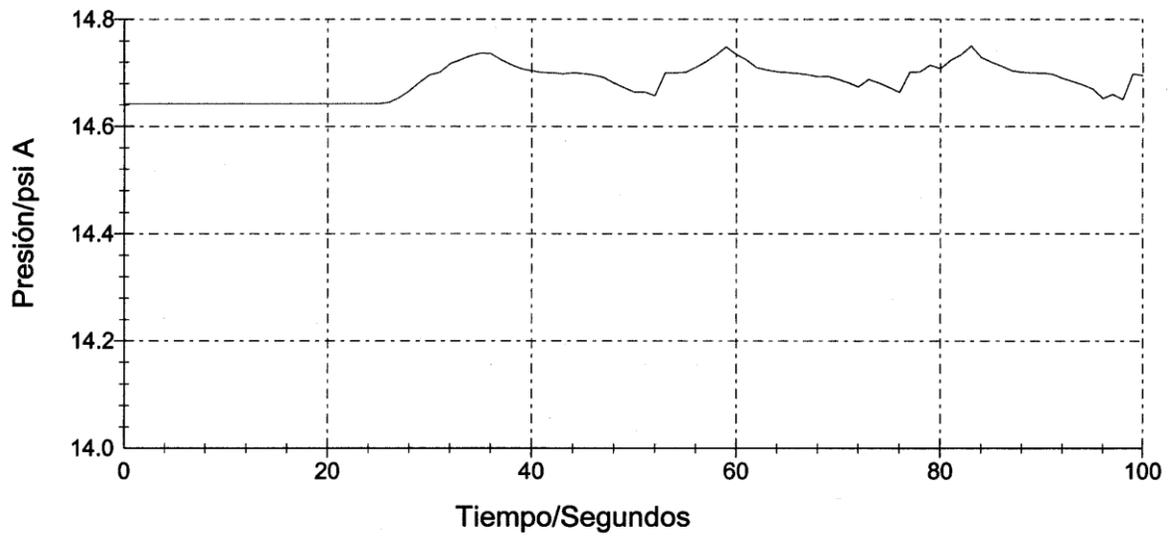
Cierre de válvulas de Embarque (15 seg) Tubería Elastica							
Identificación/ Especificación		Longitud (m)	Diametro Nominal (pulg)	Rango de Presión de operación (PSIA)		Variación de Caudal en la tubería (m <sup>3</sup> /seg)	
				Maxima	Minima	Maximo	Minimo
1	48-P-08-20-0503-BA2Y	385	48	115,884	0,275	2,208	-2,049
2	48-P-08-20-0521-AA2Y	1764	48	237,385	0,275	2,208	-1,856
3	48-P-08-20-0521-AA2Y	25	48	237,705	0,275	2,208	-1,59
4	60"-P-TA1-126-AA1	1150	60	269,945	0,275	2,208	-0,884
5	36"-P-TA1-1027J-AA1	23	36	269,945	0,275	0,859	-0,414
6	36"-P-TA1-1028J-AA1	23	36	269,942	0,275	0,859	-0,368
7	20"-P-TA1-1045F-AA1	23	20	269,96	0,275	0,489	-0,102
8	24"-P-TA1-1019-BA1	14	24	749,248	298,027	0,859	-0,003
9	24"-P-TA1-1020-BA1	14	24	749,247	297,998	0,859	-0,003
10	20"-P-TA1-1046-BA1	14	20	749,247	297,489	0,489	-0,002
11	36"-P-TA1--214-BA1	204	36	751,161	295,278	2,208	-0,026
12	36"-P-TA1--214-BA1	77	36	752,048	293,382	2,208	-0,024
13	36"-CR-IN-27-BA4	63	36	752,048	289,855	2,208	-0,024
14	36"-CR-IN-27-DA1	580	36	753,285	277,124	2,208	-0,024
15	36"-CR-IN-27-DA1	1140	36	754,516	257,331	2,208	-0,109
16	36"-CR-IN-28-DA1	6170	36	796,064	130,329	2,208	-0,013
17	36"-CR-IN-28-DA1	32	36	796,064	87,003	2,208	-0,008
18	16"-CR-IN-30D-AA1	31	16	753,837	50,348	0,552	0
19	16"-CR-IN-30C-AA1	31	16	753,837	50,357	0,552	0
20	16"-CR-IN-30B-AA1	31	16	753,837	50,387	0,552	0
21	16"-CR-IN-30A-AA1	31	16	753,836	50,446	0,552	0

**Tabla V.4.2.b Rango de Presión y variación de caudal Caso-Cierre de válvulas de Embarque (15 seg) Tubería Elástica.**

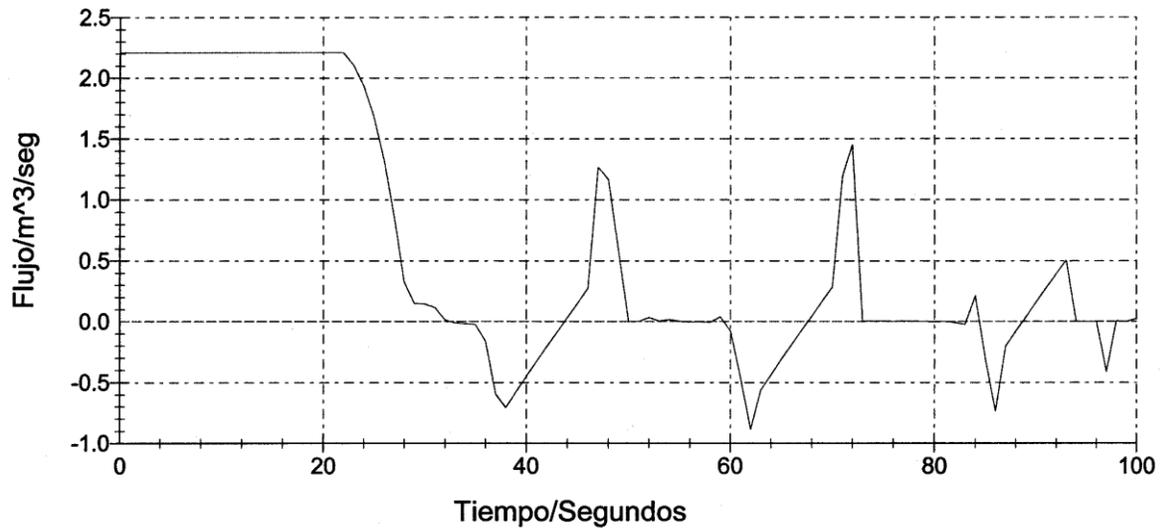
**Gráfica V.4.2.1 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A LA SALIDA  
DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO (48")**



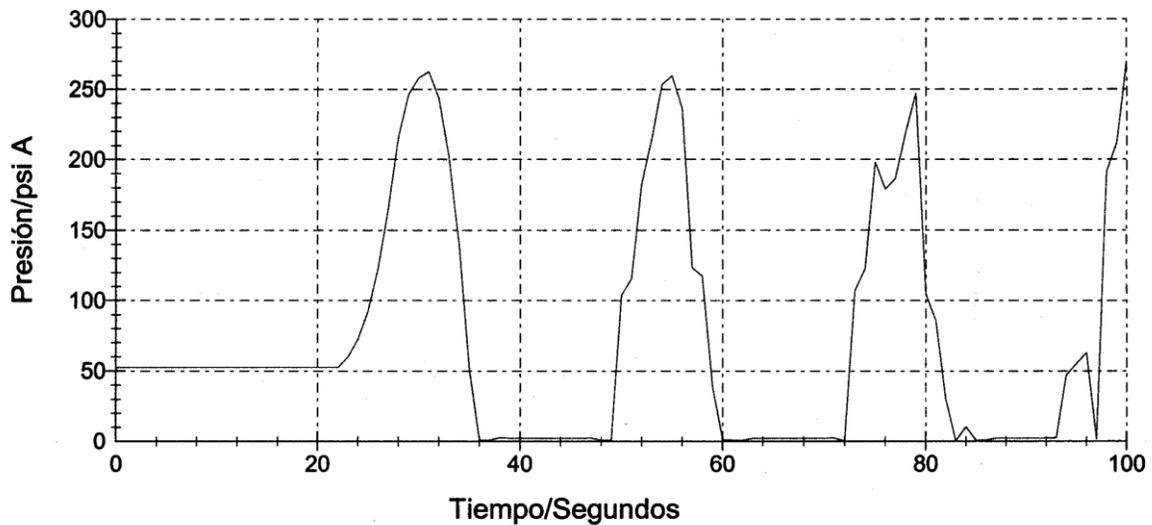
**Gráfica V.4.2.2 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN A LA SALIDA  
DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO (48")**



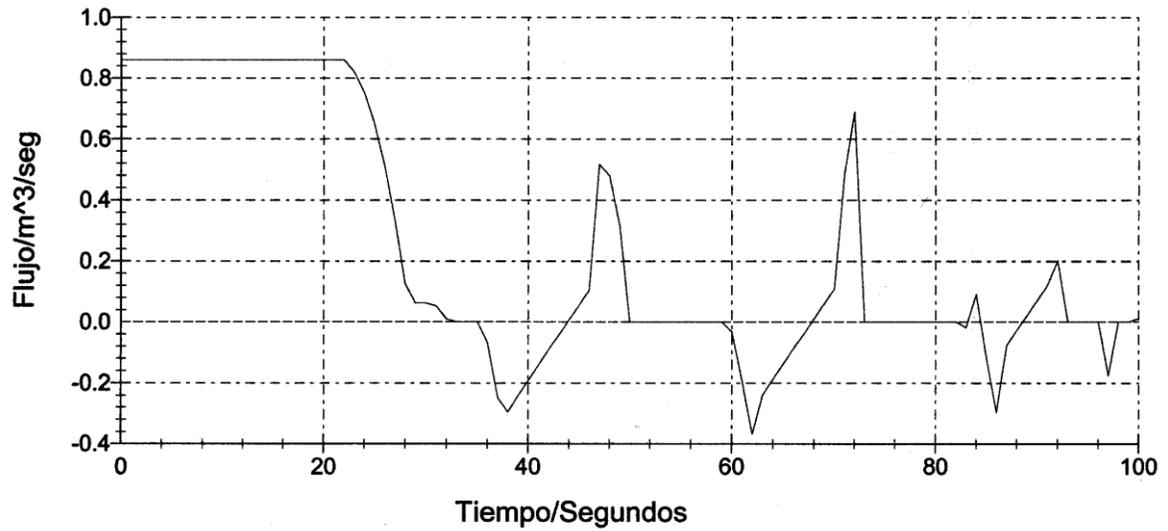
**Gráfica V.4.2.3 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN EL NODO  
DONDE SE INTERCONECTAN LOS 3 CABEZALES DE SUCCIÓN**



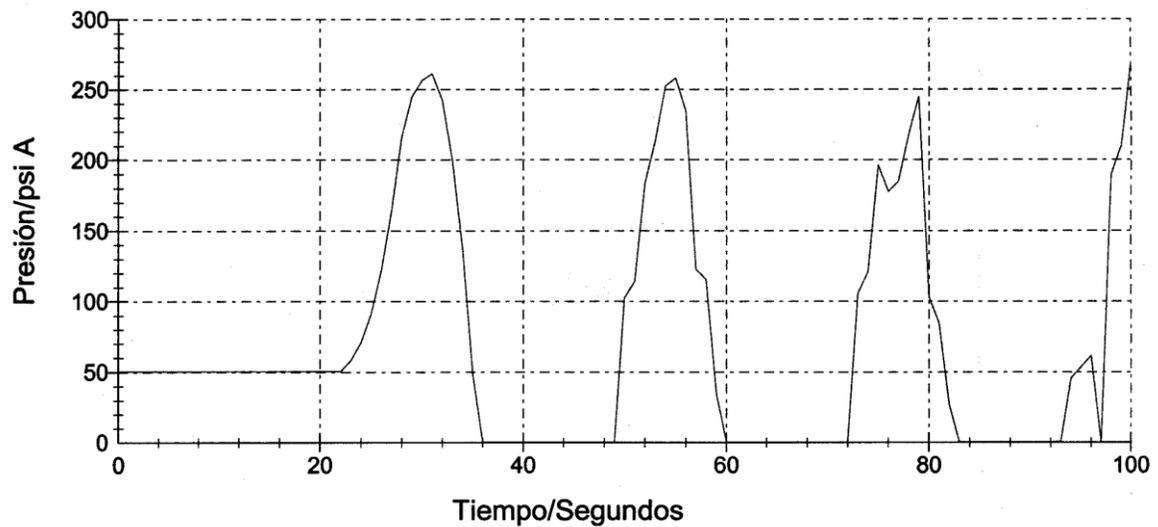
**Gráfica V.4.2.4 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN EL NODO  
DONDE SE INTERCONECTAN LOS 3 CABEZALES DE SUCCIÓN**



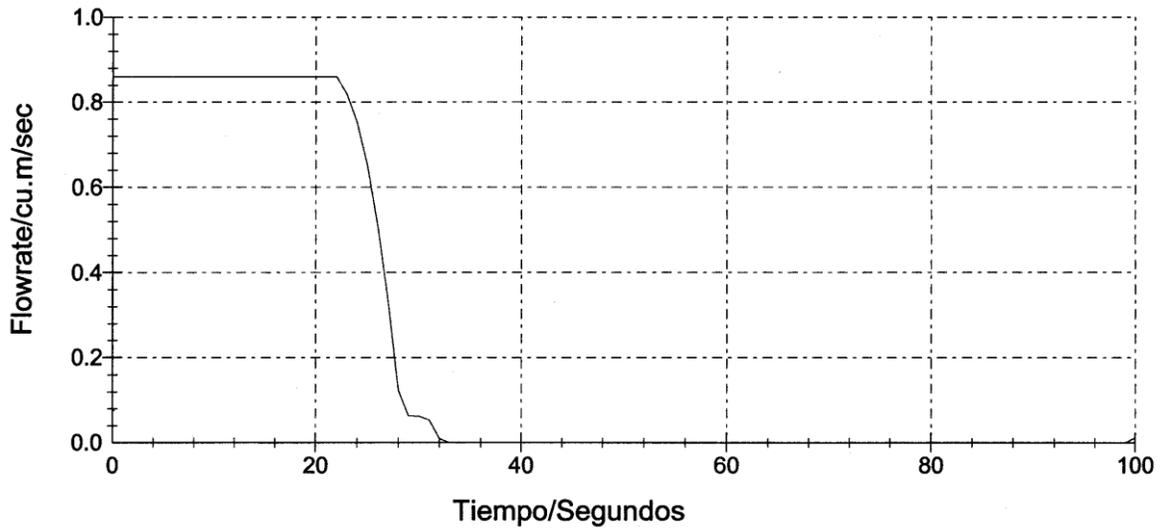
**Gráfica V.4.2.5 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA SUCCIÓN  
DE LA BOMBA PRINCIPAL (36")**



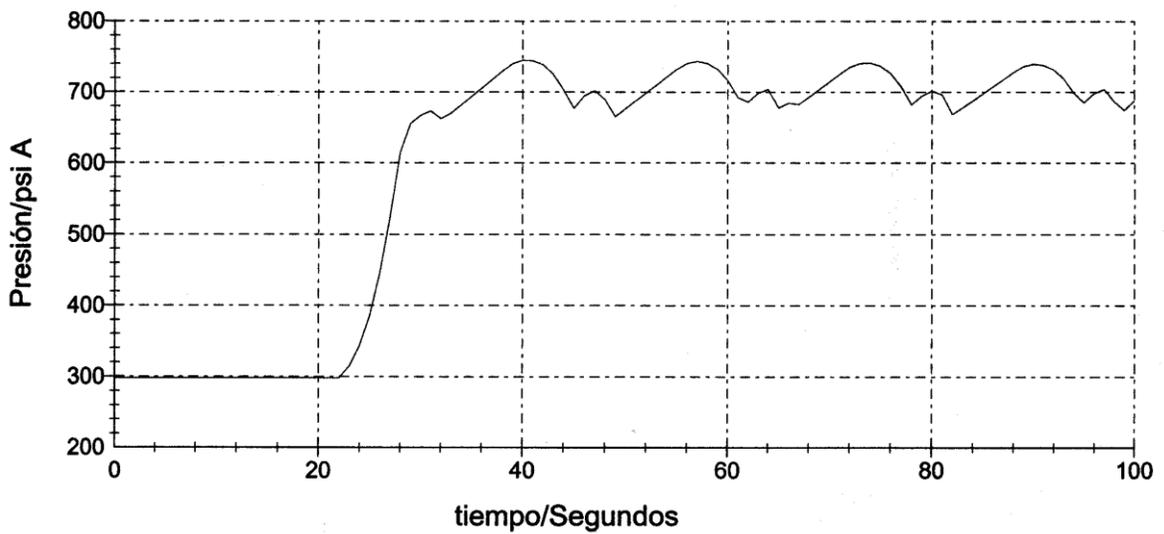
**Gráfica V.4.2.6 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA  
SUCCIÓN DE LA BOMBA PRINCIPAL (36")**



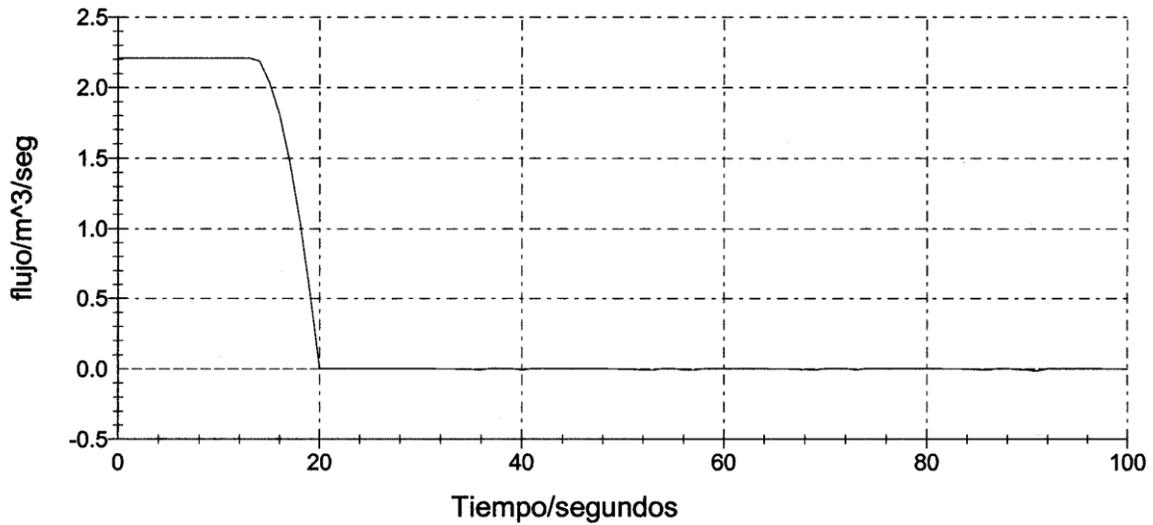
**Gráfica V.4.2.7 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA  
DESCARGA DE LA BOMBA PRINCIPAL (24")**



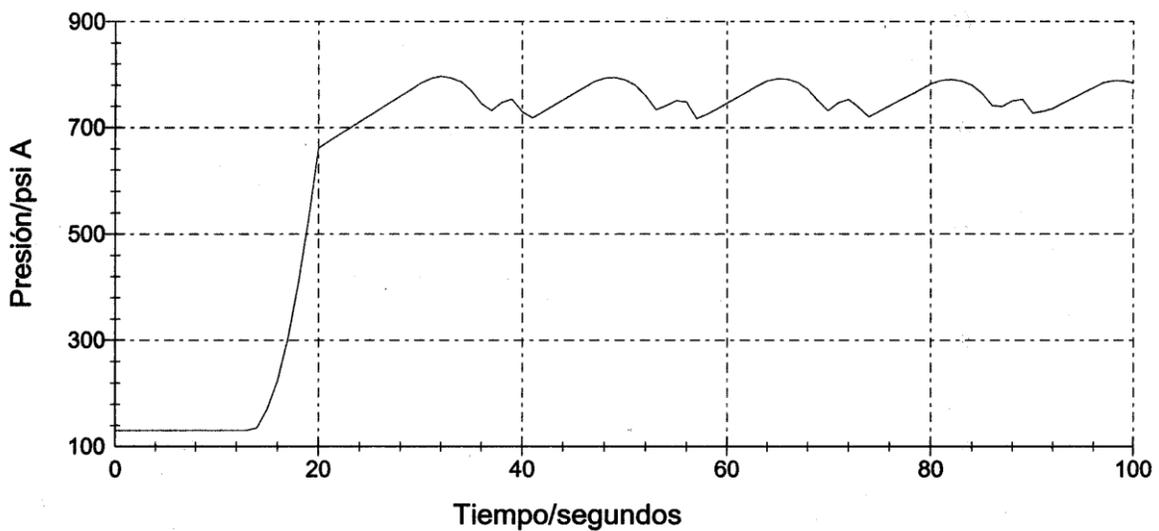
**Gráfica V.4.2.8 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA  
DESCARGA DE LA BOMBA PRINCIPAL (24")**



**Gráfica V.4.2.9 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA COTA  
MÁS PROFUNDA DE LA LÍNEA SUBMARINA (36")**

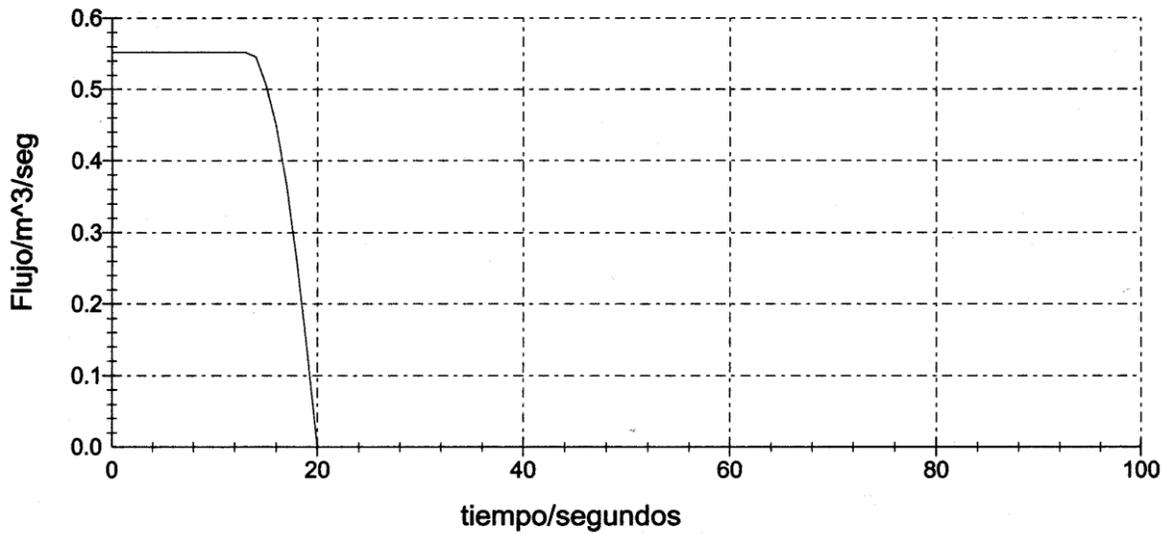


**Gráfica V.4.2.10 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA  
COTA MÁS PROFUNDA DE LA LÍNEA SUBMARINA (36")**

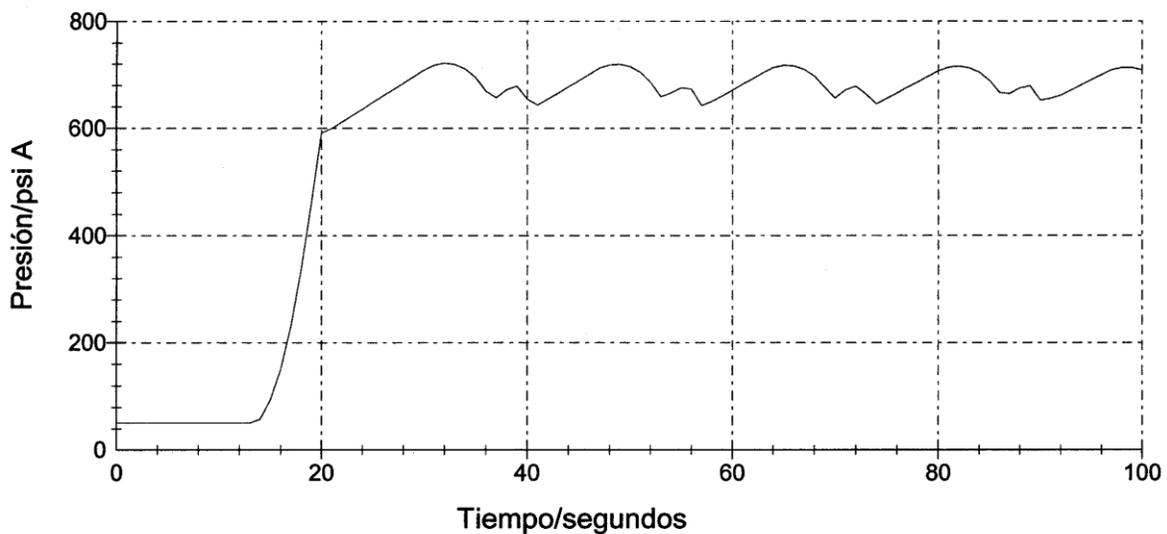


**Gráfica V.4.2.11 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A LA SALIDA DE  
LOS BRAZOS DE CARGA DE LA PLATAFORMA DE EMBARQUE**

**(16")**



**Gráfica V.4.2.12 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN LA  
SALIDA DE LOS BRAZOS DE CARGA DE LA PLATAFORMA DE  
EMBARQUE (16")**



### V.4.3 Caso-Cierre de Válvulas de QCDC (5 seg)

Esta esta es la segunda simulación de flujo transitorio, en donde las bombas operan a su máxima y constante velocidad y las válvulas QCDC (Quick Close Design Coupling) son cerradas en 5 seg , el inicio del cierre de válvulas se especificó a los 5 seg de simulación, alcanzando un cierre completo a los 10 seg de esta.

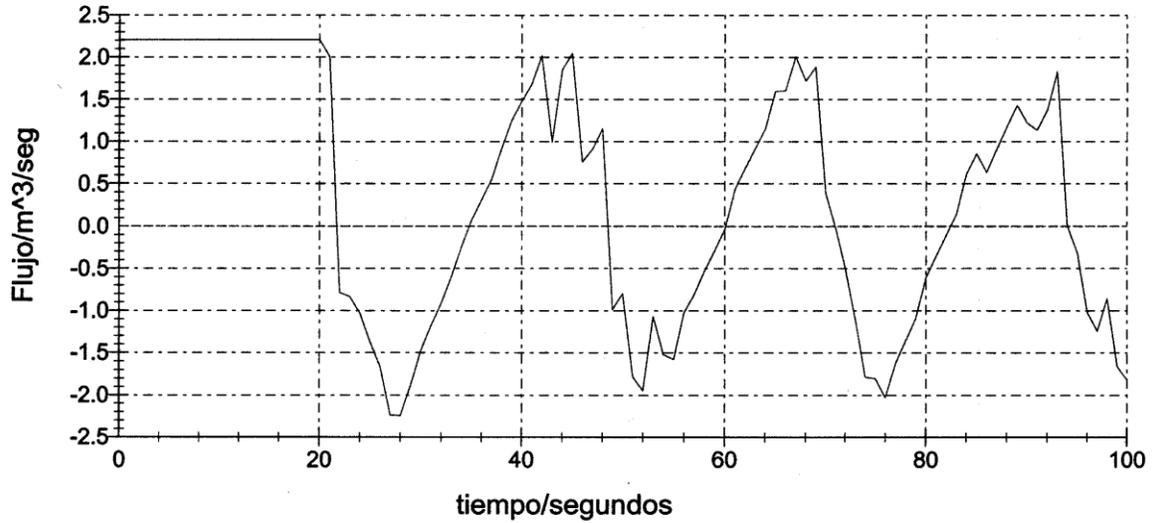
Cierre de válvula QCDC (5 seg) Tubería Corta							
Identificación/ Especificación	Longitud (m)	Diametro Nominal	Rango de presión de operación (PSIA)		Variación de Caudal en la tubería (m <sup>3</sup> /Seg)		
			Maxima	Minima	Maximo	Minimo	
1	60"-P-TA1-126-AA1	7	60	295,537	0,275	1,349	0,472
2	60"-P-TA1-126-AA1	7	60	295,54	0,275	0,489	-0,102
3	36"-P-TA1--214-BA1	7	36	774,363	300,626	0,859	-0,003
4	36"-P-TA1--214-BA1	7	36	774,355	300,527	1,719	-0,007
5	36"-CR-IN-28-DA1	4	36	776,5	86,815	2,208	-0,019
6	36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	776,503	86,755	1,656	-0,015
7	36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	776,505	86,725	1,104	-0,01
8	36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	776,506	86,716	0,552	-0,005
9	24"-.-CR-IN-29A-BA4	3,84	24	776,502	86,761	0,552	-0,005
10	24"-.-CR-IN-29B-BA4	3,84	24	776,505	86,701	0,552	-0,005
11	24"-.-CR-IN-29C-BA4	3,84	24	776,507	86,672	0,552	-0,005
12	24"-.-CR-IN-29D-BA4	3,84	24	776,508	86,663	0,552	-0,005

**Tabla V.4.3.a Rango de Presión y variación de caudal Caso-Cierre de válvulas QCDC (15 seg) Tubería Corta.**

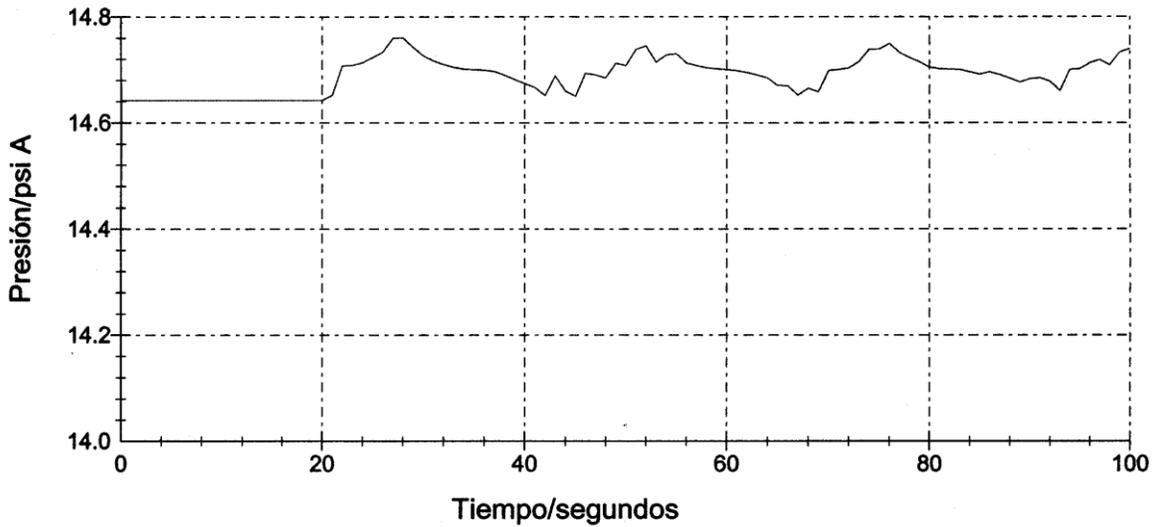
Cierre de válvulas QCDC (5 seg) Tubería Elastica							
Identificación/ Especificación		Longitud (m)	Diametro Nominal (pulg)	Rango de Presión de operación (PSIA)		Variación de Caudal en la tubería (m <sup>3</sup> /seg)	
				Maxima	Minima	Maximo	Minimo
1	48-P-08-20-0503-BA2Y	385	48	134,269	0,275	2,208	-2,246
2	48-P-08-20-0521-AA2Y	1764	48	272,959	0,275	2,208	-2,22
3	48-P-08-20-0521-AA2Y	25	48	273,612	0,275	2,208	-1,579
4	60"-P-TA1-126-AA1	1150	60	295,53	0,275	2,306	-0,886
5	36"-P-TA1-1027J-AA1	23	36	295,53	0,275	1,285	-0,414
6	36"-P-TA1-1028J-AA1	23	36	295,537	0,275	1,167	-0,37
7	20"-P-TA1-1045F-AA1	23	20	295,539	0,275	0,489	-0,102
8	24"-P-TA1-1019-BA1	14	24	774,366	298,027	0,859	-0,003
9	24"-P-TA1-1020-BA1	14	24	774,363	297,998	0,859	-0,003
10	20"-P-TA1-1046-BA1	14	20	774,355	297,489	0,489	-0,002
11	36"-P-TA1--214-BA1	204	36	774,725	295,278	2,208	-0,093
12	36"-P-TA1--214-BA1	77	36	73,857	293,382	2,208	-0,115
13	36"-CR-IN-27-BA4	63	36	772,367	289,855	2,208	0,115
14	36"-CR-IN-27-DA1	580	36	771,221	277,124	2,208	-0,187
15	36"-CR-IN-27-DA1	1140	36	771,221	257,331	2,208	-0,224
16	36"-CR-IN-28-DA1	6170	36	818,675	130,329	2,208	-0,05
17	36"-CR-IN-28-DA1	32	36	818,675	87,003	2,208	-0,019
18	16"-CR-IN-30D-AA1	31	16	776,508	50,348	0,552	0
19	16"-CR-IN-30C-AA1	31	16	776,507	50,357	0,552	0
20	16"-CR-IN-30B-AA1	31	16	776,505	50,387	0,552	0
21	16"-CR-IN-30A-AA1	31	16	776,502	50,446	0,552	0

**Tabla V.4.3.b Rango de Presión y variación de caudal Caso-Cierre de válvulas QCDC  
(5 seg) Tubería Elástica.**

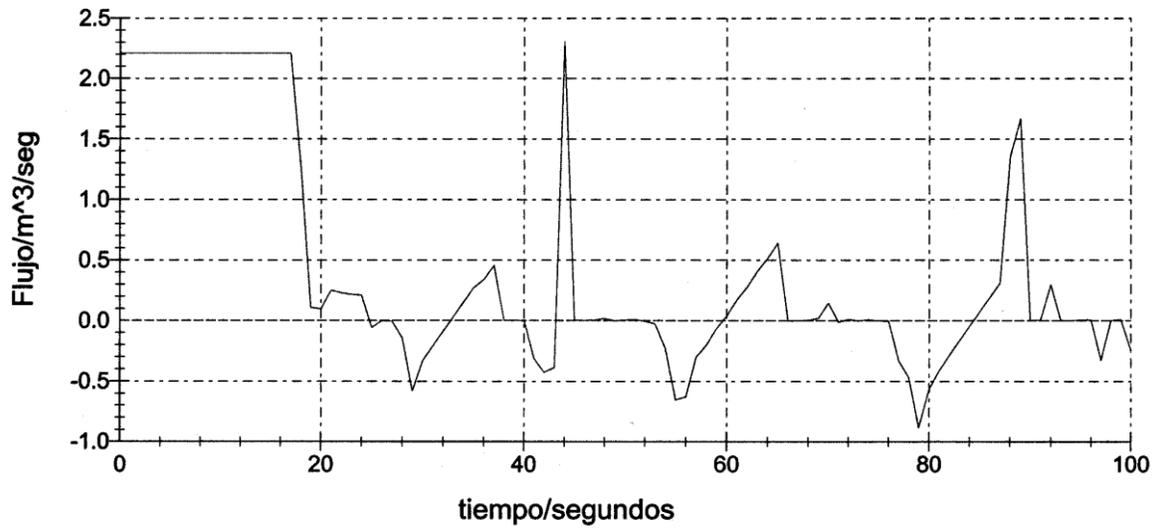
**Gráfica V.4.3.1 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A LA SALIDA  
DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO (48")**



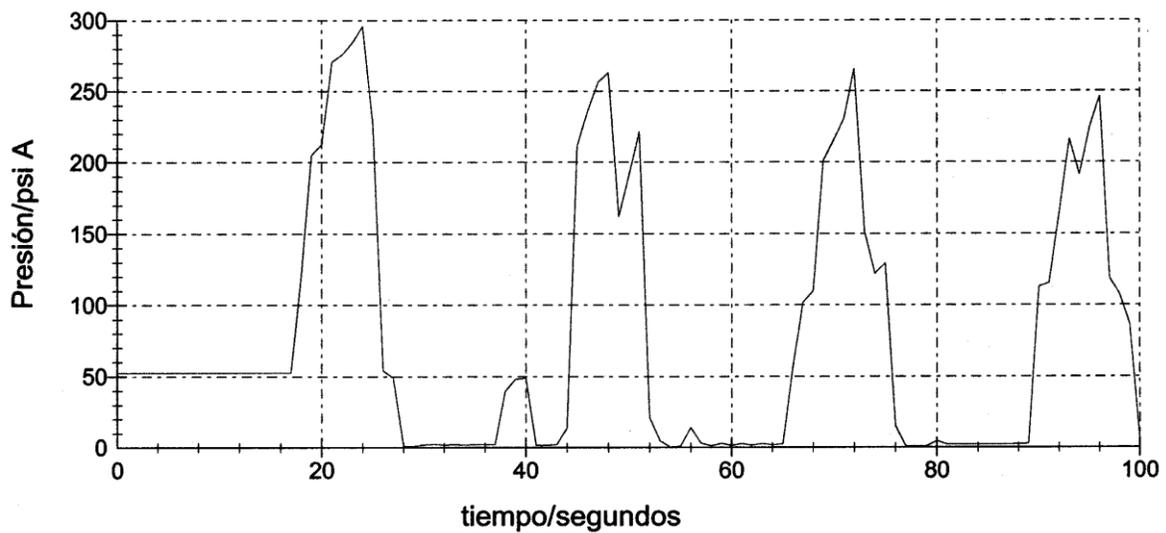
**Gráfica V.4.3.2 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN A LA SALIDA  
DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO (48")**



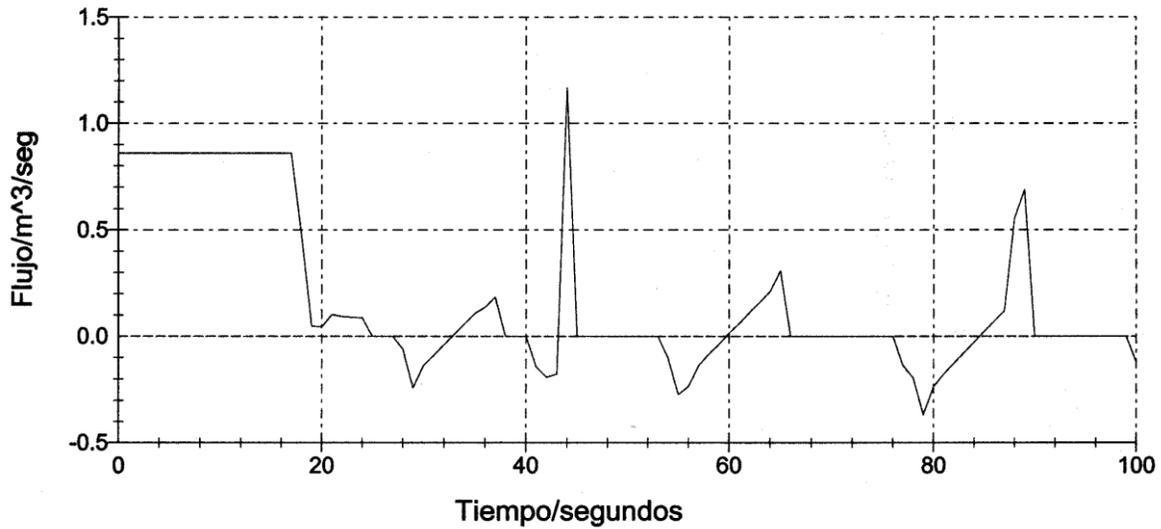
**Gráfica V.4.3.3 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN EL NODO  
DONDE SE INTERCONECTAN LOS 3 CABEZALES DE SUCCIÓN**



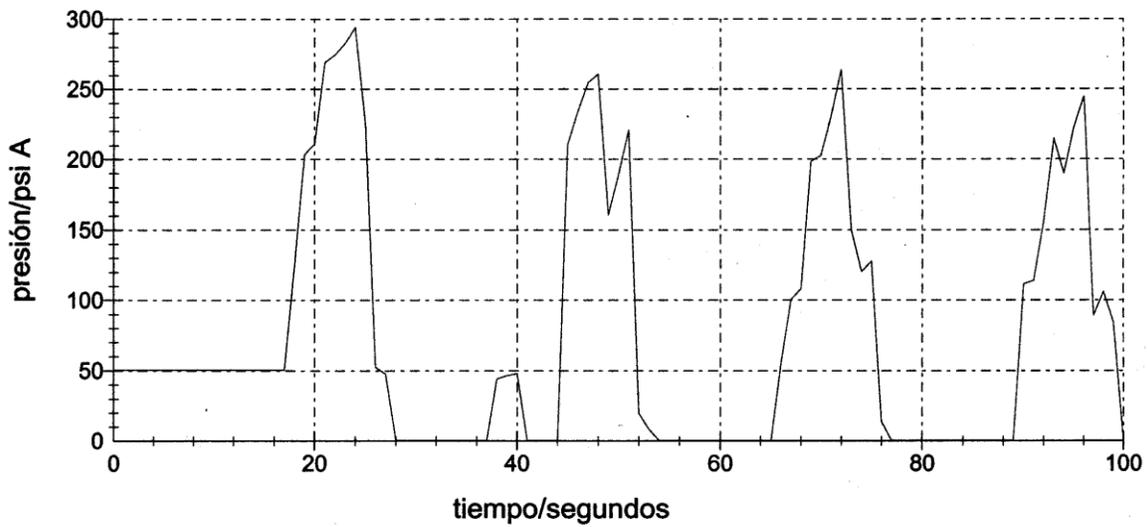
**Gráfica V.4.3.4 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN EL NODO  
DONDE SE INTERCONECTAN LOS 3 CABEZALES DE SUCCIÓN**



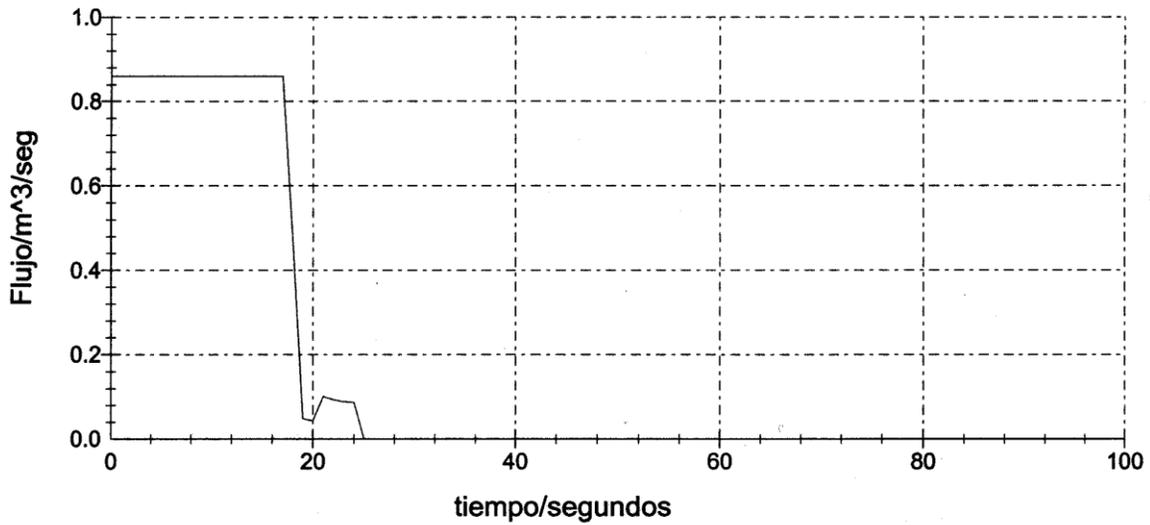
**Gráfica V.4.3.5 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA SUCCIÓN DE LA BOMBA PRINCIPAL (36")**



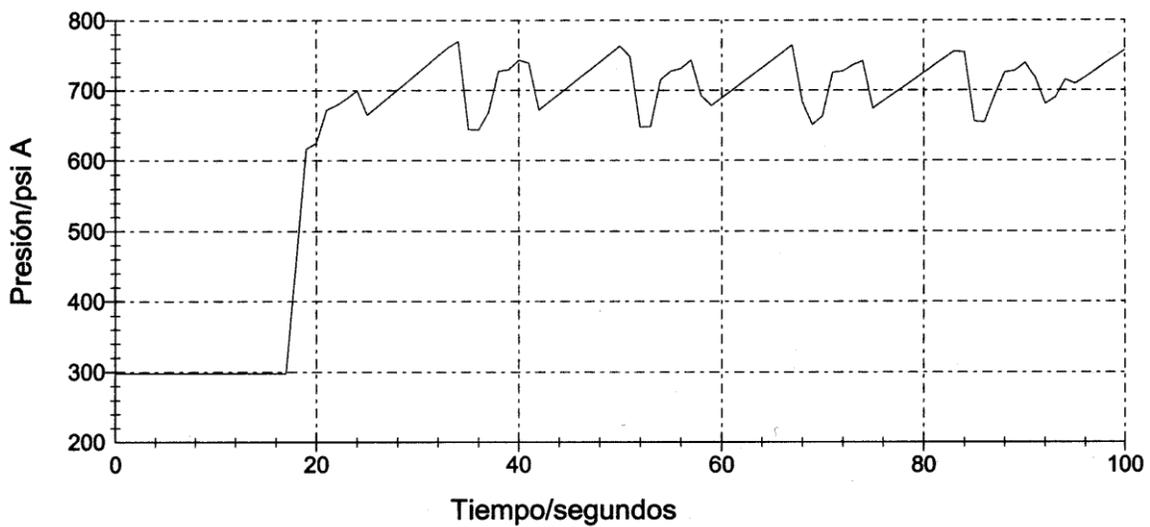
**Gráfica V.4.3.6 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA SUCCIÓN DE LA BOMBA PRINCIPAL (36")**



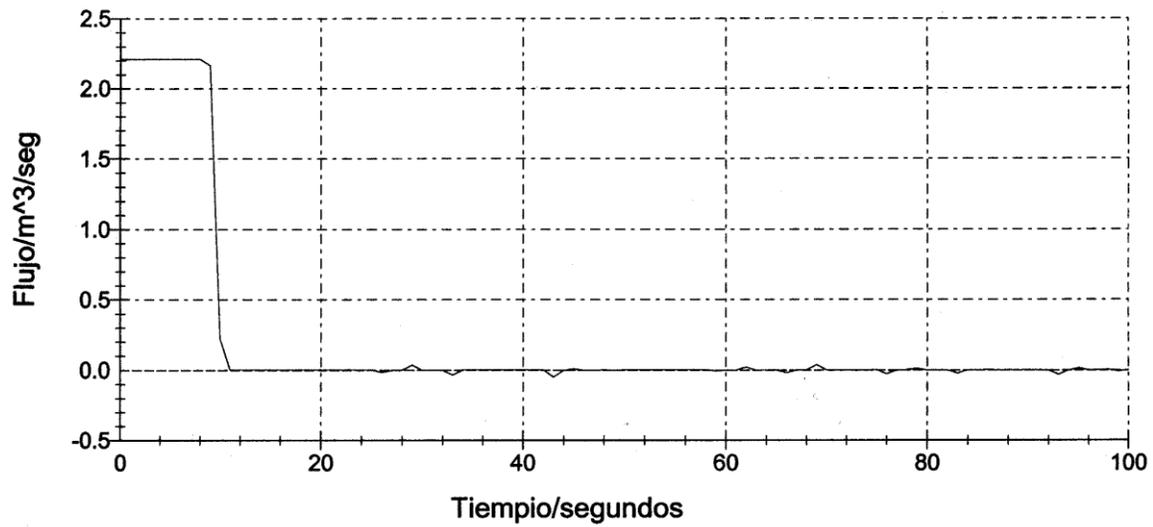
**Gráfica V.4.3.7 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA  
DESCARGA DE LA BOMBA PRINCIPAL (36")**



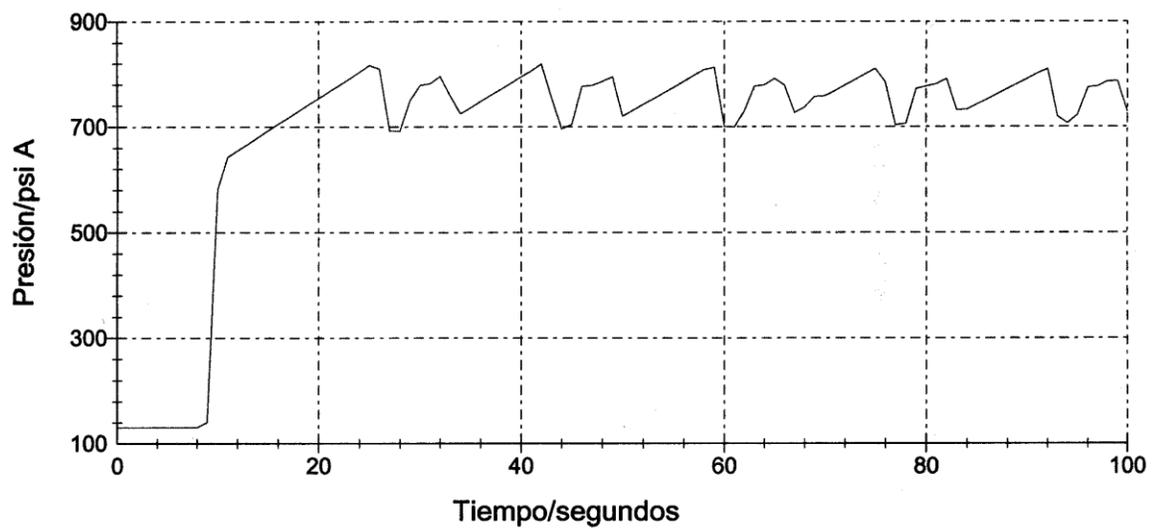
**Gráfica V.4.3.8 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA  
DESCARGA DE LA BOMBA PRINCIPAL (24")**



**Gráfica V.4.3.9 COMPORTAMIENTP DEL FLUJO EN LA COTA MÁS PROFUNDA DE LA LÍNEA SUBMARINA (36")**

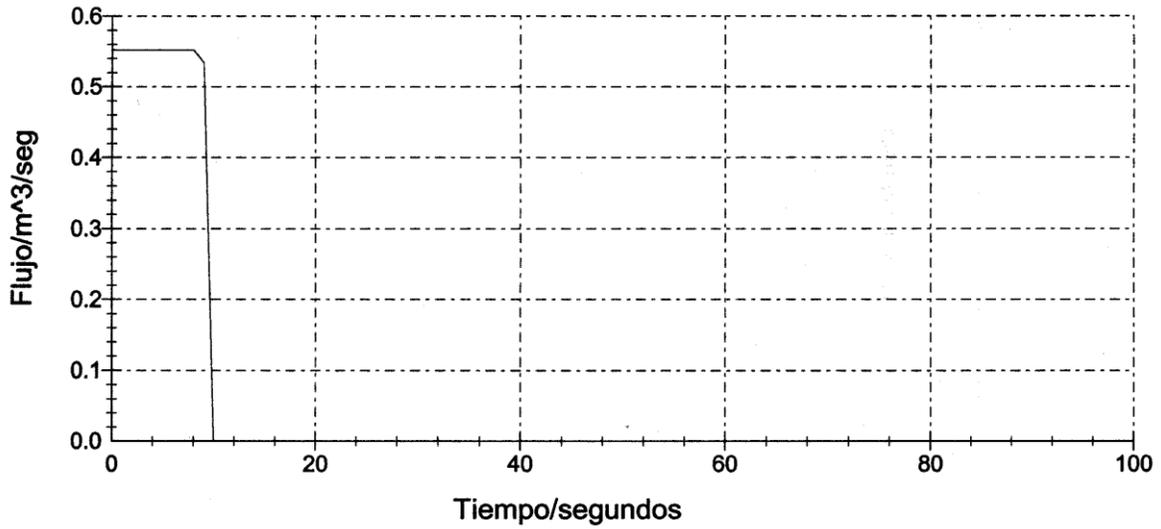


**Gráfica V.4.3.10 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA COTA MÁS PROFUNDA DE LA LÍNEA SUBMARINA (36")**

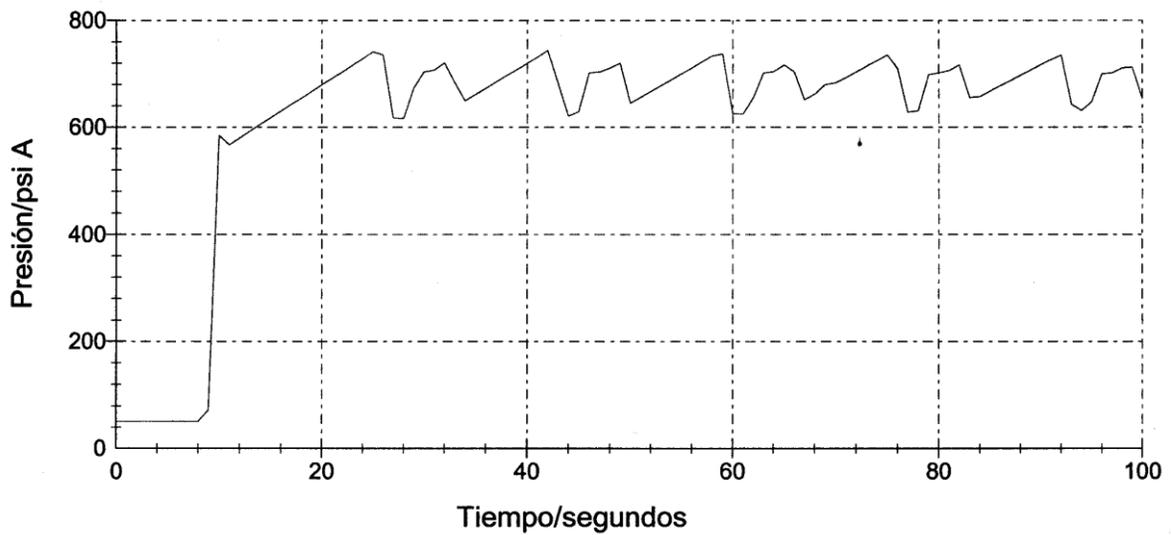


**Gráfica V.4.3.11 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A LA SALIDA DE  
LOS BRAZOS DE CARGA DE LA PLATAFORMA DE EMBARQUE**

**(16")**



**Gráfica V.4.3.12 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN LA  
SALIDA DE LOS BRAZOS DE CARGA DE LA PLATAFORMA DE  
EMBARQUE (16")**



#### V.4.4 Caso- Parada de bomba

Esta esta es la tercera simulación de flujo transitorio, en donde todas las válvulas del sistema permanecen 100% abiertas. El efecto perturbador del flujo es provocado por la parada simultánea de las tres bombas de embarque bajo el supuesto de una falla eléctrica. La parada total de la bomba se especificó en 40 seg, iniciando a los 5 seg de la simulación y finalizando a los 55 seg de la misma.

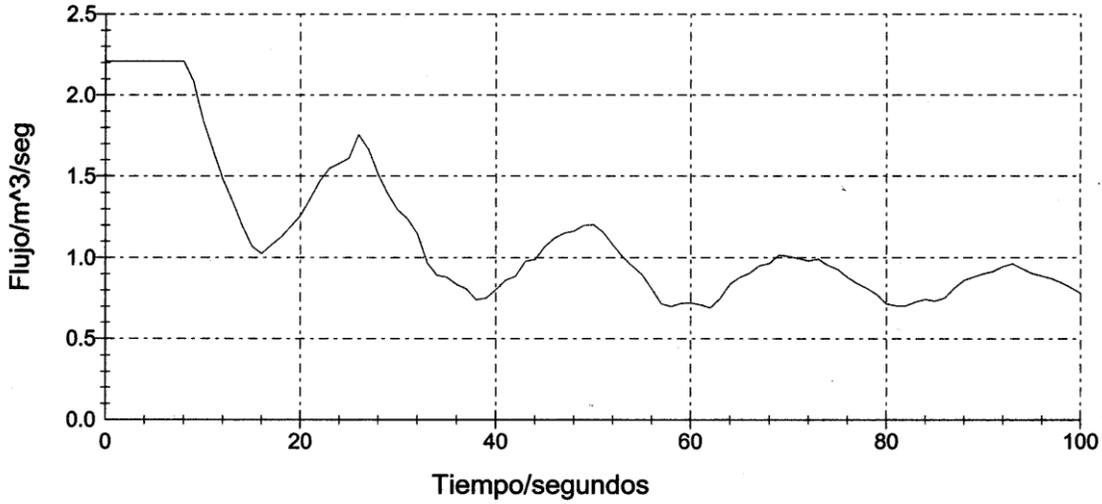
Parada de bomba-Tubería Corta							
Identificación/ Especificación	Longitud (m)	Diametro Nominal	Rango de presión de operación (PSIA)		Variación de Caudal en la tubería (m <sup>3</sup> /Seg)		
			Maxima	Minima	Maximo	Minimo	
1   60"-P-TA1-126-AA1	7	60	121,397	34,245	1,349	0,458	
2   60"-P-TA1-126-AA1	7	60	121,399	34,299	0,489	0,137	
3   36"-P-TA1--214-BA1	7	36	300,626	20,046	0,859	0,321	
4   36"-P-TA1--214-BA1	7	36	300,527	19,777	1,719	0,642	
5   36"-CR-IN-28-DA1	4	36	86,815	32,544	2,208	0,769	
6   36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	86,755	32,617	1,656	0,576	
7   36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	86,725	32,667	1,104	0,384	
8   36"-CR-IN-28-DA1	4,5	36	86,716	32,694	0,552	0,192	
9   24"-.-CR-IN-29A-BA4	3,84	24	86,761	32,595	0,552	0,192	
10   24"-.-CR-IN-29B-BA4	3,84	24	86,701	32,665	0,552	0,192	
11   24"-.-CR-IN-29C-BA4	3,84	24	86,672	32,712	0,552	0,192	
12   24"-.-CR-IN-29D-BA4	3,84	24	86,663	32,738	0,552	0,192	

**Tabla V.4.4.a Rango de Presión y variación de caudal Caso-Parada de bomba  
Tubería Corta.**

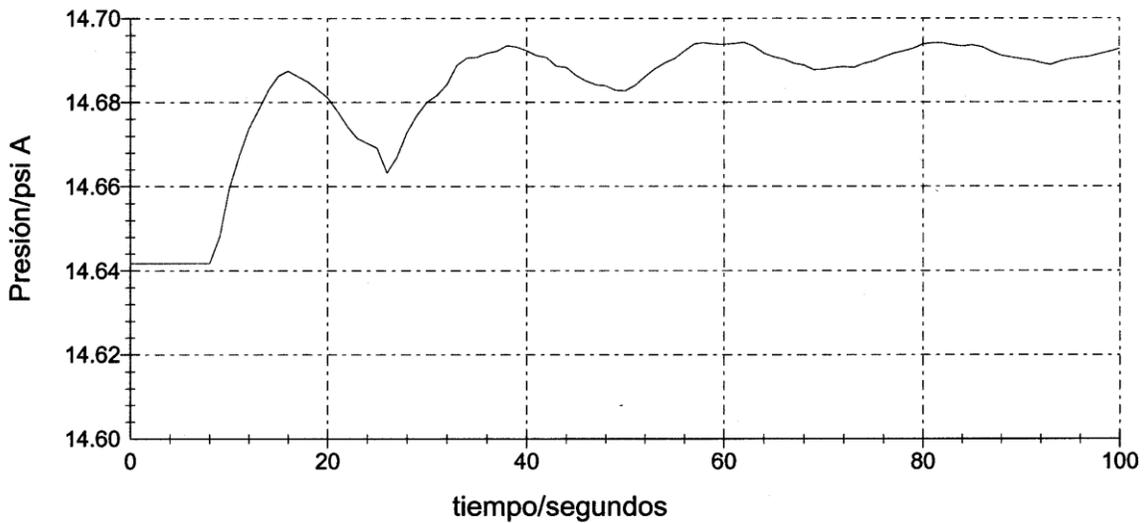
Parada de Bomba-Tubería Elastica							
Identificación/ Especificación		Longitud (m)	Diametro Nominal (pulg)	Rango de Presión de operación(PSIA)		Variación de Caudal en la tubería (m <sup>3</sup> /seg)	
				Maxima	Minima	Maximo	Minimo
1	48-P-08-20-0503-BA2Y	385	48	25,279	8,081	2,208	0,692
2	48-P-08-20-0521-AA2Y	1764	48	101,061	8,068	2,208	0,701
3	48-P-08-20-0521-AA2Y	25	48	101,643	31,561	2,208	0,703
4	60"-P-TA1-126-AA1	1150	60	121,395	31,548	2,208	0,779
5	36"-P-TA1-1027J-AA1	23	36	121,387	32,156	0,859	0,321
6	36"-P-TA1-1028J-AA1	23	36	121,388	34,238	0,859	0,321
7	20"-P-TA1-1045F-AA1	23	20	121,37	31,463	0,489	0,137
8	24"-P-TA1-1019-BA1	14	24	300,747	16,963	0,859	0,321
9	24"-P-TA1-1020-BA1	14	24	300,718	16,848	0,859	0,321
10	20"-P-TA1-1046-BA1	14	20	300,591	15,959	0,489	0,137
11	36"-P-TA1--214-BA1	204	36	300,527	11,129	2,208	0,783
12	36"-P-TA1--214-BA1	77	36	295,177	9,548	2,208	0,785
13	36"-CR-IN-27-BA4	63	36	293,281	7,229	2,208	0,785
14	36"-CR-IN-27-DA1	580	36	289,754	2,535	2,208	0,802
15	36"-CR-IN-27-DA1	1140	36	277,124	0,275	2,208	0,82
16	36"-CR-IN-28-DA1	6170	36	257,331	0,275	2,208	0,769
17	36"-CR-IN-28-DA1	32	36	130,329	32,477	2,208	0,769
18	16"-CR-IN-30D-AA1	31	16	86,625	0,284	0,552	0,192
19	16"-CR-IN-30C-AA1	31	16	86,634	0,284	0,552	0,192
20	16"-CR-IN-30B-AA1	31	16	86,663	0,284	0,552	0,192
21	16"-CR-IN-30A-AA1	31	16	86,723	0,284	0,552	0,192

**Tabla V.4.4.b Rango de Presión y variación de caudal Caso-Parada de bomba  
Tubería Elástica.**

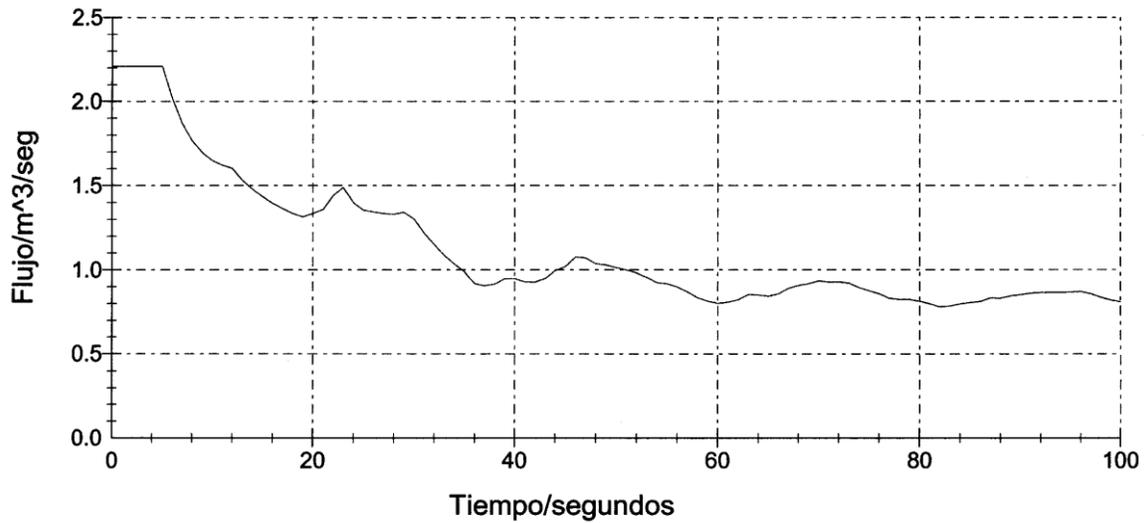
**Gráfica V.4.4.1 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A LA SALIDA  
DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO (48")**



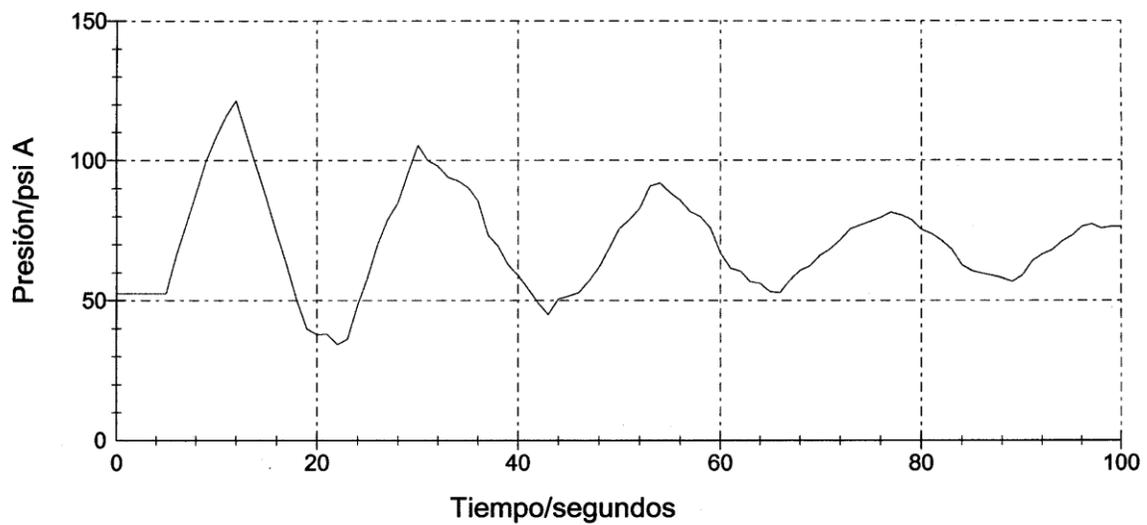
**Gráfica V.4.4.2 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN A LA SALIDA  
DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO (48")**



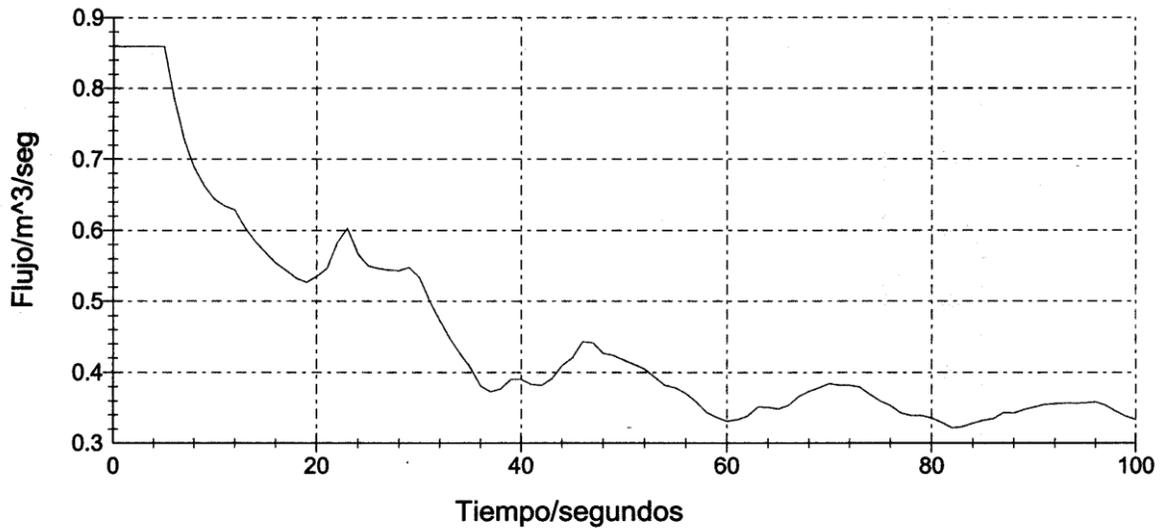
**Gráfica V.4.4.3 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN EL NODO  
DONDE SE INTERCONECTAN LOS 3 CABEZALES DE SUCCIÓN**



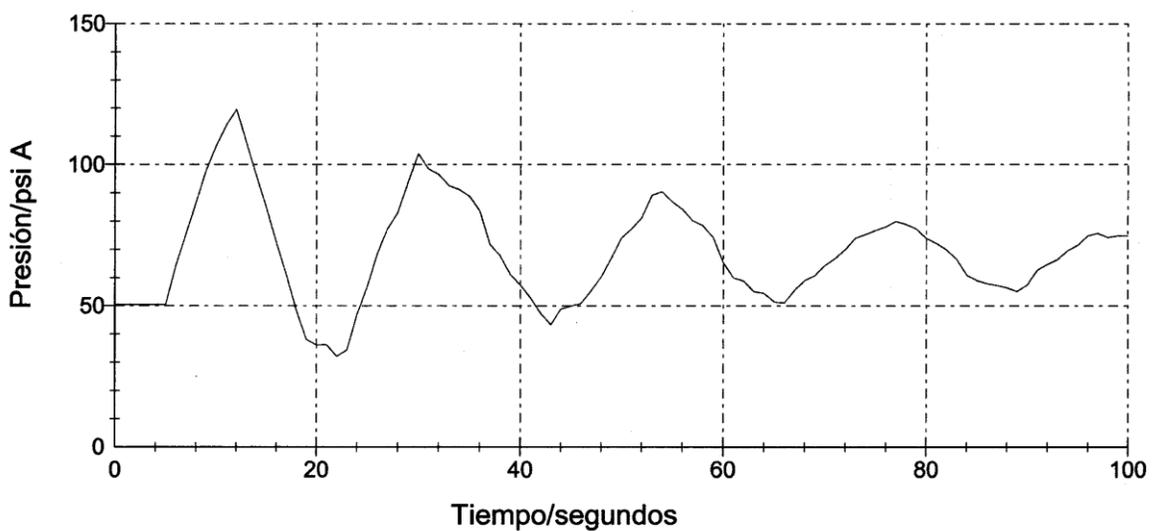
**Gráfica V4.4.4 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN EL NODO  
DONDE SE INTERCONECTAN LOS 3 CABEZALES DE SUCCIÓN**



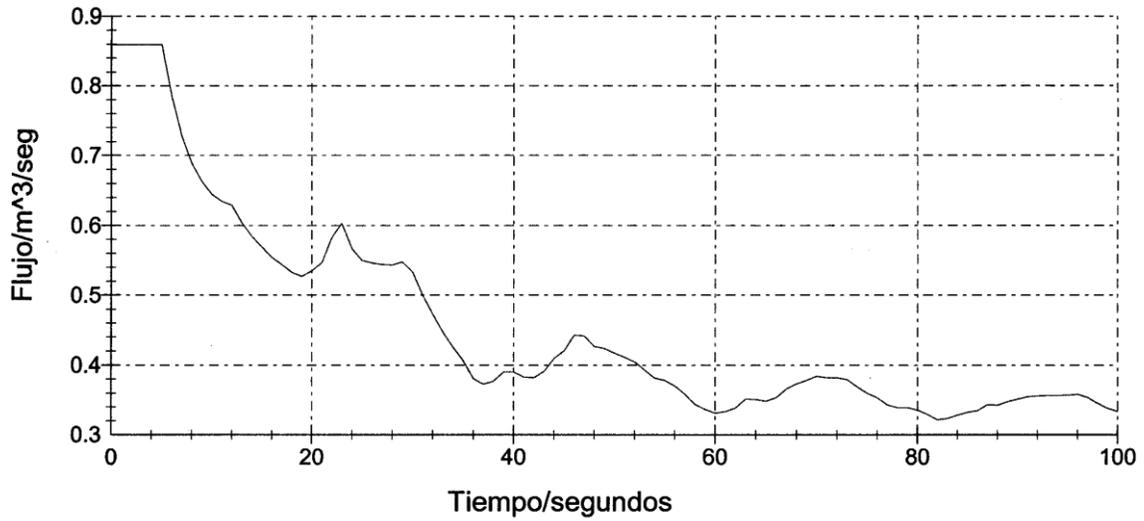
**Gráfica V.4.4.5 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA SUCCIÓN DE LA BOMBA PRINCIPAL (36")**



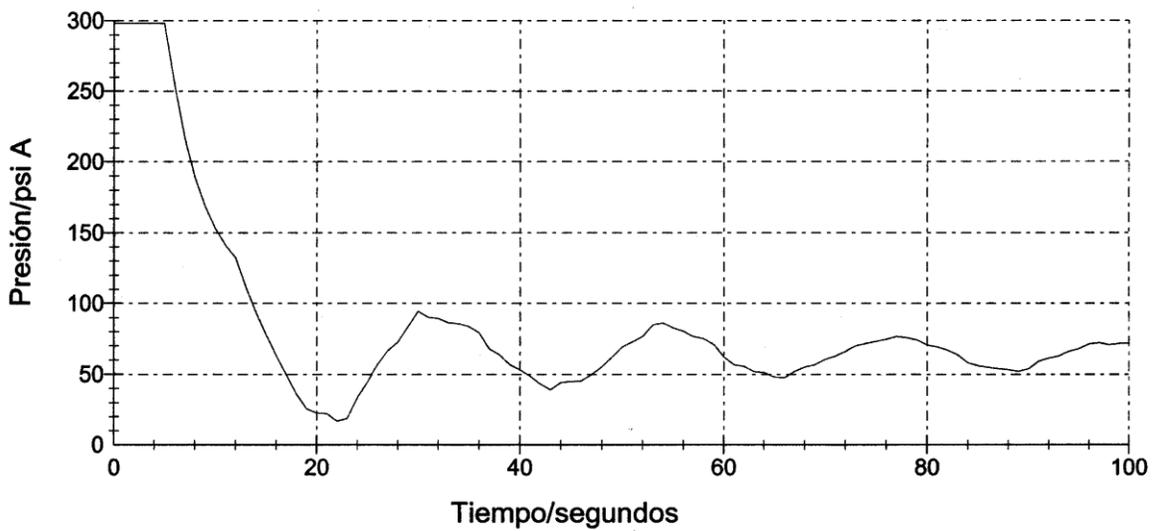
**Gráfica V.4.4.6 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA SUCCIÓN DE LA BOMBA PRINCIPAL (36")**



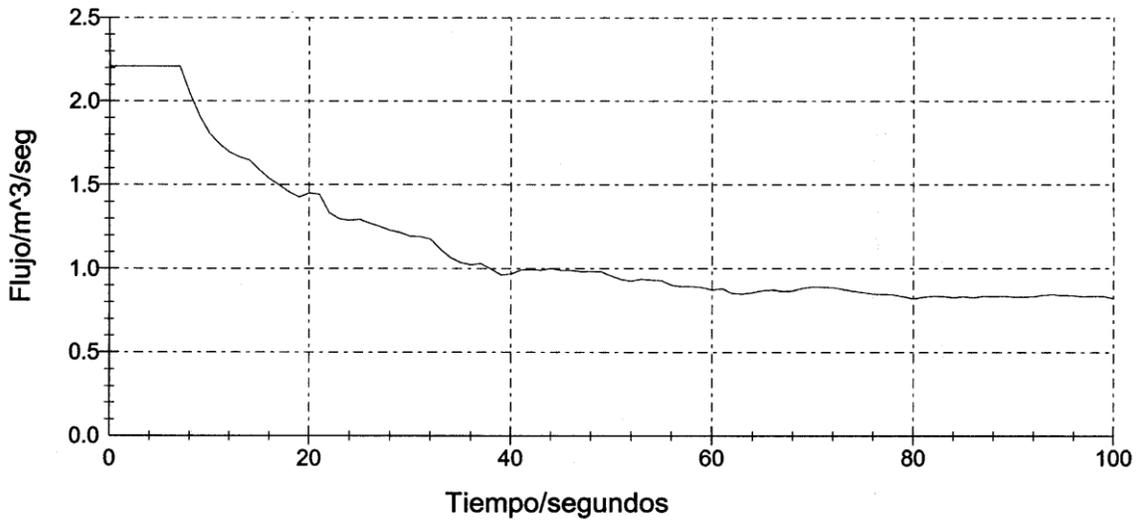
**Gráfica V.4.4.7 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA  
DESCARGA DE LA BOMBA PRINCIPAL (36")**



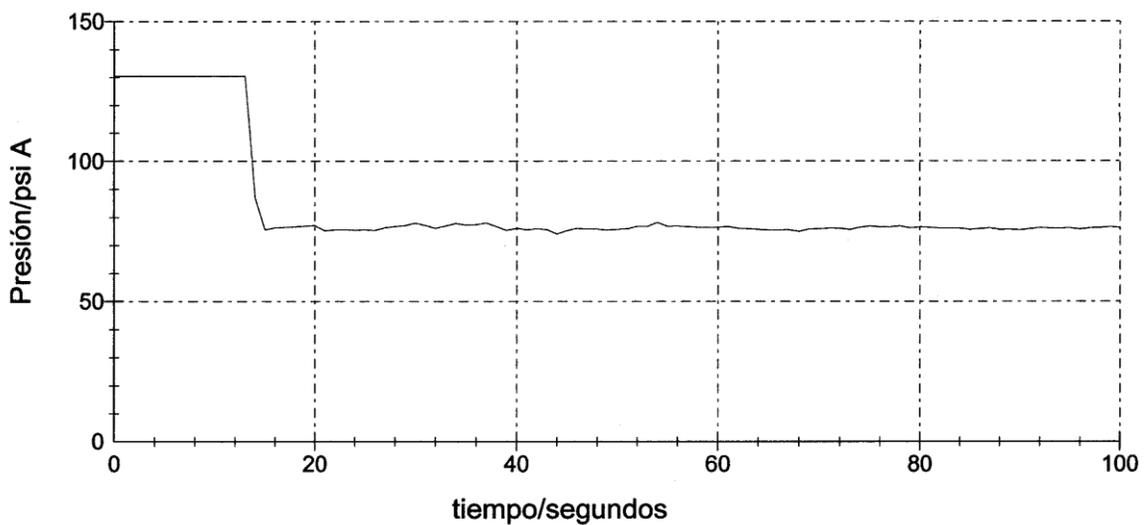
**Gráfica V.4.4.8 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA  
DESCARGA DE LA BOMBA PRINCIPAL (24")**



**Gráfica V.4.4.9 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN LA COTA MÁS ELEVADA DE LA LÍNEA SUBMARINA (36")**

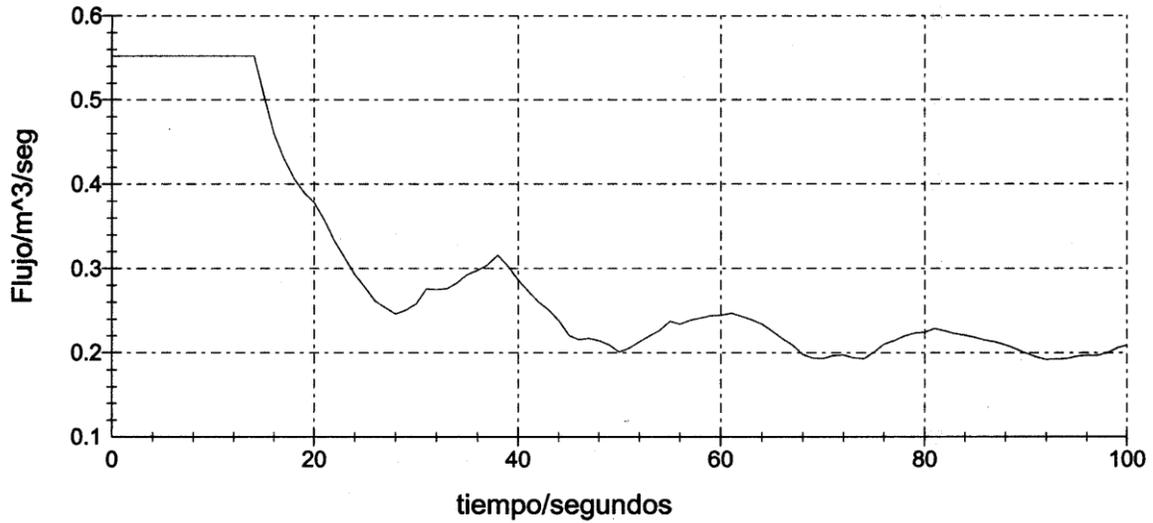


**Gráfica V.4.4.10 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN EN LA COTA MÁS PROFUNDA DE LA LÍNEA SUBMARINA (36")**

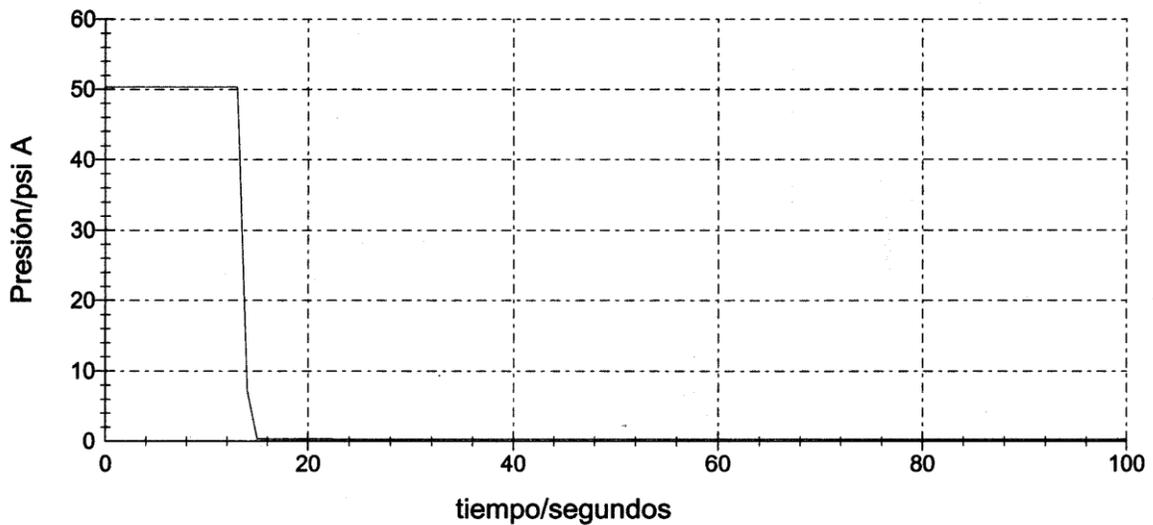


**Gráfica V.4.4.11 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO A LA SALIDA DE  
LOS BRAZOS DE CARGA DE LA PLATAFORMA DE EMBARQUE**

**(16")**



**Gráfica V.4.4.12 COMPORTAMIENTO DE LA PRESIÓN LA  
SALIDA DE LOS BRAZOS DE CARGA DE LA PLATAFORMA DE  
EMBARQUE (16")**



## VI ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como base para la comparación de resultados a continuación se ejemplifica el procedimiento de cálculo de la presión externa admisible de tuberías.

Según ASME B31.3, el diseño de tuberías por presión externa, será según ASME VIII, División I (BPV) desde UG-28 hasta UG-30 en donde se describe detalladamente el procedimiento de cálculo.

La presión externa admisible se determina por:

$$Pa = \frac{2AE}{3(D_o/t)}$$

Donde:

*Pa*: Máximo valor admisible de presión de trabajo externa ( PSI)

*E*: Modulo de elasticidad del material de la tubería (PSI)

*D<sub>o</sub>*: Diámetro externo de la tubería (Pulg)

*t*: Espesor mínimo de la tubería (Pulg)

*A*: Factor determinado de la Fig. G de la Subparte 3 de la Sección II , Parte D al introducir los valores  $L/D_o$  y  $D_o/t$  en la gráfica.

El valor de *Pa* calculado se compara con la presión externa de diseño *P* , este valor de *Pa* debe ser mayor o igual a *P* para evitar que la tubería colapse por vacío. *P* es la diferencia de presión entre el exterior de la tubería y el interior de esta. Para nuestro sistema el valor de *P* será el valor de la presión atmosférica o la presión submarina para la mayor profundidad (21 m) según la tubería a evaluar ya que las tuberías se verificaran para vacío total (Full vacuum) presión interna 0 absoluto.

Ejemplo para la línea 48"-P-08-20-0521-AA2Y:

E= 30022812 PSI

$$D_0 = 48''$$

$$L = 69448.81''$$

$t = \text{Espesor de la tubería} - \text{espesor de corrosión} = 0.437''$  (No se aplica el 12,5% de tolerancia de fabricación debido a que la tubería es fabricado con laminas)

Con los valores de  $D_0/t$  y  $L/D_0$  obtenemos A

$$\left. \begin{aligned} \frac{D_0}{t} &= \frac{48}{0.437} = 109.83 \\ \frac{L}{D_0} &= \frac{69448.81}{48} = 1446.85 \end{aligned} \right\} A = 0.000094$$

$$Pa = \frac{2AE}{3(D_0/t)} = \frac{2 * 0.000094 * 30022812}{3 * 109.83} = 17.13 \text{ PSI}$$

$$Pa \geq P$$

**17.13 PSI  $\geq$  14.7 PSI**      Se verifico la tubería para vacío total.

La presión interna admisible de las tuberías del Sistema de Almacenamiento y Embarque de Crudo para Exportación son determinadas de las especificaciones de tubería (Piping class) anexo. Es importante destacar que los valores comparativos de presiones internas admisibles para cada tubería fueron multiplicadas por un factor de 1.5, ya que las sobrepresiones generadas por Golpe de Ariete generan un esfuerzo de impacto con alta velocidad de deformación sobre la tubería que conlleva a la aplicación de esta consideración.

## VI.1 Caso- Flujo estable del sistema

El caudal operación en el sistema es de  $2.208 \text{ m}^3/\text{seg}$  (50 MBPH) dividiéndose primero en los cabezales de succión de las tres bombas, en donde las bombas principales obtienen un caudal de  $0.859 \text{ m}^3/\text{seg}$  c/u y la bomba secundaria obtiene un caudal de  $0.489 \text{ m}^3/\text{seg}$ , la segunda división de flujo ocurre en la plataforma de embarque en los 4 brazos de carga, obteniendo un caudal de  $0.552 \text{ m}^3/\text{seg}$  en cada brazo.

La longitud aproximada desde el tanque de almacenamiento de crudo hasta la succión de las bombas es de 3.347 Km.

La longitud aproximada desde la descarga de las bombas hasta los brazos de embarque es de 8.332 Km.

La diferencia de cota entre el tanque de almacenamiento y las bombas de embarque es aproximadamente de  $-40.84 \text{ m}$ .

El desplazamiento sufrido por el crudo desde el tanque de almacenamiento hasta la succión de las bombas de embarque es por efecto de la gravedad.

Las presiones de succión de las tres bombas son 50.459 / 50.453 / 48.910 PSIA respectivamente.

Las máximas presiones del sistema son alcanzadas en los extremos finales de los cabezales de descargas de las 3 bombas teniendo un valor promedio de 300.68 PSIA, estos cabezales de descarga son de 24" y 20" con una elevación de  $-3.45 \text{ m}$  y  $14 \text{ m}$  de longitud. Las presiones de descarga de las 3 bombas son: 298.097 / 297.998 / 297.489 PSIA respectivamente.

El aumento promedio de presión en el fluido causado por las bombas de embarque es de 247.92 PSIA.

La menor presión ocurre al inicio de la línea identificada como N° 2 ( 48"-P-08-20-0521-AA2Y) con un valor de 12.060 PSIA aproximadamente a 386m del tanque de almacenamiento de crudo ( al iniciar el descenso hacia las bombas de embarque).

La presión promedio de salida del fluido de los 4 brazos de carga es de 50.384 PSIA.

Todas las presiones involucradas en el flujo estable del sistema están por debajo de las respectivas presiones internas admisibles de cada tubería.

## VI.2 Caso- Cierre de Válvulas de Embarque (15 seg)

En la simulación de este 2<sup>do</sup> caso, el fluido de trabajo alcanza la presión de vaporización (0.275 PSIA) en las tuberías de 48"-60"-36"-20" de diámetro nominal, que en conjunto, interconectan el tanque de almacenamiento de crudo con las bombas de embarque. Posterior a las bombas no existe vaporización del fluido.

Las tuberías mencionadas anteriormente, fueron verificadas para vacío total (full vacuum) según ASME B31.3 como se menciona al inicio del capítulo VI cumpliendo en su totalidad con la norma. Se destaca que la tubería de 60" de diámetro nominal comprende anillos rigidizadores. Las presiones externas admisibles calculadas para las tuberías involucradas son:

Línea 48"-P-08-20-0521-AA2Y / 0503 BA2Y	$Pa = 17.13 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 60"-P-TA1-126-AA1 (con anillos rigidizadores)	$Pa = 14.90 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 36"-P-TA1-1027J-AA1	$Pa = 14.85 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 20"-P-TA1-1046-BA1	$Pa = 84.43 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$

Valores conservadores ya que la presión interna alcanzada es de 0.275 PSIA y no 0.0 PSIA en vacío total.

La máxima presión del evento es alcanzada en el extremo final de la tubería submarina designada como N° 16 36"-CR-IN-28-DA1 aproximadamente a 6.170 Km de la costa, en su punto mas profundo, justo antes de iniciar su trayectoria ascendente de 30 m hasta la plataforma de embarque, el valor de esta presión es de 796.04 PSIA.

Las presiones máximas alcanzada en c/u de los brazos de carga son de 753.837 PSIA. y las mínimas son de 50.387 PSIA. El valor de promedio de presión maxima soportada en la succión de las bobas es de 269.94 PSIA y en la descarga es de 749.247 PSIA.

Todas las presiones máximas alcanzadas en las distintas tuberías están por debajo del límite de presión interna de estas, exceptuando los brazos de carga de 16" cuya presión admisible es de 321 PSIA (150# ANSI RF), es importante destacar que en la modelación no se tomo en cuenta los sistemas de seguridad que en la actualidad cuenta la plataforma, a

saber, sistema de válvulas de alivio, y se realizó una modelación básica del arreglo, por ende las sobrepresiones en estos brazos alcanzan estos valores críticos, esta modelación básica tiene la ventaja de arrojar resultados conservadores.

Todas las tuberías involucradas del sistema en algún momento de la simulación sufren un flujo negativo (contrario al sentido normal de flujo), siendo el mayor de estos flujos negativos  $-2.049 \text{ m}^3/\text{seg}$ , desarrollado en la tubería designada como N° 1 48"-P-08-20-0503-BA2Y tubería de descarga con conexión directa al tanque de almacenamiento. Para apreciar con mas detalle el comportamiento negativo de flujo, refiérase a la corrida de la simulación Caso-Cierre de válvulas de embarque (15 seg) anexo.

### VI.3 Caso- Cierre de Válvulas QCDC (5 seg)

En la simulación de este 3<sup>er</sup> caso, el fluido de trabajo alcanza la presión de vaporización (0.275 PSIA) en las tuberías de 48"-60"-36"-20" de diámetro nominal, que en conjunto, interconectan el tanque de almacenamiento de crudo con las bombas de embarque. Posterior a las bombas no existe vaporización del fluido.

Las tuberías mencionadas anteriormente, fueron verificadas para vacío total (full vacuum) según ASME B31.3 como se menciona al inicio del capítulo VI cumpliendo en su totalidad con la norma. Se destaca que la tubería de 60" de diámetro nominal comprende anillos rigidizadores. Las presiones externas admisibles calculadas para las tuberías involucradas son:

Línea 48"-P-08-20-0521-AA2Y / 0503 BA2Y	$Pa = 17.13 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 60"-P-TA1-126-AA1 (con anillos rigidizadores)	$Pa = 14.90 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 36"-P-TA1-1027J-AA1	$Pa = 14.85 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 20"-P-TA1-1046-BA1	$Pa = 84.43 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$

Valores conservadores ya que la presión interna alcanzada es de 0.275 PSIA y no 0.0 PSIA en vacío total.

La máxima presión del evento es alcanzada en el extremo final de la tubería submarina designada como N° 16 36"-CR-IN-28-DA1 aproximadamente a 6.170 Km de la costa, en su punto mas profundo, justo antes de iniciar su trayectoria ascendente de 30 m hasta la plataforma de embarque, el valor de esta presión es de 818.675 PSIA.

Las presiones máximas alcanzada en c/u de los brazos de carga son de 776.50 PSIA. y las mínimas son de 50.387 PSIA. El valor de promedio de presión maxima soportada en la succión de las bobas es de 295.535 PSIA y en la descarga es de 774.361 PSIA.

Todas las presiones máximas alcanzadas en las distintas tuberías están por debajo del límite de presión interna de estas, exceptuando los brazos de carga de 16" cuya presión admisible es de 321 PSIA (150# ANSI RF), es importante destacar que en la modelación no se tomo en cuenta los sistemas de seguridad que en la actualidad cuenta la plataforma, a saber, sistema de válvulas de alivio, y se realizó una modelación básica del arreglo, por ende las sobrepresiones en estos brazos alcanzan estos valores críticos, esta modelación básica tiene la ventaja de arrojar resultados conservadores.

Todas las tuberías involucradas del sistema en algún momento de la simulación sufren un flujo negativo (contrario al sentido normal de flujo), siendo el mayor de estos flujos negativos  $-2.246 \text{ m}^3/\text{seg}$ , desarrollado en la tubería designada como N° 1 48"-P-08-20-0503-BA2Y tubería de descarga con conexión directa al tanque de almacenamiento. Para apreciar con mas detalle el comportamiento negativo de flujo, refiérase a la corrida de la simulación Caso-Cierre de válvulas QCDC (5 seg) anexo.

#### **VI.4 Caso- Parada de bomba**

En la simulación de este 4<sup>er</sup> caso, el fluido de trabajo alcanza la presión de vaporización (0.275 PSIA) en la tuberías de 36" de diámetro nominal designadas con el N° 15 36"-CR-IN-27-DA1 y N° 16 36"-CR-IN-28-DA1, se destaca que esta vaporización ocurre en un muy breve periodo de tiempo, aproximadamente 1 seg. La tubería N°16 es submarina interconectando la costa ( sobre la cual esta la tubería N° 15) con la plataforma de carga.

Las tuberías mencionadas anteriormente, fueron verificadas para vacío total (full vacuum) según ASME B31.3 como se menciona al inicio del capítulo VI cumpliendo en su totalidad con la norma. La tubería submarina tiene como presión exterior, a parte de la presión atmosférica, la presión consecuencia de la columna de líquido que descansa sobre esta y que tiene una altura aproximada de 24 m.

A parte de la vaporización del fluido, también se alcanzan presiones de vacío, que aunque no llegue a vaporizar el fluido, deben verificarse en las líneas de 48"- 36"-16"

Las presiones externas admisibles calculadas para las tuberías involucradas son:

Presión Atmosférica + Presión por columna de líquido ( $\rho_{\text{mar}} \cdot g \cdot H$ ) = 48.81 PSIA

Línea 36"-CR-IN-27-DA1	$P_a = 41.35 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 36"-CR-IN-28-DA1 (Submarina)	$P_a = 145.00 \text{ PSIA} > 48.81 \text{ PSIA}$
Línea 48"-P-08-20-0521-AA2Y / BA2Y	$P_a = 17.13 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 36"-P-TA1-214-BA1	$P_a = 87.56 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 36"-CR-IN-27-BA4	$P_a = 41.35 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$
Línea 16"-CR-IN-30-AA1	$P_a = 983.5 \text{ PSIA} > P_{\text{atmosférica}}$

La máxima presión del evento es obtenida en los extremos finales de los cabezales de descarga de las bombas de embarque, teniendo un valor promedio de 300.685 PSIA, valor justo antes de la parada de bombas disminuyendo paulatinamente hasta un valor promedio de 20.033 PSIA para ese mismo punto.

Las presiones en los extremos finales de los brazos de carga disminuyen de 50.348 PSIA en flujo estable hasta un valor de 0.284 PSIA.

El valor promedio de presión máxima alcanzada en la succión de las bombas es de 119.385 PSIA y la mínima es de 31.925 PSIA

Todas las presiones máximas alcanzadas en las distintas tuberías están por debajo del límite de presión interna de estas.

Todos los caudales de las diversas tuberías del sistema disminuyen sin producirse contra flujo en estas.

Al realizar una comparación entre los resultados arrojados por los distintas simulaciones, podemos observar que los mayores valores de sobrepresión y contra flujo ocurren en el Caso-Cierre de válvula QCDC (5 seg). La simulación del Caso-Parada de bomba fue la que reportó menor perturbación de presión y caudal en el flujo de embarque.

## CONCLUSIONES

- El Golpe de Ariete aunque es un fenómeno estudiado desde el principio del siglo 20, los aportes fueron básicamente teóricos, y es en la actualidad, con el desarrollo de procedimientos de análisis que involucran herramientas digitales, que podemos realmente considerar las predicciones producto de su evaluación en sistemas complejos de tuberías, pero hay que tomar en cuenta, que a pesar del valor que representa el uso de herramientas digitales, estas dependerán de la posibilidad de modelación de las condiciones de borde que están involucradas en el sistema, ya que estas son particulares para cada situación.
- El método de análisis del fenómeno transitorio que mayor ventaja ofrece en su aplicación es el Método de las Características con Diferencias Finitas.
- Las principales causas que generan el Golpe de Ariete son: el cierre violento de válvulas involucradas en el sistema de tuberías y paradas imprevistas de bombas.
- Las sobrepresiones y depresiones ocurridas en el flujo son directamente proporcionales a la disminución del periodo de tiempo de ocurrencia de la perturbación del sistema.
- Los sistemas de control de Golpe de Ariete están orientados al aumento del periodo de tiempo de ocurrencia de la perturbación del sistema para evitar el fenómeno. Si el fenómeno transitorio es insalvable, se recurre a sistemas de atenuación que están orientados a la amortiguación de sus efectos.
- Los sistemas más propensos a sufrir el fenómeno transitorio son: los que abarcan grandes distancias y comprenden tuberías de gran diámetro, debido a que estos sistemas involucran grandes caudales de operación.

- En las simulaciones efectuadas, el MSSC 1 como fluido de trabajo, es el que mayor sobrepresión generó en el sistema.
- En la simulación del Caso-Cierre de válvulas de Embarque (15 seg) se alcanzó la presión de vaporización del fluido (produciéndose separación de columna de líquido) en las líneas que interconectan el tanque de almacenamiento con la succión de las bombas. Posterior a las bombas de embarque no existe vaporización
- En la simulación del Caso-Cierre de válvulas QCDC (5 seg) se alcanzó la presión de vaporización del fluido (produciéndose separación de columna de líquido) en las líneas que interconectan el tanque de almacenamiento con la succión de las bombas. Posterior a las bombas de embarque no existe vaporización
- En la simulación del Caso-Parada de Bomba se alcanzó la presión de vaporización del fluido (produciéndose separación de columna de líquido) en la línea submarina (posterior a las bombas de embarque). El resto de las tuberías posteriores a las bombas hasta la plataforma de embarque sufrieron presiones de vacío cercanas a la presión de vaporización.
- Para todos los casos simulados, el sistema de tuberías soporta las presiones de vacío generadas por el fenómeno Golpe de Ariete.
- Para todos los casos simulados, el sistema de tuberías soporta las sobrepresiones generadas por el fenómeno Golpe de Ariete, exceptuando los brazos de carga de 16" de diámetro nominal, debido que el modelo no consideró el sistema de seguridad conformado por válvulas de alivio en la plataforma de embarque, obteniendo de esta forma resultados conservadores.

- La simulación Caso-Cierre de válvula QCDC (5 seg) fue la que mayor sobrepresión y contraflujo generó en el sistema.
- La simulación Caso-Parada de bomba fue el que menor perturbación reflejo en el sistema, comparado con los otros casos de simulación.

## RECOMENDACIONES

- Debido a la presión de vaporización del fluido de trabajo alcanzada en las líneas previas a las bombas de embarque como consecuencia del Golpe de Ariete producido por los Casos: Cierre de válvulas de Embarque (15 seg) y Cierre de válvulas QCDC (5 seg), se recomienda la instalación de tanques de amortiguamiento de pulsaciones (tanques de aire comprimido) en la línea de 60" identificada como N° 4, con la ventaja de involucrar la atenuación de 2 de los fenómenos transitorios, a saber, la sobrepresión y depresión ocurrida en el fluido de trabajo. Ver sección II.4.3 Tanques de aire comprimido.
- Debido a la presión de vaporización del fluido de trabajo alcanzada en las líneas identificadas como N°15 y N°16 (submarina) posteriores a las bombas de embarque como consecuencia del Golpe de ariete producido por el Caso-Parada de Bomba se recomienda la instalación de tanques de amortiguamiento de pulsaciones (tanques de aire comprimido) en la línea N° 15 ubicada en tierra firme. Ver sección II.4.3 Tanques de aire comprimido.
- Debido a la magnitud de las sobrepresiones alcanzadas en los brazos de embarque como consecuencia del Golpe de ariete producido por los Casos: Cierre de válvulas de Embarque (15 seg) y Cierre de válvulas QCDC (5 seg), se recomienda la verificación del diseño del sistema de seguridad basado en válvulas de alivio con tanques recolectores de crudo que actualmente cuenta la plataforma de embarque y que no fue especificado en las simulaciones realizadas.
- Se recomienda que para cualquier modificación futura del sistema como lo puede ser: cabezales de embarque nuevos, adición de bombas de embarque y tanques de almacenamiento, cambios en la filosofía de operación y de los fluidos de trabajo, entre otros, se realice la evaluación del Golpe de Ariete tomando en cuenta estos nuevos parámetros.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Belmonte, Carmen A., “Estudio de Golpe de Ariete”, Inelectra, 1997
- Cameron Hydraulic Data, C.C. Heald, Phillipsburg, N.J., U.S.A, 1988
- Codigo ASME, “Boiler and Pressure Vessel”, Sección II, Part A, Ferrous Material Specifications. New York, 1999.
- Codigo ASME, “Boiler and Pressure Vessel”, Sección VIII, Division 1, New York, 1999.
- Corpoven Hydraulic Transient Analysis Crude Loading System, Jose, Venezuela, Rev. 01, 14 de Agosto, 1997.
- Dennis R., Moss, “Pressure Vessel Design Manual”, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1987.
- Documento INEDOM 903 P3060 T11 Gud, “Guia de diseño para Golpe de Ariete”, Inelectra, 1998.
- Ferdinand L., Singer, “Resistencia de Materiales”, Ediciones de Castillo S.A., Madrid, 1971.
- Garzon B., Alvaro I., “Golpe de ariete”, Informe de la pasantia realizada en la empresa: Inelectra S.A., Caracas, Febrero 1998.
- Pietersz C., Frank, “ Perdidas por fricción en tuberias debido a la resistencia del flujo de líquidos” Marzo, 2000.
- Inelectra-Confurca, “Manual de Operaciones Unidad 8200”, Sincor N° 880-1-90-P09-Tec-015, Mayo 2000
- J., Paul Tullis, “Hydraulics of Pipelines”, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1989.

Mendez, Manuel V., “Tuberías a Presión”, Universidad Católica Andrés Bello”, Caracas, 1995.

Parmakian, John, “Waterhammer Analysis”, Dover Publications Inc, New York, 1963.

PIPENET™, “Transient Module User Manual”, Sunrise Systems Ltd, Rev 6.1, Diciembre 1999.

Potter, Merle C., “Mecánica de Fluidos”, Prentice Hall, Mexico, 1997.

Sánchez, Alejandro, “Programa para Cálculo de Golpe de Ariete”, Informe de pasantía realizada en Inelectra, Enero-Mayo de 2000.

Shigley, Joseph E. y Mischke, Charles R., “Diseño en Ingeniería Mecánica”, Mc Graw Hill, 5<sup>ta</sup> Edición, U.S.A. 1990.

SINCOR, Paquete 7B OCEMI, Documento 880-1-90-MO1-Cal-005, “Waterhammer Calculations”, Confurca-Inelectra.

SINCOR, Paquete 7B OCEMI, Documento 880-1-90-PO9-TEC-005, “Line List”, Confurca-Inelectra.

Swaffield, J. A. y Boldy, A. P., “Pressure Surge in Pipe and Duct Systems”, Vermont, 1993. Technical Data Handbook, The Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Co., U.S.A, 1984.

Trouvay & Cauvin, Catálogo “Materiel Petrole”, 1986

[www.sunrise-sys.com](http://www.sunrise-sys.com)

Wylie, E. Benjamin y Streeter, Victor I., “Fluid Transients in Systems”, Prentice Hall, New Jersey, 1993.