

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



**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE ALIVIO  
DE PRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 y 2, DEL PATIO DE  
TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE LA REFINERÍA  
PUERTO LA CRUZ**

**REALIZADO POR:**  
**Br. GERMÁN ANTONIO MATA**  
**MATA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD DE  
ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**BARCELONA, ABRIL DEL 2010**

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



**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE ALIVIO  
DE PRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 y 2, DEL PATIO DE  
TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE LA REFINERÍA  
PUERTO LA CRUZ**

---

**PROF. JOHNNY J. MARTÍNEZ.**

**Asesor Académico**

---

**ING. JUAN GARCÍA**

**Asesor Industrial**

**BARCELONA, ABRIL DEL 2010**

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



**EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE ALIVIO  
DE PRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 y 2, DEL PATIO DE  
TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE LA REFINERÍA  
PUERTO LA CRUZ**

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

**APROBADO**

---

**PROF. ORLANDO AYALA**

**Jurado Principal**

---

**PROF. JOSÉ. E. RENGEL**

**Jurado Principal**

---

**PROF. JOHNNY J. MARTÍNEZ**

**Asesor Académico**

**BARCELONA, ABRIL DEL 2010**

# **RESOLUCIÓN**

De acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y solo podrán ser utilizadas a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”

# RESUMEN

En este trabajo se presenta una evaluación hidráulica de los sistemas de alivio de presión en los Múltiples 1 y 2 del área de recepción, almacenaje y entrega de crudos de la Refinería Puerto La Cruz. El desarrollo del proyecto se inició a partir de visitas de campo donde se describieron las condiciones del sistema actual de alivio así como también se obtuvieron datos de operación para las troncales que están asociadas al sistema de alivio de presión en los Múltiples 1 y 2. Luego, se identificaron las diferentes contingencias que generan sobrepresión en los Múltiples 1 y 2 y se determinaron las cargas de alivio mediante el uso de las Normas API 520 y 521. Aunado a esto se calcularon las caídas de presión en cada Troncal con la ayuda del simulador PIPEPHASE VERSION 9.1; se seleccionaron las diferentes válvulas a ubicarse en el sistema de alivio de presión según la Norma API 520 y 521, igualmente se calcularon las nuevas caídas de presión en cada línea del sistema con las válvulas seleccionadas mediante el simulador comercial y se actualizaron los planos de ubicación de las válvulas en cada línea de crudo que pasan por los Múltiples 1 y 2, utilizando el software AUTOCAD 2006. En esta evaluación, se encontró que las contingencias que generaron sobrepresión se debió a la de expansión térmica y golpe de ariete; el caudal máximo desalojado por las válvulas de alivio fue de  $0,221 \text{ m}^3/\text{s}$  (3502,92 gpm) en la Troncal 54x2x16 (Blanca). Los diámetros de las nuevas válvulas de alivio fueron mayores en el Múltiple 2; cumpliendo con lo referido a las Normas API 520 y 521.

# CONTENIDO

<b>RESOLUCIÓN .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>V</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>VI</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>11</b>
<b>EL PROBLEMA.....</b>	<b>11</b>
1.1 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA .....	11
<i>1.1.1 Refinería Puerto La Cruz .....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.2 Ubicación.....</i>	<i>14</i>
<i>1.1.3 Objetivos y Estructura Organizativa.....</i>	<i>15</i>
1.2 DESCRIPCION DEL ÁREA DE TRABAJO .....	16
<i>1.2.1 Gerencia de Movimiento de Crudos y Productos (MCyP).....</i>	<i>17</i>
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
1.4 OBJETIVOS.....	21
<i>1.4.1 Objetivo General .....</i>	<i>21</i>
<i>1.4.2 Objetivos específicos .....</i>	<i>21</i>
<b>CAPITULO II.....</b>	<b>23</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>23</b>
2.1 ANTECEDENTES .....	23
2.2 CRUDOS .....	24
<i>2.2.1 Clasificación de los Crudos.....</i>	<i>24</i>
2.3 SISTEMAS DE TUBERIAS .....	25
2.4 TEOREMA DE BERNOULLI.....	25
2.5 NÚMERO DE REYNOLDS .....	27
2.6 PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN SISTEMAS DE TUBERÍAS.....	28

2.6.1. Pérdidas primarias .....	28
2.6.2. Pérdidas secundarias o por accesorios .....	30
2.7 COEFICIENTE DE RESISTENCIA (K) .....	31
2.8 PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE (PTMP) .....	32
2.9 PRESIÓN DE OPERACIÓN .....	33
2.10 PRESIÓN DE AJUSTE .....	33
2.11 PRESIÓN DE ALIVIO .....	33
2.12 SOBREPRESIÓN .....	34
2.13 EVENTO .....	34
2.14 EMERGENCIA .....	34
2.15 ACUMULACIÓN .....	34
2.16 CONTRAPRESIÓN .....	34
2.17 CONTRAPRESIÓN ACUMULADA .....	35
2.18 CONTRAPRESIÓN SÚPERIMPUESTA .....	35
2.19 VÁLVULA DE ALIVIO .....	35
2.20 VÁLVULA DE SEGURIDAD .....	35
2.21 VÁLVULA DE ALIVIO Y SEGURIDAD .....	35
2.22 VÁLVULA CONVENCIONAL DE ALIVIO Y SEGURIDAD .....	36
2.23 CAUSAS DE SOBREPRESIÓN .....	37
2.23.1 Expansión Térmica .....	37
2.23.2 Golpe de Ariete .....	40
2.23.2.1 Tiempo de Cierre .....	41
2.23.2.2 Ecuaciones del Golpe de Ariete .....	42
2.24 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS VÁLVULAS DE ALIVIO Y SEGURIDAD .....	47
2.24.1 Establecimiento de la Presión de Alivio .....	47
2.24.2 Determinación de la Capacidad de Alivio .....	48
2.24.3 Determinación del orificio de la válvula de alivio de presión .....	48
2.25 NORMAS QUE RIGEN LOS SISTEMAS DE ALIVIO .....	49

2.25.1	API 520. Selección e Instalación de Dispositivos de Alivio de Presión en Refinerías .....	49
2.25.2	API 521. Sistemas de Alivio de Presión y Despresurización .....	50
2.25.3	API 521. Guías de Sistemas de Alivio de Presión y Despresurización .....	50
2.26	NORMAS PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS INDUSTRIALES .....	51
2.26.1	Norma ASME/ANSI B 16.5 .....	51
2.26.2	Norma ASME/ANSI B 31.3 .....	51
2.27	PROGRAMA DE SIMULACION PIPEPHASE .....	52
2.27.1	Aplicaciones más relevantes .....	52
2.27.2	Tipos de simulación .....	52
2.27.3	Modelos de fluidos .....	53
2.27.3.1	Modelos no composicionales .....	54
2.27.3.2	Modelo composicional .....	55
2.28	PROGRAMA DE SIMULACIÓN PRO/II® VERSIÓN 8.1 .....	55
<b>CAPÍTULO III</b>	.....	<b>57</b>
<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	.....	<b>57</b>
3.1	METODOLOGÍA DEL TRABAJO .....	57
3.2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	58
3.3	RECOPIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL CRUDO QUE FLUYE POR LAS LÍNEAS QUE PASAN POR LOS MÚLTIPLES 1 Y 2 ..	58
3.4	DETERMINACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 Y 2 .....	60
3.4.1	Troncales .....	60
3.4.1.1	Troncal 51 (Roja) .....	60
3.4.1.2	Troncal 52 (Azul) .....	61
3.4.1.3	Troncal 53 (Verde) .....	61
3.4.1.4	Troncal 54 x 26 (Morado) .....	62



3.4.1.5 Troncal 54 x 2 x 16 (Blanca) .....	62
3.4.2 MÚLTIPLES .....	63
3.4.2.1 Múltiple 1 .....	64
3.4.2.2 Múltiple 2 .....	65
3.5 ESTUDIO DE LAS CONTINGENCIAS QUE GENERAN SOBREPRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 Y 2.....	69
3.6 DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS DE ALIVIO SEGÚN LO ESTABLECIDO EN LAS NORMAS API 520 Y 521 .....	72
3.6.1 Evaluación de las Troncales.....	74
3.6.1.1 Expansión Térmica .....	74
3.6.1.2 Golpe de Ariete.....	80
3.7 CÁLCULO DE LAS CAIDAS DE PRESIÓN EN CADA TRONCAL, CON LA AYUDA DE UN SIMULADOR COMERCIAL .....	97
3.7.1 Datos de entrada en Pipephase Versión 9.1.....	97
3.8 SELECCIÓN DE LAS DIFERENTES VÁLVULAS A UBICARSE EN EL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN, SEGÚN LA NORMA API-520 ....	99
3.9 CÁLCULO DE LAS NUEVAS CAIDAS DE PRESIÓN EN CADA TRONCAL CON LAS VÁLVULAS SELECCIONADAS .....	102
3.10 ACTUALIZACIÓN DE LOS PLANOS DE UBICACIÓN DE LAS VÁLVULAS EN CADA TRONCAL DE LOS MÚLTIPLES 1 Y 2 .....	103
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>104</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>104</b>
4.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN UBICADO EN LOS MÚLTIPLES 1 Y 2 .....	104
4.2 CONTINGENCIAS QUE GENERAN SOBREPRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 Y 2 SEGÚN LAS NORMAS API 520 Y 521 .....	105
4.3 CARGAS DE ALIVIO SEGÚN LO ESTABLECIDO EN LAS NORMAS API 520 Y 521 .....	106

4.3.1	<i>Expansión Térmica</i> .....	106
4.3.2	<i>Golpe de Ariete</i> .....	109
4.4	CAÍDA DE PRESIÓN EN LAS TRONCALES CON LA AYUDA DE UN SIMULADOR COMERCIAL .....	113
4.5	VÁLVULAS A UBICARSE EN EL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN SEGÚN LA NORMA API-520.....	115
4.6	NUEVAS CAÍDAS DE PRESIÓN EN LAS TRONCALES DEL SISTEMA CON LAS VÁLVULAS SELECCIONADAS CON LA AYUDA DE UN SIMULADOR COMERCIAL .....	117
	<b>CAPÍTULO V</b> .....	<b>118</b>
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>118</b>
5.1	CONCLUSIONES .....	118
5.2	RECOMENDACIONES .....	120
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>121</b>
	<b>METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:</b>	<b>168</b>

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Reseña histórica de la empresa

Petróleos de Venezuela, S.A (PDVSA), fue creada el 30 de Agosto de 1975 por el Ejecutivo Nacional mediante el decreto Presidencial N° 1.123. Desde su creación, PDVSA, se ha convertido en una de las corporaciones energéticas más importantes del mundo. Es la casa matriz que se encarga del desarrollo de la industria petrolera, petroquímica y carbonífera, y de planificar, coordinar, supervisar y controlar las actividades operativas de 14 empresas filiales que entraron en funcionamiento en 1976 en sustitución de las 13 concesionarias multinacionales y de la Corporación Venezolana de Petróleo (CVP). En el año 1977, fue anunciada la primera etapa del proceso de racionalización de la estructura organizativa de la industria, al reducirse de catorce (14) a cinco (5) filiales: Lagoven, Maraven, Meneven, CVP y Corpoven fue registrada como filial de PDVSA el 19 de Noviembre de 1978 e inició sus actividades, como operadora el 18 de Diciembre del mismo año.

En este sentido, a finales de 1977, la corporación energética Venezolana crea la empresa PDVSA Petróleo y Gas, la cual fue constituida por tres grandes divisiones, dedicadas a las actividades medulares del negocio: PDVSA Exploración y Producción, PDVSA Manufactura y Mercadeo y PDVSA Servicios. Cada una de estas divisiones a su vez fue integrada por diversas empresas y unidades del negocio, ubicadas tanto en Venezuela como en el exterior.

**PDVSA Exploración y Producción**, se encarga de desarrollar las actividades de búsqueda de reservas y explotación de petróleo y gas natural, los convenios

operativos para la reactivación de los campos petroleros, la participación de la industria en los contratos de exportación a riesgo y producción en áreas nuevas bajo el esquema de ganancias compartidas y en las asociaciones estratégicas. Las actividades de explotación están dirigidas hacia la búsqueda de nuevas reservas de crudo liviano y mediano para sustentar los planes de crecimiento de la capacidad de producción, así como para profundizar el conocimiento de áreas prospectivas. Las reservas probadas de crudo se ubican en 72 millones de barriles (MMB) y la capacidad de crudo y condensado en 3,4 millones de barriles diarios (MMBD). Así mismo, las reservas de gas natural alcanzan los 143 billones de pies cúbicos (MMMPC), lo cual ratifica la posición de Venezuela como líder de reservas gasíferas en latino América y como quinta en el ámbito internacional.

La responsabilidad de **Manufactura y Mercadeo** pasa por integrar todos los sistemas de refinación ubicados en el país, incluso los de la refinería en Curazao. Igualmente, comprende la comercialización internacional de hidrocarburos de productos en el mercado industrial interno y en el mercadeo al detal.

**PDVSA Servicios**, se encarga de sustentar y apoyar el desarrollo económico y social del país utilizando al máximo todos los recursos. Esto implica tener responsabilidad de prever la cuota respectiva de los hidrocarburos que requiere el país, tanto para el consumo interno como para satisfacer las necesidades de exportación, cumplir con las correspondientes responsabilidades comerciales, sociales comunitarias y conservacionistas, contribuir a fomentar la eficiencia y profesionalismo de la industria, asegurar la disponibilidad, el desarrollo y óptima utilización de los recursos requeridos.

### 1.1.1 Refinería Puerto La Cruz

La historia de la Refinería Puerto la Cruz se transporta al año 1948, cuando aún la población de la época convivía en una creciente aldea de pescadores y no se vislumbraba el desarrollo acelerado de la zona. En ese año la empresa Venezuela Gulf Refining Co. (VENGREF), inicia la construcción de esta instalación refinadora, entrando en operación dos años más tardes. En la Fig. 1.1 se muestra la Refinería Puerto La Cruz.



**Figura 1.1.** Refinería Puerto La Cruz [2]

#### ➤ **Misión**

Maximizar el valor agregado al negocio, a través de la formación del petróleo y otros insumos en productos de alta calidad, de manera segura, confiable y rentable para satisfacción de nuestros clientes, armonía con la comunidad y el ambiente, con su más importante recurso altamente capacitado y motivado.

➤ **Visión**

Ser una Refinería modelo reconocida por su seguridad, calidad, rentabilidad, eficiencia, disciplina, trabajo en equipo y búsqueda de normas cada vez más altas, para vencer los retos y asegurar la supervivencia en el viaje para ser una refinería de clase mundial.

**1.1.2 Ubicación**

La Refinería Puerto la Cruz está ubicada en la Costa Nor-Oriental del país al Este de la ciudad de Puerto La Cruz en el estado Anzoátegui; tiene facilidades de acceso desde el Mar Caribe y está conectada por oleoductos con los campos de producción de Oriente y posee una capacidad de procesamiento de crudo de 200 MBD, garantizando al mercado interno el suministro de Gasolina, gas licuado petróleo (GLP), Kerosén, Diesel y residual.

Actualmente la refinería la conforman las instalaciones de Puerto La Cruz, El Chaure y San Roque, esta última ubicada a 40 km de Anaco, vecina a la población de Santa Ana, estado Anzoátegui, mientras que la instalación el Chaure está ubicada a orillas de la bahía Bergantín a 5 km de Puerto La Cruz. La Fig. 1.2 muestra la ubicación geográfica de la Refinería Puerto La Cruz.



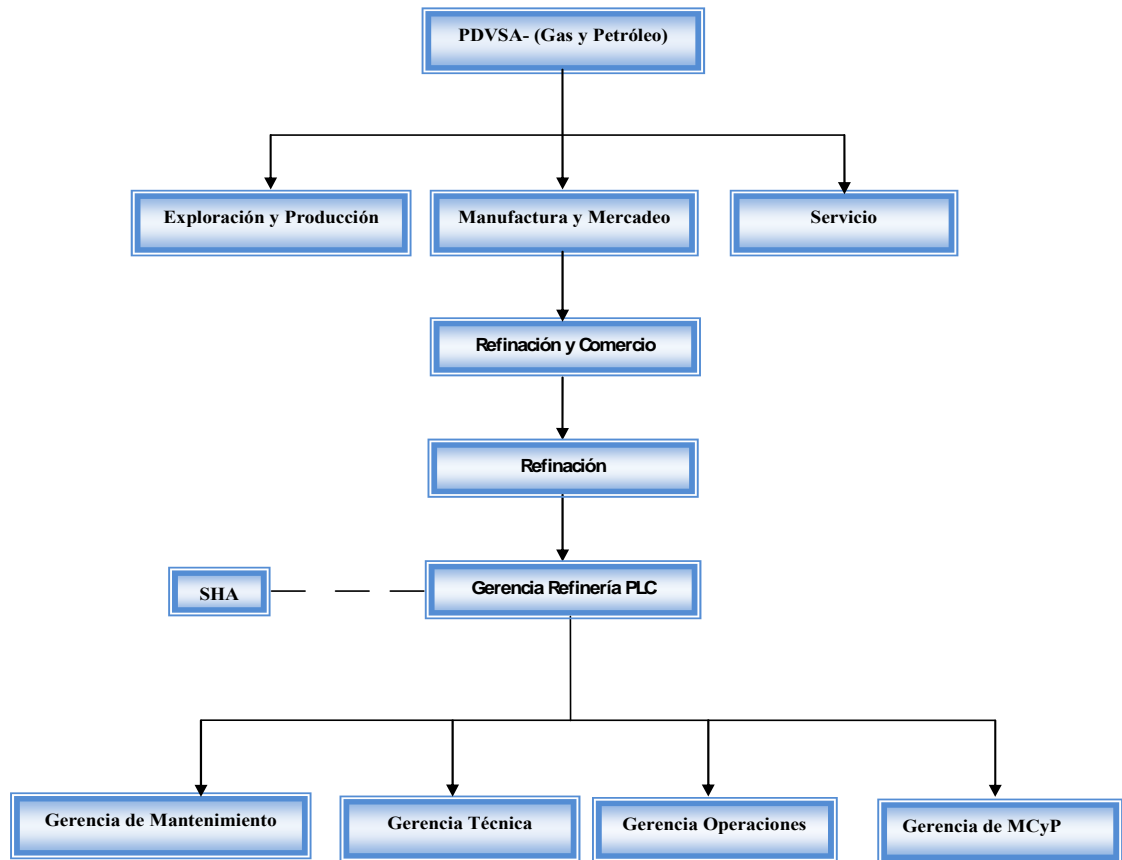
**Figura 1.2.** Ubicación geográfica de la Refinería Puerto La Cruz [3]

### 1.1.3 Objetivos y Estructura Organizativa

Debido a su ubicación, la Refinería Puerto La Cruz cumple con los siguientes funciones:

- Abastecer los requerimientos de combustible (Gasolina alta y media, Diesel y Jet A-1) del Oriente del Estado Venezolano.
- Exportar aproximadamente el 70% de su producción.
- Destinar el 30% de su producción al mercado interno.
- La estructura organizativa define el nivel de autoridad y comunicación entre todo el personal que labora en la corporación.

La estructura organizativa de las gerencias operacionales de la Refinería Puerto la Cruz se muestra en la Fig. 1.3.



**Figura 1.3.** Organigrama de las Gerencias Operacionales de la Refinería Puerto La Cruz [2]

## 1.2 Descripción del área de trabajo

El área de trabajo está ubicada en la Gerencia de Movimiento de Crudo en la Refinería Puerto la cruz, específicamente en el patio de tanques de almacenamiento, recibo y carga de crudo. En la Fig. 1.4 se observa el área de trabajo, así como también las distintas troncales y múltiples que intervienen en el manejo de los crudos hacia los diferentes destinos (destiladoras atmosféricas, embarque, etc).





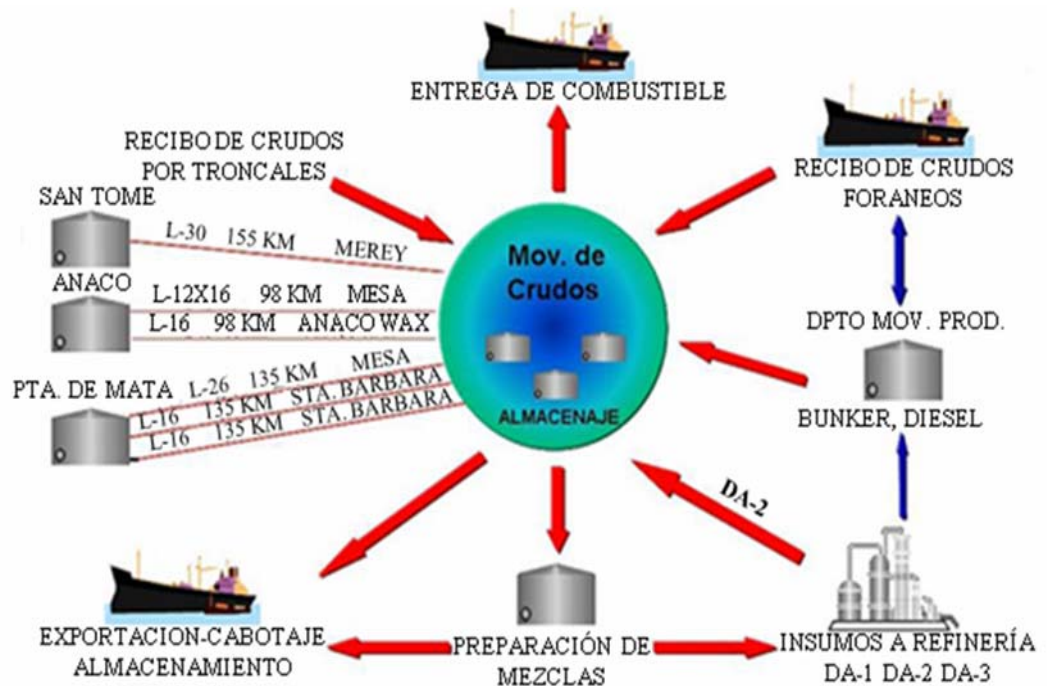
**Figura 1.4.** Área de trabajo (Sección del patio de tanques de almacenamiento, recibo y carga en la Refinería Puerto la Cruz)

### 1.2.1 Gerencia de Movimiento de Crudos y Productos (MCyP)

La Gerencia de Movimiento de Crudos y Productos es la encargada del Movimiento de hidrocarburos a escala nacional e internacional. Ésta tiene como objetivo principal alcanzar altos niveles de excelencia en las operaciones de manejo de hidrocarburos (Crudos y Productos) para satisfacer los niveles exigidos por sus clientes.

Entre los Procesos de Movimiento de Crudos (ver Fig. 1.5) se encuentran el recibo, almacenaje, mezcla y acondicionamiento de los diferentes crudos que circulan por las troncales. Esto con el objeto de garantizar el cumplimiento de los programas diarios de las Plantas Destiladoras y los compromisos de salidas por el Terminal, así como también el recibo de Diesel y Bunker para la entrega de combustibles a Buques Tanqueros. El recibo de crudo se realiza a través de seis troncales que difieren en

características y transportan segregaciones diversas provenientes de los centros de producción o Patios de Tanques del Oriente del país: Patio de Tanques Oficina (Crudo Merrey 16), Patio de Tanques Anaco (Crudos Mesa Oficina y Anaco Wax), y Patio de Tanques Travieso (Crudos Mesa 30 y Santa Bárbara).



**Figura 1.5.** Procesos de Movimiento de Crudos [2]

El Terminal Marino Guaraguao situado en la Costa Noroeste de Venezuela dentro de la Bahía de Bergantín, la cual a su vez se encuentra dentro de la Bahía de Pozuelos, maneja la producción de crudos, así como también los productos obtenidos de la Refinería Puerto la Cruz y los insumos para ser procesado en planta, y los requerimientos para complementar la mezcla de productos terminados tanto a mercado interno como a exportación.

El sistema de almacenamiento de crudo se encuentra dividido en tres grandes áreas llamadas Patios de Tanques: Carga, Refinería y El Chaure, ubicadas en el

Terminal Marino, Refinería Puerto La Cruz y Refinería El Chaure respectivamente. Estos Patios de Tanques almacenan el crudo proveniente de las troncales bien sea para abastecer a las Plantas de Procesamiento de Crudos o para cumplir con los requisitos de exportación y cabotaje.

### **1.3 Planteamiento del problema**

La Refinería Puerto la Cruz es uno de los centros de procesamiento de crudo más importantes de PDVSA e integra un circuito de manufactura del petróleo extraído en los campos de los Estados Monagas y Anzoátegui. Dicha refinería abarca tres áreas operacionales: Puerto La Cruz, El Chaure y San Roque, ubicadas en el Norte y el Centro del Estado Anzoátegui. Esta Refinería tiene una capacidad total de procesamiento de crudos de más de 200 mil barriles por día, de los cuales se obtienen 73 mil barriles de Gasolina y Nafta, 12 mil barriles de Kerosene-Jet, 43 mil barriles de Diesel y 73 mil barriles de residual e insumos requeridos para la mezcla de combustibles comercializados en los mercados interno y de exportación.

La Refinería está constituida de la siguiente manera: unidades de procesos, unidades de tratamiento y recuperación de azufre, servicios industriales y planta de hidroprocesos. Además de estas unidades, la Refinería Puerto la Cruz cuenta con una zona de recibo, entrega de crudos y productos llamada Terminal de Almacenamiento y Embarque Guaraguao (TAEG). Este terminal se subdivide en Patio de Tanques Refinería y Patio de Tanques Cerro de Carga, donde cuenta con una serie de tanques para el almacenamiento del crudo. En el Terminal de Almacenamiento y Embarque Guaraguao, se efectúa la recepción, almacenaje y entrega del crudo de las cinco (5) troncales T-51, T-52, T-53, T-54 Mesa y T-54 Santa Bárbara, las cuales reciben de los centros de producción crudo Merey, Mesa 28, Anaco Wax, Mesa 30 y Santa

Bárbara respectivamente. Luego de la entrega del crudo, parte de este pasa a los siete muelles que conforman el Terminal Marino.

Para la transferencia interna del crudo hacia los diferentes tanques de almacenamiento, se utilizan equipos de movilización (bombas, múltiples, válvulas). En su recorrido hacia dichos tanques, el crudo pasa a través de una serie de múltiples cuya función principal es realizar la distribución del crudo hacia los distintos tanques. Estos múltiples están formados por un conjunto de válvulas motorizadas y sistemas de alivio de presión para el manejo seguro de las operaciones.

Los sistemas de alivio son sistemas de seguridad que sirven para proteger: al equipo en donde se encuentra operando, al ambiente para evitar la contaminación y al personal que labora en dichos lugares de trabajo. Estos sistemas de alivio deben ser calibrados continuamente, para garantizar los requerimientos mínimos de operación. Desde hace algunos años atrás se han venido presentando algunos problemas en las válvulas de alivio ubicadas en los Múltiples 1 y 2, debido a que éstas fueron diseñadas para condiciones de operación de hace 30 años atrás (condiciones que son diferentes a las que se encuentran actualmente en planta). Cabe destacar que la mayoría de las válvulas de alivio desde hace 7 años aproximadamente no se le ha realizado la calibración (la presión de ajuste de diseño de la válvula de alivio ha disminuido con el tiempo), trayendo como consecuencia altos retrasos en el transporte de crudo desde los múltiples hacia los diferentes tanques, elevadas horas de mantenimiento y pérdidas de producción en la industria.

En busca de una pronta solución a esta problemática, la gerencia desea realizar una evaluación hidráulica del sistema de alivio de presión en los Múltiples 1 y 2, para determinar los requerimientos de alivio de presión en el sistema y verificar que el sistema de alivio está adecuado a las condiciones de operación que existen

actualmente en la recepción, almacenaje y entrega de crudo. Para cumplir con estas metas se verificarán si las válvulas de alivio se encuentran operando satisfactoriamente para las condiciones actuales de operación, si estas válvulas no operan satisfactoriamente, se seleccionarán aquellas para prevenir un incremento de la presión en el sistema de tuberías según las Normas API 520 y 521, y Normas PDVSA y se procederá a realizar una nueva simulación en el sistema con un simulador PIPEPHASE VERSIÓN 9.1 con las válvulas previamente seleccionadas. Todo esto con el fin de alcanzar una mejor productividad tanto del recibo como transporte hacia los distintos tanques ubicados en la Refinería Puerto la Cruz.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Realizar la evaluación hidráulica del sistema de alivio de presión en los múltiples 1 y 2, ubicado en el patio de tanques de almacenamiento y carga de la Refinería Puerto la Cruz.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar en laboratorio las propiedades físicas del crudo que fluye por las líneas que pasan por los múltiples 1 y 2.
2. Determinar en sitio la situación actual del sistema de alivio de presión ubicado en los múltiples 1 y 2.
3. Estudiar las contingencias que generan sobrepresión en los múltiples 1 y 2 de acuerdo a las Normas API 520 y 521.

4. Determinar las cargas de alivio según lo establecido en las Normas API 520 y 521.
5. Calcular las caídas de presión en cada línea con la ayuda de un simulador comercial.
6. Seleccionar las diferentes válvulas a ubicarse en el sistema de alivio de presión según la NORMA API-520.
7. Calcular las nuevas caídas de presión en cada línea del sistema con las válvulas seleccionadas con la ayuda de un simulador comercial.
8. Actualizar los planos de ubicación de las válvulas en cada línea de crudo que pasan por los múltiples 1 y 2 usando el software AUTOCAD 2006.

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 antecedentes

A continuación se presenta un resumen de varios trabajos que servirán de soporte para el desarrollo del presente proyecto de tesis.

En 1980, **Martínez [1]**, realizó un estudio del sistema de alivio en la refinería el Chaure, en donde estableció los cálculos para la determinación del flujo a aliviar, los escenarios de alivio, el estudio hidráulico de los colectores del sistema y el diseño de los quemadores, de acuerdo a las normas API 520, 521, RP 620, código ASME, ANSI B31-3. Como conclusiones se plantearon una serie de recomendaciones referentes a la ubicación, capacidad y mantenimiento del sistema de alivio.

En 2005, **Borrell [2]**, con el propósito de verificar si las condiciones de operación de la planta cumplía con los requerimientos de alivio ante diferentes contingencias, llevó a cabo una evaluación en el sistema de alivio de la unidad de destilación atmosférica (DA-1) de la Refinería Puerto La Cruz, por medio de simulaciones, pruebas de laboratorio, balances de masa y la verificación en campo. Los resultados permitieron identificar cuáles eran las válvulas de alivio de presión subdimensionadas, y se recomendó su reajuste o cambio.

En 2008, **Cova [3]**, realizó una evaluación de los sistemas de alivio del área de patio de tanques del cerro de carga de la Refinería Puerto la Cruz y patio de tanques del cerro Bellorín de la Refinería El Chaure, en donde se describieron las condiciones del sistema a partir de visitas de campo y se obtuvieron datos de

operación. Seguidamente, se identificaron las limitaciones y desviaciones de los sistemas de alivio, evaluando los requerimientos de venteo de vacío, presión, emergencia y fuego. Se encontró que los requerimientos de venteo obtenidos se encontraban por debajo de los venteos de los dispositivos vacío/presión instalados en los tanques.

En este trabajo se realizará una evaluación hidráulica a un sistema de alivio de presión, donde no se encuentran equipos como: intercambiadores de calor, calderas, compresores, etc. También cabe destacar que el flujo manejado por el sistema es crudo, y no vapor, es decir, sólo se trabajará con válvulas de alivio de presión, y no con válvulas de seguridad.

## 2.2 crudos

Es un líquido oleoso bituminoso de origen natural compuesto por diferentes sustancias orgánicas. Se encuentra en grandes cantidades bajo la superficie terrestre y se emplea como combustible y materia prima para la industria química. El crudo se extrae mediante la perforación de un pozo sobre el yacimiento. Si la presión de la bolsa de gas es suficiente, forzaré la salida natural del petróleo a través del pozo que se conecta mediante una red de oleoductos hacia su almacenamiento, y su transporte mediante buques petroleros y su refinación [8].

### 2.2.1 Clasificación de los Crudos

- **Crudo liviano.** Es aquel que tiene una gravedad API mayor a 31,1 °API
- **Crudo mediano.** Es aquel que tiene una gravedad API entre 22,3 y 31,1 °API.
- **Crudo Pesado:** Es aquel crudo que tiene una gravedad API entre 10 y 22,3 °API.



- **Crudos extrapesados.** Son aquellos que tienen gravedades API menores a 10 ° API.

### 2.3 Sistemas de tuberías

Las tuberías son elementos principales de las plantas industriales y su función principal es el transporte de petróleo entre dos o más estaciones de procesos. La sustancia que atraviesa el tubo puede ser aún una mezcla de ambas fases. Las tuberías son cuerpos cilíndricos de sección circular que limitan a sus alrededores por una pared de espesor constante, creando así un cuerpo anular.

Los accesorios de las tuberías son elementos mecánicos convenientes para ensamblar o desarmar los sistemas de tuberías. Los componentes incluyen la tubería, protecciones, rebordes, juntas de unión, válvulas y los dispositivos tales como juntas de dilatación o expansión, empalmes flexibles, mangueras de presión, trampas, tamices, líneas de instrumentos y separadores [7].

### 2.4 Teorema de bernoulli

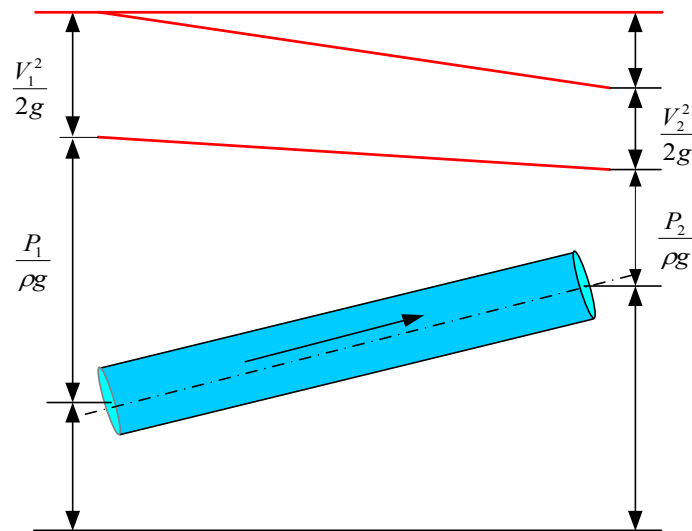
Es una forma de expresar la aplicación de la ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos en una tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad (Ver Fig. 2.1), es decir [7]:

$$Z + \frac{C_1 \cdot P}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2g} = H \quad (2.1)$$

Donde:

- $Z$  = Altura con respecto a un punto de referencia, m (pie)  
 $P$  = Presión, kPa (psi)  
 $\rho$  = Densidad del fluido,  $\text{kg/m}^3$  ( $\text{lb/pie}^3$ )  
 $V$  = Velocidad promedio de flujo, m/s (pie/s)  
 $g$  = Aceleración de gravedad,  $9,8 \text{ m/s}^2$  ( $32,2 \text{ pie/s}^2$ )  
 $H$  = Cabezal total, m (pie)  
 $C_1$  =  $1 \text{ m}^2$  (sistema internacional) y  $144 \text{ pulg}^2$  (sistema ingles)

Si las pérdidas por rozamiento se desprecian y no se aporta o se toma ninguna energía del sistema de tuberías (bombas o turbinas), la altura total  $H$  en la ecuación anterior permanecerá constante para cualquier punto del fluido. Sin embargo, en la realidad existen pérdidas o incrementos de energía que deben incluirse en la ecuación de Bernoulli.



**Figura 2.1.** Balance de energía mecánica para dos puntos de fluidos [7].

Note que la pérdida por razonamiento en la tubería desde el punto 1 al punto 2 se expresa como la pérdida de altura en (metros de fluido o pies de fluido). Entonces, la Ec. (2.1) puede escribirse de la siguiente manera:

$$\boxed{\frac{C_2 \cdot P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{C_2 \cdot P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_F} \quad (2.2)$$

Donde:

$H_F$  = Fricción o Pérdidas de Cabezal, m (pie)

$g$  = Aceleración de la Gravedad, m/s<sup>2</sup> (pie/s<sup>2</sup>)

$P$  = Presión, kPa (psi)

$Z$  = Altura con respecto a un punto de referencia, m (pie)

$\gamma$  = Peso específico, N/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>)

$C_2$  = 1 m<sup>2</sup> (sistema internacional) y 144 pulg<sup>2</sup> (sistema ingles)

## 2.5 Número de reynolds

Se define como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de fricción. Es un parámetro numérico adimensional obtenido de la combinación de las variables: diámetro de la tubería, densidad, viscosidad y velocidad de flujo. El número de Reynolds para una tubería cilíndrica o circular viene dado por [7]:

$$\boxed{\text{Re} = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu}} \quad (2.3)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds

$D$  = Diámetro interno, m (pie)

$V$  = Velocidad promedio del fluido, m/s (pie/s)

$\rho$  = Densidad del fluido,  $\text{kg/m}^3$  (lb/pie<sup>3</sup>)

$\mu$  = Viscosidad absoluta del fluido, Pa.s (lb/pie. s)

El tipo de flujo se determina calculando el Número de Reynolds:

- Si  $Re < 2000$ , el flujo es laminar
- Si  $Re > 4000$ , el flujo es turbulento

La zona intermedia ( $2000 \leq Re \leq 4000$ ) es una región de transición.

## 2.6 Pérdidas de presión en sistemas de tuberías

Las pérdidas de presión en un sistema de tuberías se deben a [7]:

- Pérdidas primarias
- Pérdidas secundarias o por accesorios

### 2.6.1. Pérdidas primarias

Las pérdidas primarias dependen del factor de fricción ( $f$ ), el cual es un factor empírico en la ecuación de Fanning para caídas de presión en tuberías rectas. Este factor es función del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la pared ( $\varepsilon/D$ ). Para una determinada clase de material, la rugosidad es relativamente independiente del diámetro de la línea, así que en el diagrama de moody ( $f$  vs.  $Re$ ), frecuentemente  $D$  se reemplaza por el parámetro  $\varepsilon/D$ . El factor de fricción de Fanning no debe ser confundido con el factor de fricción Darcy el cual es cuatro veces mayor [7].

Si el flujo es laminar ( $Re < 2000$ ), el factor de fricción ( $f$ ) puede determinarse a partir de la ecuación:

$$f = \frac{64}{Re}$$

(2.4)

Si el número de Reynolds es mayor a 4000, el flujo es turbulento y el factor de fricción se puede obtener por la ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[ -2 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon/D}{3,7} \right) + \left( \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \right] \right] \quad (2.5)$$

Donde:

$\varepsilon$  = Rugosidad absoluta de las paredes internas de la tubería, m (pie)

$f$  = Factor de fricción de Darcy

Re = Número de Reynolds

D = Diámetro de la tubería, m (pie)

Si el valor de Re está comprendido entre 2000 y 4000 (flujo de transición), se recomienda utilizar la Ec. (2.5) para determinar el factor de fricción.

Las pérdidas primarias se pueden expresar por la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$H_f = f \cdot \frac{LV^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

(2.6)

Donde:

$H_f$  = Pérdidas primarias, m (pie)

$f$  = Factor de fricción de Darcy

$L$  = Longitud de la tubería, m (pie)

$V$  = Velocidad, m/s (pie/s)

$g$  = Aceleración de gravedad,  $9,81 \text{ m/s}^2$  ( $32,2 \text{ pie/s}^2$ )

$D$  = Diámetro, m (pie)

### 2.6.2. Pérdidas secundarias o por accesorios

Cuando un fluido se desplaza uniformemente por una tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del fluido indicada por la velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería cambia la dirección de la corriente en forma parcial o total, altera la configuración característica de flujo y causa pérdidas adicionales. En una tubería corta con muchos accesorios, las pérdidas por fricción en dichos accesorios pueden ser mayores que en la tubería recta. Las válvulas y accesorios en una línea de tubería alternan la configuración del flujo; y producen una pérdida de presión adicional. La pérdida de presión secundaria consiste de [7]:

- La pérdida de presión dentro de una válvula, codo, tees, etc.
- La pérdida en la tubería de entrada es mayor de la que se produce normalmente si no existe válvula en la línea. Este efecto es pequeño.
- La pérdida de presión en la tubería de salida es superior a la que se produce normalmente si no hubiera válvula en la línea. Este efecto puede ser muy grande.

Estas pérdidas se pueden expresar en función del coeficiente de resistencia  $K$  por la siguiente ecuación:

$$H_m = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (2.7)$$

Donde:

$H_m$  = Pérdidas por accesorio, m (pie)

$K$  = Coeficiente de resistencia

$V$  = Velocidad del fluido, m/s (pie/s)

$g$  = Aceleración de gravedad, 9,81 m/s<sup>2</sup> (32,2 pie/s<sup>2</sup>)

## 2.7 Coeficiente de resistencia (k)

Es una constante para todas las medidas de un cierto diseño o línea de válvulas y accesorios, si todas las medidas fueran geoméricamente similares. Sin embargo, la similitud geométrica es difícil que ocurra; si lo fuera, es porque el diseño de válvulas y accesorios se rige por costos de fabricación, normas, resistencia estructural y otras consideraciones. Igualando la Ec. (2.6) con la Ec. (2.7) se obtiene el coeficiente  $K$ . (Ec. 2.8). La relación  $L/D$  es la longitud equivalente en diámetros de tubería recta que causa la misma pérdida de presión que el obstáculo en las mismas condiciones de flujo [25]:

$$K = f \frac{L}{D} \quad (2.8)$$

Donde:

$f$  = Factor de fricción de Darcy

$L$  = Longitud de la tubería, m (pie)

$D$  = Diámetro de la tubería, m (pie)

## 2.8 PRESIÓN DE TRABAJO MÁXIMA PERMISIBLE (PTMP)

Es la máxima presión que puede soportar un equipo, en condiciones de operación, para la temperatura de diseño, es decir es el máximo valor que se puede adoptar para el ajuste del dispositivo de alivio. Depende del tipo de material, su espesor y las condiciones de servicio establecidas para su diseño. El recipiente o equipo no debe ser operado por encima de esa presión, la presión de trabajo máxima permisible viene dada por la siguiente ecuación:

$$PTMP = \frac{2.T.S.E}{D - 2.T.Y} \quad (2.9)$$

Donde:

$PTMP$  = Presión de trabajo máxima permisible psi (kPa)  
 $T$  = Espesor nominal pulg (m)  
 $D$  = Diámetro exterior del tubo pulg (m)  
 $S$  = Esfuerzo permisible del material del tubo, a la temperatura de diseño.

Estos valores de esfuerzo deben tomarse del código ASME B31.3, Tabla A-1 (Apéndice C, Tabla C.1) psig (kPa)

$E$  = Factor de eficiencia de la unión soldada. Estos valores de esfuerzo deben tomarse del código ASME B31.3, Tabla A-1A y Tabla A-1B (Apéndice C, Tabla C.3).

$Y$  = Factor de temperatura del material se muestra en la Tabla 2.1. (Válido para  $t < D/6$  y para los materiales mostrados)



**Tabla 2.1.** Valores de factor de temperatura del material para materiales ferrosos [18].

Material	Temperatura (°F)					
	900 y menor	950	1000	1050	1100	1150
<b>Aceros Ferríticos</b>	0,4	0,5	0,7	0,7	0,7	0,7
<b>Aceros Austeníticos</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7
<b>Otros Metales</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>Dúctiles</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
<b>Hierro Colado</b>	0,0	--	--	--	--	--

## 2.9 PRESIÓN DE OPERACIÓN

Es la presión manométrica a la cual el equipo está normalmente en servicio.

## 2.10 PRESIÓN DE AJUSTE

Presión a la cual está ajustado el resorte de la válvula de alivio, para activarse en caso de sobrepresión. En la mayoría de las aplicaciones, la presión de ajuste de una válvula de alivio de presión es igual a la presión de diseño. Sin embargo, esta presión de ajuste es regulada (hacia arriba o hacia abajo) para compensar cualquier efecto de la presión estática y caída de presión por fricción, que pueda ocurrir cuando la válvula se instala en otra parte que no sea directamente sobre el recipiente.

## 2.11 PRESIÓN DE ALIVIO

Se determina a partir de la presión de ajuste del dispositivo de alivio más la acumulación o sobrepresión que corresponda según sea el caso. En una válvula de alivio de líquido, la presión de alivio debe ser considerada la presión de entrada en la cual la válvula empieza a descargar bajo condiciones de servicios. En una válvula de

seguridad (de alivio) y de seguridad en condiciones de servicios de gas o vapor, la apertura es inmediata (pop).

### **2.12 SOBREPRESIÓN**

Es el incremento de presión por encima de la presión de ajuste del dispositivo de alivio primario durante la descarga. Es la misma que la acumulación cuando el dispositivo de alivio está ajustado a la presión de trabajo máxima permisible.

### **2.13 EVENTO**

Suceso que envuelve el comportamiento de un equipo, una acción humano un agente o elemento externo al sistema y que causa la desviación de su comportamiento normal.

### **2.14 EMERGENCIA**

Interrupción de las operaciones normales en la cual el personal, los equipos y el ambiente están en peligro.

### **2.15 ACUMULACIÓN**

Aumento de presión sobre la presión máxima o presión de trabajo permisible de un recipiente durante la descarga a través de un dispositivo de alivio de presión y se expresa en unidades de presión o como porcentaje.

### **2.16 CONTRAPRESIÓN**

Es la presión estática existente en la boca de salida de una válvula de seguridad. La contrapresión puede estar impuesta por las condiciones de flujo en el sistema de descarga u originada por el flujo de escape desde la válvula de seguridad a través del sistema de descarga.

### **2.17 CONTRAPRESIÓN ACUMULADA**

Incremento de la presión en el cabezal de descarga, la cual se genera después que un dispositivo de alivio de presión abre.

### **2.18 CONTRAPRESIÓN SÚPERIMPUESTA**

Presión estática existente a la salida de un dispositivo de alivio de presión al momento de su apertura.

### **2.19 VÁLVULA DE ALIVIO**

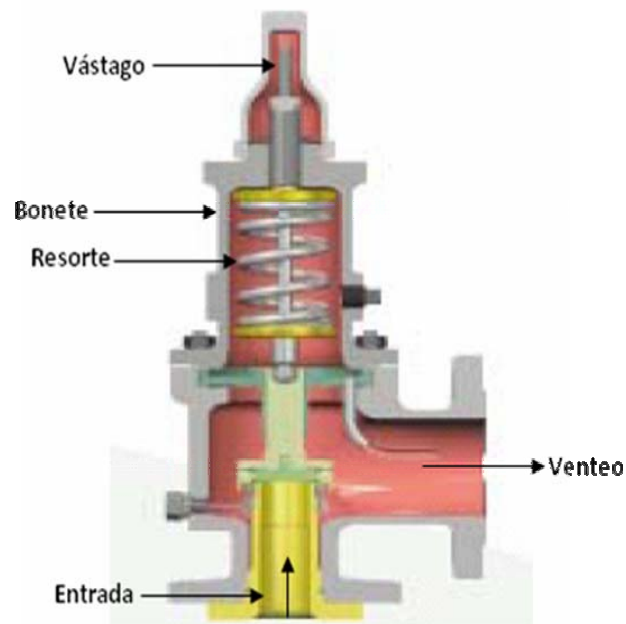
Es un dispositivo automático de alivio de presión accionado por la presión estática aguas arriba de la válvula y que abre proporcionalmente al aumento de la presión por encima de la presión de apertura. Se usa principalmente para servicios de líquido [3].

### **2.20 VÁLVULA DE SEGURIDAD**

Es un dispositivo automático de alivio de presión accionado por la presión estática aguas arriba de la válvula y caracterizado por una apertura rápida total o una acción tipo reventón. Se usa para servicios de gas o de vapores [3].

### **2.21 VÁLVULA DE ALIVIO Y SEGURIDAD**

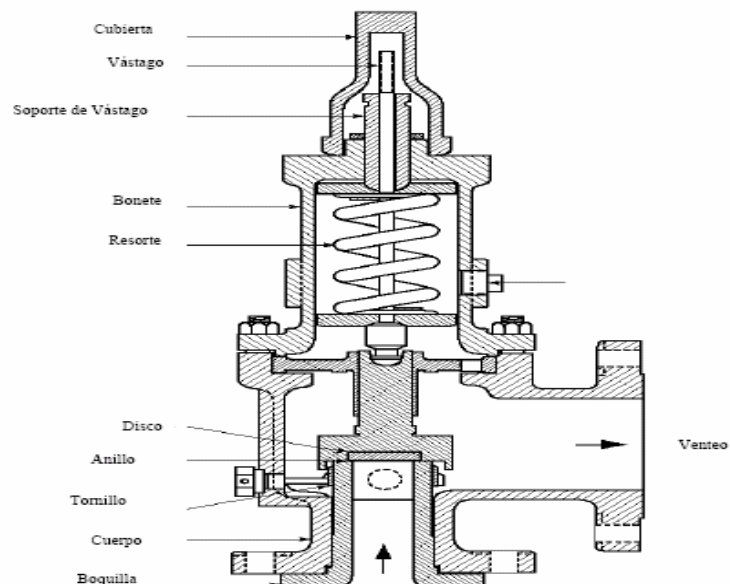
Es un dispositivo automático de alivio de presión de resorte comprimido, apropiado para uso, bien sea como válvula de seguridad o como válvula de alivio, dependiendo de su aplicación (ver Fig. 2.2) [3].



**Figura 2.2.** Modelo de válvula de alivio y seguridad [3].

## 2.22 VÁLVULA CONVENCIONAL DE ALIVIO Y SEGURIDAD

Es una válvula de alivio de presión del tipo bonete cerrado, con el venteo del bonete colocado del lado de la descarga de la válvula, por lo tanto, es desbalanceada. Las características de actuación de la válvula, es decir presión de apertura, presión de cierre, grado de levantamiento y capacidad de alivio, son directamente afectadas por los cambios de contrapresión sobre la válvula (Ver Fig. 2.3) [3].



**Figura 2.3.** Válvula de alivio convencional de resorte comprimido sin fuelle [3].

## **2.23 CAUSAS DE SOBREPRESIÓN**

Para el diseño de los sistemas de alivio para protección contra sobrepresión es necesario considerar todas las contingencias que puedan causar una sobrepresión y evaluarlas en términos de las presiones que puedan ser generadas y/o de los flujos de fluidos que deben ser aliviados. Basándose en este criterio, en este estudio se presentan dos causas de sobrepresión, que se pueden clasificar de la siguiente manera: Expansión Térmica y Golpe de Ariete.

### **2.23.1 Expansión Térmica**

La expansión térmica es el aumento del volumen de líquido causado por un aumento de la temperatura. La capacidad requerida no es fácil de determinar, ya que el líquido a aliviar requiere de un dispositivo con poca capacidad, específicamente dispositivos de pequeñas dimensiones, de  $\frac{3}{4}$  pulg x 1 pulg (0,02 m x 0,03 m) en tamaño nominal (NPS  $\frac{3}{4}$  x NPS 1).

La selección apropiada de la presión de ajuste para estos dispositivos de alivio debería incluir un estudio de la posición de diseño de todos los artículos incluidos en el bloqueo del sistema. El ajuste de presión de alivio térmico nunca debería estar por encima de la presión máxima permitida en el componente más débil del sistema a ser protegido. Sin embargo, el dispositivo que alivia la presión debería ser colocado lo suficientemente alto para abrir sólo bajo condiciones de expansión hidráulica. Cuando la válvula de alivio térmico descarga en sistemas cerrados los efectos de contrapresión deberían ser considerados.

Dos aplicaciones generales para los cuales los dispositivos de alivio térmico de ¾ pulg x 1 pulg (0,02 x 0,03 m) son: las tuberías de gran diámetro sin aislamiento instaladas en la superficie de recipientes grandes o los intercambiadores que operan llenos de líquidos. Si la tasa total de calor transferido y el coeficiente de expansión térmica del fluido son conocidas, se puede calcular la capacidad de alivio requerida, mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{\beta \cdot H}{C_e \cdot SG \cdot C_p} \quad (2.13)$$

Donde:

$Q$  = Caudal del líquido a aliviar  $m^3/s$  ( $gpm$ )

$H$  = Calor transferido  $kJ/h$  ( $Btu/h$ )

$\beta$  = Coeficiente de expansión térmica  $1/^\circ C$  ( $1/^\circ F$ )

$C_p$  = Calor específico del líquido a las condiciones de alivio  $kJ/Kg.^\circ C$  ( $Btu/lbm \ ^\circ F$ )

$SG$  = Gravedad específica media del líquido.

$C_e$  = 1,974 (Sistema Internacional), 500 (Sistema Ingles)

El coeficiente de expansión térmica ( $\beta$ ) se calcula mediante la ecuación:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.14)$$

Donde:

$\beta$  = Coeficiente de expansión térmica  $1/^{\circ}\text{C}$  ( $1/^{\circ}\text{F}$ )

$\rho$  = Densidad del fluido a la presión de operación  $\text{kg}/\text{m}^3$  ( $\text{lb}/\text{pie}^3$ )

$\left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)$  = Derivada de la densidad en función de la temperatura  $\text{kg}/\text{m}^3.^{\circ}\text{C}$   
( $\text{lb}/\text{pie}^3.^{\circ}\text{F}$ )

El calor transferido (H) se calcula mediante la relación:

$$H = \alpha \cdot S \quad (2.15)$$

Donde:

$H$  = Calor transferido  $\text{kJ}/\text{h}$  ( $\text{Btu}/\text{h}$ )

$\alpha$  = Densidad de radiación  $\text{kJ}/\text{h}.\text{m}^2$  ( $\text{Btu}/\text{h} \text{pie}^2$ )

$S$  = Superficie bajo radiación térmica  $\text{m}^2$  ( $\text{pie}^2$ )

La superficie bajo radiación térmica (S) se calcula con la siguiente expresión:

$$S = \pi \cdot r \cdot L \quad (2.16)$$

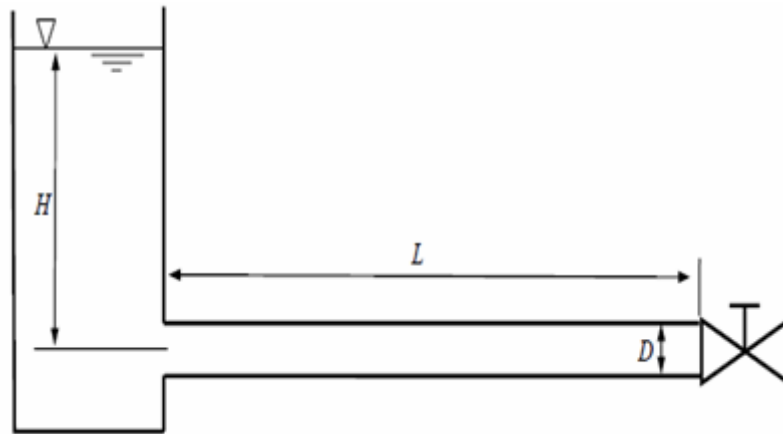
Donde:

$r$  = Radio de la tubería  $\text{m}^2$  (pie)

$L$  = Longitud de la tubería  $\text{m}^2$  (pie)

### 2.23.2 Golpe de Ariete

Es un fenómeno transitorio que se produce en una tubería forzada por el efecto de fluctuación del caudal circulante, y que se traduce en una variación de la presión interna en la tubería, por encima o por debajo de la presión de trabajo. La Fig. 2.4 representa una tubería de longitud ( $L$ ), espesor ( $\delta$ ) y diámetro interior ( $D$ ) por la que circula agua proveniente de un depósito aguas arriba y que termina en una válvula en su extremo derecho. Si se cierra ésta rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería así como en un trabajo necesario para dilatar esta última: **golpe de ariete positivo**. Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión: **golpe de ariete negativo**.



**Figura 2.4.** Esquema de instalación susceptible al fenómeno de golpe de ariete [7].

El estudio de este fenómeno permitirá ver qué factores son influyentes en este mecanismo, con el objetivo de predecir las sobrepresiones que podrían alcanzarse en el circuito a fin de seleccionar el espesor de tubería necesario para resistir estas sollicitaciones mecánicas.



Aunque es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente, el estudio inicial del caso de **cierre instantáneo** ayuda a comprender el estudio de los casos reales. Así, al cerrarse instantáneamente la válvula de la Fig. 2.7, se provoca una sobrepresión ( $\Delta P$ ) que se transmite aguas arriba a la velocidad del sonido, ( $a$ ). Por tanto, esta transmisión aguas arriba no ocurre de forma instantánea, sino que lo hace a una velocidad finita ( $a$ ). En la zona por donde ha pasado la onda, el flujo se ha detenido, el fluido se ha comprimido y la tubería expandido, mientras que donde aún no ha llegado, las condiciones siguen siendo las iniciales. De esta forma, se ha creado una onda elástica, una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el depósito, vuelve a la válvula y de nuevo al depósito, así sucesivamente, originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda. Si la longitud de la tubería se denota como  $L$ , entonces el tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre la válvula y el depósito es:  $t_0 = L/a$ . Al cabo de un tiempo  $T = 4t_0 = 4L/a$  el ciclo se repite. Evidentemente, una situación ideal como ésta conduciría a un ciclo infinito. El proceso se repetiría indefinidamente si no existiera rozamiento en la tubería. En un caso real con rozamiento, el fenómeno se va amortiguando con el tiempo.

### 2.23.2.1 Tiempo de Cierre

El estudio del golpe de ariete fue hecho en primer lugar por Joukowski, mientras que la solución completa del problema fue dada por Allievi. El cálculo de la sobrepresión depende del **tiempo de cierre**,  $t_c$  de la válvula. Se ha hablado de cierre instantáneo de la válvula, pero éste en la práctica es gradual, con lo que la onda no presenta un frente brusco sino una rampa de mayor o menor pendiente según se tarde más o menos en cerrar. A pesar de ello, el incremento final de presión es el mismo, a no ser que haya tiempo suficiente para que las sobrepresiones iniciales viajen hasta el depósito y regresen. Por tanto, el cierre puede ser:

- **Rápido:**  $0 < t_c < 2t_0$ . La presión máxima es la misma que en el cierre instantáneo; aunque la curva de presiones en la tubería en función del tiempo sea distinta. En el cierre rápido, una onda de presión no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo. Por ejemplo, en una tubería de acero de 1000 m de longitud, habría que cerrar la válvula en menos de 2 segundos para que existiera cierre instantáneo y se alcanzaran las presiones máximas. A partir de este tiempo, los rebotes en forma de depresión provenientes del depósito harían que el incremento de presión no fuese tan elevado.
- **Lento:**  $t_c > 2t_0$ . La presión máxima es menor que en el caso precedente. Este último caso es más frecuente en la práctica. En definitiva, el tiempo de cierre es, por tanto, un factor fundamental para la reducción de la intensidad del golpe de ariete.

### 2.23.2.2 Ecuaciones del Golpe de Ariete

#### ➤ Cierre total o parcial en una tubería elástica

Al cierre instantáneo de la válvula, el fluido se decelera, lo que da lugar a la fuerza,  $F_i$ , siendo:

$$F_i = -m \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.17)$$

Donde  $\Delta t$  no es el tiempo de cierre de válvula (por hipótesis,  $t_c = 0$ ), sino el tiempo finito que ha transcurrido para que una cierta masa, siendo igual:

$$m = \rho.L.A \quad (2.18)$$

Donde:

$A$  = Área de la tubería,  $m^2$  (pie<sup>2</sup>)

$\rho$  = Densidad del fluido,  $kg/m^3$  (lb/pie<sup>3</sup>)

$L$  = Longitud de la tubería,  $m$  (pie)

Esta masa de fluido ocupa una longitud finita de tubería ( $L$ ), reduzca su velocidad en un cierto valor finito ( $\Delta V$ ).

Donde:

- En el cierre total:

$$\Delta V = -V \quad (2.19)$$

- En el cierre parcial:

$$\Delta V = V' - V \quad (2.20)$$

Donde:

$V$  = Velocidad inicial del fluido,  $m/s$  (pie/s)

$V'$  = Velocidad final del fluido,  $m/s$  (pie/s)

Agrupando estas consideraciones en la expresión de la fuerza de inercia ( $F_i$ ), y teniendo en cuenta que la sobrepresión es definida por:

$$\Delta p = \frac{F_i}{A} \quad (2.21)$$

La celeridad de la onda ( $a$ ) viene dada por:

$$a = \frac{L}{\Delta t} \quad (2.22)$$

Entonces, combinando todas las expresiones anteriores se obtienen las fórmulas de Joukowski:

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot V \quad (2.23)$$

(Sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula)

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot (V - V') \quad (2.24)$$

(Sobrepresión en cierre instantáneo parcial de la válvula)

### ➤ Velocidad de propagación de ondas

Joukowski también fue el primero en desarrollar una expresión para el cálculo de la velocidad de onda en función de los parámetros de la instalación. En la bibliografía [21] se puede consultar la demostración, que aquí se omite por brevedad. La celeridad o velocidad de la onda elástica del fluido viene dada por:

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{K}{E} \cdot \frac{D}{\delta}}} \quad (2.25)$$

Donde:

a = Celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, m/s (pie/s)

K = Módulo de elasticidad del fluido (módulo de Bulk), Pa (psi)

$\rho$  = Densidad del líquido, kg/m<sup>3</sup> (lb/pie<sup>3</sup>)

D = Diámetro de la tubería, m (pulg)

E = Módulo de elasticidad de la tubería, Pa (psi)

$\delta$  = Espesor de la tubería, m (pulg)

En la Tabla 2.2 se muestran algunos valores típicos del módulo de elasticidad para diversos materiales de tuberías:

**TABLA 2.2.** Valores típicos del módulo de elasticidad para diversos materiales de tuberías.

Valores de E Para Diversos Materiales	$E \times 10^{-10}$ (N/m <sup>2</sup> )
Hierro y Acero	2
Hormigón	0,2
Fundición	1
Fibro cemento	1,8 (1,6 - 2)
Poliéster	1,5
Plomo	0,2
PVC	0,033 (0,02 – 0,05)

➤ **Presión máxima en cierre total, lento y uniforme de la válvula**

En una primera aproximación, se supone que la tubería es rígida (inelástica) y que el cierre de la válvula es uniforme. Retomando la expresión de la fuerza de inercia, en términos de presión, se tiene que:

$$\Delta p = -\rho l \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.26)$$

Como se supone un movimiento uniforme, entonces,  $-\Delta V/\Delta t$  se puede expresar como:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{0 - V}{t_c} = -\frac{V}{t_c} \quad (2.27)$$

Por tanto:

$$\Delta p = \rho \cdot L \frac{V}{t_c} \quad (2.28)$$

Modificando esta fórmula con un coeficiente  $K_e$  que está comprendido entre 1 y 2 (normalmente inferior a 1,5), para tener en cuenta el efecto de la elasticidad de la tubería, se obtiene en definitiva:

$$\Delta p = K_e \cdot \frac{\rho \cdot L \cdot V}{t_c} \quad (2.29)$$

(Sobrepresión en cierre lento y total de la válvula en tubería elástica)

Esta ecuación que rige el proceso en la mayoría de los casos, permite enunciar una serie de consecuencias prácticas. Así, el peligro del golpe de ariete en una instalación es tanto mayor cuanto mayor sea la longitud de la tubería (L) y cuanto mayor sea la velocidad del líquido en la tubería (V) y cuanto más rápido sea el cierre de la válvula ( $t_c$ ).

## 2.24 DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE LAS VÁLVULAS DE ALIVIO Y SEGURIDAD

Los pasos para determinar el tamaño de las válvulas de alivio y seguridad según la Norma API 520 se describen a continuación [15]:

### 2.24.1 Establecimiento de la Presión de Alivio

Esta presión suele ser la presión de trabajo máxima permisible (PTMP) del recipiente protegido, sin embargo la presión de alivio debe ser menor que (PTMP).

La sobrepresión varía según las condiciones de operación, como se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Porcentajes de sobrepresión establecidos por la Norma API 520 para las válvulas de alivio de presión

Condición	Sobrepresión
Normal (sin fuego)	10 %
Válvula sencilla	10 %
Válvulas múltiples	16 %
Con incendio	20 %
Calderas de vapor	3 %
Líquidos de vaporización instantánea	10 % a 20 %

### 2.24.2 Determinación de la Capacidad de Alivio

La determinación del flujo de alivio se basa en el requerimiento de alivio de presión de un equipo, tubería o sistema en las condiciones más severas que puedan presentarse durante su operación. El primer paso en el diseño para protección contra sobrepresión es considerar todas las contingencias que puedan causar una sobrepresión y evaluarlas en términos de las presiones que puedan ser generadas o de los flujos de fluidos que deben ser aliviados.

### 2.24.3 Determinación del orificio de la válvula de alivio de presión

#### ➤ Dimensionamiento para servicio de líquido

Las válvulas en servicios de líquido que están diseñadas en concordancia con el código ASME, requieren certificación de la capacidad y puede ser dimensionada de la siguiente forma:

$$A = \frac{Q}{38.K_d.K_w.K_v} \sqrt{\frac{SG}{P_{alivio} - P_{contrap}}} \quad (2.30)$$

Donde:

- $A$  = Área de la válvula de alivio  $m^2$  ( $pulg^2$ )
- $SG$  = Gravedad específica del fluido
- $K_w$  = Factor de corrección para contrapresión. Este factor no necesita ser aplicado a válvulas convencionales (o sea  $K_w = 1.0$ ).
- $P_{alivio}$  = Presión de alivio kPa (psi)
- $P_{contrap}$  = Contrapresión, esta es el 10% de la presión de alivio kPa (psi)
- $K_d$  = Coeficiente de descarga; 0,65 adimensional.
- $Q$  = Flujo a aliviar  $m^3/s$  ( $gpm$ )
- $K_v$  = Factor de corrección para líquidos viscosos.



## **2.25 NORMAS QUE RIGEN LOS SISTEMAS DE ALIVIO**

### **2.25.1 API 520. Selección e Instalación de Dispositivos de Alivio de Presión en Refinerías**

La parte I de esta normativa se basa en la selección de dispositivos de relevo de presión usada en refinerías e industrias relacionadas para equipos con presiones máximas permisibles de 15 psig o superior a ésta. Los dispositivos de relevo de presión cubiertos en esta práctica son previstos para proteger los recipientes y equipos relacionados contra la sobrepresión del funcionamiento y contingencias de fuego.

Esta práctica incluye definiciones básicas e información acerca de características operacionales y aplicaciones de varios dispositivos de alivio de presión. Los dispositivos de alivio de presión protegen solamente un recipiente contra la sobrepresión, ellos no protegen contra las fallas estructurales cuando el recipiente es expuesto a temperaturas extremadamente altas. En esta práctica se expone la información acerca de las maneras apropiadas de reducción de presión y restricción de calor a la entrada del dispositivo.

Las reglas para protección de sobrepresión de recipientes encendidos son previas en la Sección I del ASME: Código de caldera y envases de sobrepresión. La segunda parte consta de los métodos de instalación de dispositivos de alivio de presión para equipos que tienen presiones máximas permisibles de 15 psig o superior a ésta. Las válvulas de alivio de presión o rotura de disco pueden ser usadas independientemente o en conjunto para proporcionar la protección requerida contra la acumulación excesiva de la presión. Según lo expuesto en esta práctica, el término válvula de alivio incluye las válvulas de descarga de seguridad usadas en cualquier servicio de fluido compresible o incompresible, y válvulas de descarga usadas en servicios de fluido incompresible. Esta práctica cubre gas, vapor, servicio de dos

fases e incompresible, no cubre aplicaciones especiales que requiera consideraciones inusuales de instalación [16]

### **2.25.2 API 521. Sistemas de Alivio de Presión y Despresurización**

Este estándar internacional es aplicable para sistemas de alivio de presión o despresurización de vapor. Aunque se intentaron usar primeramente en refinerías de aceites, es también aplicable para las instalaciones petroquímicas, plantas de gas, instalaciones de licuefacción del gas natural (LGN) e instalaciones de producción de gas. La información proporcionada es diseñada para ayudar en la selección del mejor sistema para los riesgos y circunstancias que sean involucrados en varias instalaciones. Está prevista para suplir las prácticas dispuestas en ISO 4126 ó API RP-520-I para establecer las bases de diseño, especificar los requisitos y da pautas para examinar las causas principales de sobrepresión, determinar las razones individuales de relevo, y selecciona y diseña la disposición del sistema, incluyendo cada pieza como instalación de tubos, recipientes, mechurrios y venteo. Además, no se aplica para calderas de vapor de encendido directo [17].

### **2.25.3 API 521. Guías de Sistemas de Alivio de Presión y Despresurización**

Esta práctica es aplicable para sistemas de alivios de presión y despresurización de vapor. La información proporcionada es diseñada para ayudar en la selección del sistema más apropiado para los riesgos y circunstancias envueltas en varias instalaciones. Esta práctica está prevista para suplir las dispuestas en API 520 para establecer las bases de diseño. La información de instalación de tubos pertinente para sistemas de alivio de presión actual debe ser diseñada de acuerdo con el ASME B31.3 u otros códigos aplicables [17].

Los riesgos de salud pueden estar asociados con la operación de equipo de alivio de presión. La discusión de los riesgos específicos está fuera del alcance de este documento.

## **2.26 NORMAS PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS INDUSTRIALES**

El diseño, la fabricación y la construcción de sistemas de tuberías están regulados por códigos, de acuerdo a su uso; los principales códigos aplicables a tuberías de crudos y sus derivados en la industria petrolera son:

- ASME/ANSI B 16.5 Steel Pipe Flanges and Flanged Fittings
- ASME/ANSI B 31.3 Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping

### **2.26.1 Norma ASME/ANSI B 16.5**

Este estándar cubre rangos de presión, temperatura, materiales, dimensiones, tolerancias, marcas y pruebas para bridas de tubos y accesorios bridados para clases de “ratings” de 150, 300, 400, 600, 900, 1.500 y 2.500 [19].

### **2.26.2 Norma ASME/ANSI B 31.3**

Este estándar abarca lo referente al diseño de tuberías de refinerías de petróleo y plantas químicas [18].

## **2.27 PROGRAMA DE SIMULACION PIPEPHASE**

Pipephase es un programa de simulación hidráulica que permite diseñar, analizar y mejorar una gran cantidad de sistemas de flujo, tanto compresible como incompresible.

### **2.27.1 Aplicaciones más relevantes**

- Dimensionamiento de líneas de flujo y tuberías de producción en nuevos diseños.
- Determinación de la capacidad máxima en tuberías.
- Simulación de sistemas de recolección y transmisión.
- Determinación de los requerimientos de bombeo, compresión, calentamiento o enfriamiento a través del pronóstico de los perfiles de presión, temperatura, velocidad de flujo y tasas de distribución en los sistemas de expansión.
- Análisis de mecanismos de producción “gaslift” y recuperación secundaria como inyección de gas y agua.

En la simulación de las troncales, sólo se emplearon parte de las aplicaciones porque el fluido manejado se puede considerar como líquido puro, tomando en cuenta que el mismo es desgasificado y deshidratado en los patios de tanques respectivos a menos del 1% de agua [22]. (Ver Apéndice B).

### **2.27.2 Tipos de simulación**

Los tipos de simulación indican cuales algoritmos serán usados para resolverlos. Los más comunes son:

- Modelos de redes.
- Análisis de gaslift.

➤ Generación de Tablas PVT.

Se debe seleccionar modelos de redes si el sistema que se quiere simular es una distribución, conjunto o un sistema de flujos de lazos con una o más uniones, o si el sistema es un link sencillo donde se desea calcular la presión en la fuente del link sencillo. En el estudio de las troncales éste representa el tipo de simulación seleccionado por las características aquí descritas.

Se debe seleccionar análisis gaslift si se desea la optimización individual del análisis de una sarta gaslift.

Se debe seleccionar la generación de Tablas PVT si se desea que Pipephase genere un archivo de datos PVT para ser usados en una corrida posterior. Usando las Tablas PVT se incrementa la velocidad de simulación al permitirle al Pipephase acceder a los cálculos de mejoramiento flash [22].

### **2.27.3 Modelos de fluidos**

Un modelo de fluidos no composicional puede ser definido como un promedio de las propiedades correlacionadas. Un modelo de fluidos es composicional cuando puede definirse en términos de sus componentes individuales directamente o a través de una matriz de datos. Hay 7 tipos de fluidos en Pipephase:

- Crudo
- Composicional
- Composicional/crudo
- Condensado de gas
- Líquido
- Gas
- Vapor

### 2.27.3.1 Modelos no composicionales

Un modelo de fluido no composicional debe definirse como crudo, condensado de gas, líquido, gas o vapor. El crudo y condensado de gas son bifásicos, con una fase dominante. Los modelos de fluidos gas y líquido son de una sola fase. El vapor puede ser de una fase o bifásico dependiendo de sus condiciones. Cuando se trabaja con fluidos multifásicos no composicionales se debe suministrar la gravedad específica para el gas, líquido y fases del agua, aún si no se esperan tenerlas presentes. En el caso de fluidos de una sola fase, se necesita especificar la densidad de referencia de esa fase.

#### ➤ **Modelo de crudo**

Es un modelo de fluido multifásico que predice las propiedades de la gravedad de gas, la gravedad de petróleo, y el volumen estándar de gas por volumen de la unidad estándar de petróleo.

#### ➤ **Modelo de condensado de gas**

Los condensados de gas son fluidos multifásicos no composicionales con predominio de la fase gaseosa. Los modelos de condensado de gas son muy utilizados en la simulación del comportamiento de crudo liviano con API mayor de 45, debiéndose suministrar sólo la gravedad específica.

#### ➤ **Modelo líquido monofásico**

Todas las propiedades de un líquido no composicional son calculadas por Pipephase a partir de la gravedad específica y sus correlaciones internas. Se debe definir al líquido como agua o hidrocarburo y suministrar su gravedad.

➤ **Modelo gas monofásico**

Todas las propiedades de un gas no composicional son calculadas por Pipephase a partir de la gravedad específica (la cual se especifica), y sus correlaciones internas.

➤ **Modelo de vapor**

El vapor es un fluido no composicional que permite la salida en dos fases. No se puede pasar por encima de la Tabla de datos de vapor contenidos en las bibliotecas de Pipephase. Sin embargo, todas las correlaciones de las caídas de presión las cuales son disponibles para fluidos composicionales están disponibles para los modelos de vapor.

### 2.27.3.2 Modelo composicional

Hay tres métodos para definir los modelos en Pipephase:

- Seleccionando los componentes individuales de la biblioteca de Pipephase
- Definiendo componentes individuales como pseudocomponentes del petróleo
- Definiendo una matriz de datos y permitiendo que Pipephase lo divida en cortes de petróleo.

## 2.28 PROGRAMA DE SIMULACIÓN PRO/II® Versión 8.1

PRO/II es un completo sistema de simulación para ingenieros de proceso en las industrias: química, petróleo, gas natural, procesamiento de sólidos y de polímeros. Combina los datos de una gran biblioteca de componentes químicos y amplios métodos de predicción de propiedades termodinámicas, con las técnicas de operación

de unidades más avanzadas y flexibles. Aporta los servicios computacionales para desarrollar todos los cálculos de balances de masa y energía requeridos para modelar la mayoría de los procesos en estado estacionario. Usando el PRO/II se pueden simular procesos en estado estacionario que incluyan unidades de procesos tales como columnas de destilación rigurosa, compresores, reactores, intercambiadores de calor, mezcladores, y muchos más [20].



## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

Para el desarrollo de este trabajo, fueron planteadas y ejecutadas un grupo de etapas que permitieron: determinar la situación actual del sistema de alivio de cada múltiple, calcular la sobrepresión en los múltiples según las NORMAS API-520 y 521, así como también, calcular las caídas de presión mediante un simulador comercial, seleccionar las válvulas a implantarse en el sistema y actualizar los planos de ubicación de las válvulas en el sistema estudiado mediante un software de diseño.

#### **3.1 METODOLOGÍA DEL TRABAJO**

Las etapas desarrolladas en este estudio se muestran a continuación:

1. Revisión bibliográfica
2. Recopilación de las propiedades físicas del crudo que fluye por las líneas que pasan por los Múltiples 1 y 2
3. Determinación del estado actual del sistema de alivio de presión en los Múltiples 1 y 2
4. Estudio de las contingencias que generan sobrepresión en los Múltiples 1 y 2
5. Determinación de las cargas de alivio según lo establecido en las normas API 520 y 521

6. Cálculo de las caídas de presión de cada línea mediante un simulador comercial
7. Selección de las diferentes válvulas a ubicarse en el sistema de alivio de presión, según la NORMA API-520
8. Cálculo de las nuevas caídas de presión en cada línea del sistema con las nuevas válvulas seleccionadas mediante un simulador comercial
9. Actualización de planos de ubicación de las válvulas en cada línea de crudo que pasa por los Múltiples 1 y 2, usando el software AUTOCAD 2006

### **3.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Esta etapa consistió en la recopilación de la información necesaria para el desarrollo del proyecto, mediante la consulta de los textos: Mataix [7], Crane[11] y Streeter[21], manuales de operación de los Múltiples 1 y 2 [5], normas nacionales (Normas PDVSA) e internacionales (Normas API), tesis de grado (Cova [3]), páginas de Internet y otras publicaciones.

### **3.3 RECOPIACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL CRUDO QUE FLUYE POR LAS LÍNEAS QUE PASAN POR LOS MÚLTIPLES 1 Y 2**

Las propiedades físicas de los crudos fueron obtenidos de los reportes realizados por el Laboratorio de la Refinería Puerto La Cruz, el cual es el responsable de la ejecución de los análisis y exactitud de los resultados para la certificación de calidad de los cargamentos de crudo. La certificación de los crudos se logra utilizando los estándares API / ASTM / COVENIN.

Las propiedades de cada crudo que circula por las Troncales varían de acuerdo a la zona donde se produce. Las propiedades más relevantes de los crudos que se estudian en este trabajo, se observan en la Tabla 3.1. De acuerdo a la clasificación del crudo (tomando como referencia la gravedad API) impuesta por el Ministerio de Energía y Petróleo (MENPET), se tiene lo siguiente:

- El crudo Merey que circula por la troncal 51, corresponde a los llamados “Petróleos Pesados” ( $10 < \text{API} < 22$ ).
- El crudo Mesa Oficina, que circula por la troncal 52, corresponde a los llamados “Petróleos Medianos” ( $22 < \text{API} < 29$ ).
- Los crudos Anaco Wax, Mesa 30 y Santa Bárbara, los cuales circulan por las Troncales Tr-53, Tr-54x26 y Tr-54x2x16 respectivamente, corresponden a los llamados “Petróleos Livianos” ( $\text{API} > 29$ ) en la escala API.

**TABLA 3.1.** Propiedades físicas de los crudos [4].

PROPIEDADES	CRUDOS			
	Merey	Anaco Wax	Santa Bárbara	Mesa 30
<b>Gravedad API</b>	16	46,2	40,1	31,5
<b>Gravedad Especifica</b>	0,9593	0,7868	0,8246	0,8681
<b>Viscosidad a 100 °F (cSt)</b>	461,8	1,17	2,55	11,71
<b>Viscosidad a 122 °F (cSt)</b>	206,3	1,72	2,21	7,72
<b>Punto de Inflamación [°F]</b>	78,8	< 32	< 32	< 32
<b>Punto de Fluidez [°F]</b>	50	0	< -70	1,12
<b>% A y S</b>	2,93	0,2	0,53	1,12

### **3.4 DETERMINACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 Y 2**

Esta etapa se basó en la realización de visitas de campo para la caracterización de los sistemas de alivio de presión que conforman el área de patio de almacenaje de la refinería Puerto la Cruz. Para ello se identificaron las troncales que están asociadas al sistema de alivio de presión en los Múltiples 1 y 2. Antes de proceder a la descripción del sistema es necesario describir las líneas troncales, desde los Patios de Tanques hasta su llegada a la Refinería de Puerto La Cruz.

#### **3.4.1 Troncales**

Son oleoductos que se encargan de distribuir crudo en los diferentes Patios de Tanques en la Refinería de Puerto La Cruz. El proyecto tiene su atención en las siguientes troncales: 51 (Roja), 52 (Azul), 53 (Verde), 54x26 (Morado) y 54x2x16 (Blanca).

##### **3.4.1.1 Troncal 51 (Roja)**

El crudo Merey, es transportado desde el Patio de Tanques Oficina ubicado en la población de San Tome a través de la Troncal 51, constituida por una tubería de 0,76 m (30 pulg) de diámetro y una longitud aproximadamente de 164 km. Esta Troncal cuenta con: una estación de bombeo en Patio de Tanques Oficina con una presión de descarga máxima de 800 psig (5515,82 kPa), una estación de rebombeo en Anaco con una presión de descarga de 600 psig (4136,87 kPa) y otra en el km 52 con una presión de descarga de 600 psig (4136,87 kPa).

La Troncal 51 a su entrada a la Refinería Puerto la Cruz, reduce su diámetro nominal de 0,76 m (30 pulg) a 0,61 m (24 pulg) desde el Múltiple 1 hasta el Múltiple 4, y posteriormente se expande desde el diámetro 0,61 m (24 pulg) a 0,76 m (30 pulg) hasta el Múltiple principal de carga.

Actualmente, la presión de descarga máxima de la troncal 51 a nivel del km 52 se encuentra limitada a 400 psig (2757,91 kPa) debido al estado de la tubería entre el km 52 y Puerto La Cruz, manteniendo una capacidad promedio de transporte de 350 MBPD.

#### **3.4.1.2 Troncal 52 (Azul)**

El crudo Mesa, con una gravedad 28° API, es transportado desde Anaco a través de la Troncal 52, la cual está constituida por una tubería de 0,41 m (16 pulg) de diámetro y una longitud aproximadamente de 45 km, luego cambia de diámetro a 0,30 m (12 pulg) por una longitud cerca de 26 km, y posteriormente cambia de nuevo de diámetro a 0,41 m (16 pulg) hasta llegar a Puerto La Cruz con una longitud aproximadamente de 23 km. La presión promedio de descarga de las bombas en Anaco es de 350 psig (2413,17 kPa) y no se cuenta con ningún sistema de rebombeo intermedio. La troncal 52 se mantiene uniforme con un diámetro nominal de 0,41 m (16 pulg) hasta el Múltiple 2, siendo éste el último punto de distribución de crudo Mesa en la Refinería Puerto la Cruz a través de ésta tubería. El caudal promedio transportado a través de la troncal es de 68,5 MBPD.

#### **3.4.1.3 Troncal 53 (Verde)**

El crudo Anaco Wax es transportado desde Anaco a través de la troncal 53, la cual se encuentra constituida por una tubería de 0,41 m (16 pulg) de diámetro y 95 km de longitud. Esta troncal no cuenta con unidades de rebombeo intermedio y la

presión de descarga promedio de las bombas ubicadas en Anaco es de 300 psig (1068,43 kPa), manteniendo una capacidad media de transporte de 100 MBPD. La Troncal 53 en el Múltiple 1 está constituida por tuberías de 0,30m (12 pulg) de diámetro hasta su salida y posteriormente se expande a 0,41 m (16 pulg) en el trayecto restante del estudio.

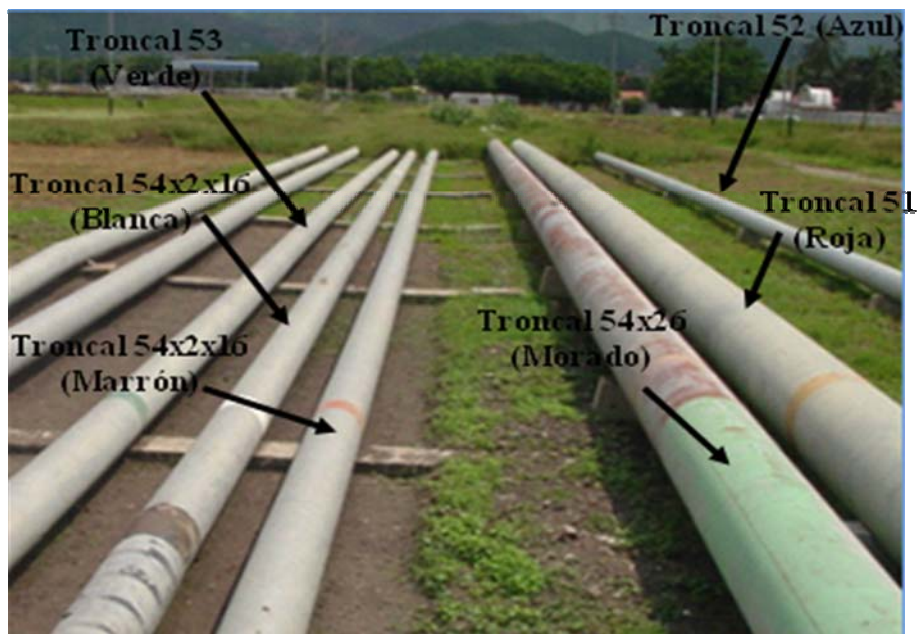
#### **3.4.1.4 Troncal 54 x 26 (Morado)**

El crudo Mesa es transportado desde el Patio de Tanque Travieso (ubicado al Norte del Estado Monagas) a través de la Troncal 54, la cual se encuentra constituida por una tubería de 0,76 m (30 pulg) de diámetro nominal y 164 km de longitud, que posteriormente cambia de diámetro a 0,66 m (26 pulg) con una longitud de 19 km hasta llegar a Puerto La Cruz. Esta troncal cuenta con dos estaciones de rebombeo ubicadas en Urica (RB1) y en el km 52 (RB2), las cuales poseen una presión de descarga de 800 psig (5515,82 kPa), manteniendo una capacidad de transporte de 680 MBPD. La Troncal 54x26 a su llegada a la Refinería Puerto la Cruz, se reduce de 0,66 m (26 pulg) de diámetro nominal a 0,61 m (24 pulg) desde el Múltiple 1 hasta el Múltiple 4, y posteriormente se expande hasta 0,66 m (26 pulg) de diámetro hasta llegar al Múltiple Principal de Carga.

#### **3.4.1.5 Troncal 54 x 2 x 16 (Blanca)**

El crudo Santa Bárbara, es transportado desde el Patio de Tanques Travieso (ubicado al Norte del Estado Monagas) a través de la Troncal 54x2x16, la cual se encuentra constituida por una tubería de 0,66 m (26 pulg) de 133 km de longitud, que posteriormente se ramifica en dos tuberías de 0,41 m (16 pulg) y una longitud de 19 km cada una. Este crudo es bombeado directamente desde el Patio de Tanque Travieso a una presión de 800 psig (5515,82 kPa) y no posee estaciones de rebombeo intermedio, manteniendo una capacidad promedio de transporte de 343 MBPD. La

troncal 54x2x16 a la entrada del Múltiple 1 reduce su diámetro nominal de 0,41 m (16 pulg) a 0,30m (12 pulg) hasta la salida del mismo, donde posteriormente se expande nuevamente a 0,41 m (16 pulg) en todo el trayecto hasta el Múltiple Principal de Carga. Para visualizar las líneas troncales en su llegada al Múltiple 1 se puede observar en la Fig. 3.1.



**Figura 3.1.** Líneas Troncales, ubicadas en la Refinería Puerto la Cruz.

### 3.4.2 MÚLTIPLES

Es un conjunto de válvulas y conexiones, por donde el crudo se distribuye hacia los diferentes patios de tanques. Los múltiples se encuentran ubicados en distintos puntos del patio de almacenaje y carga de La Refinería Puerto la Cruz.

En la actualidad existen 8 múltiples que manejan crudo, pero en este proyecto se estudiaron únicamente los múltiples 1 y 2.

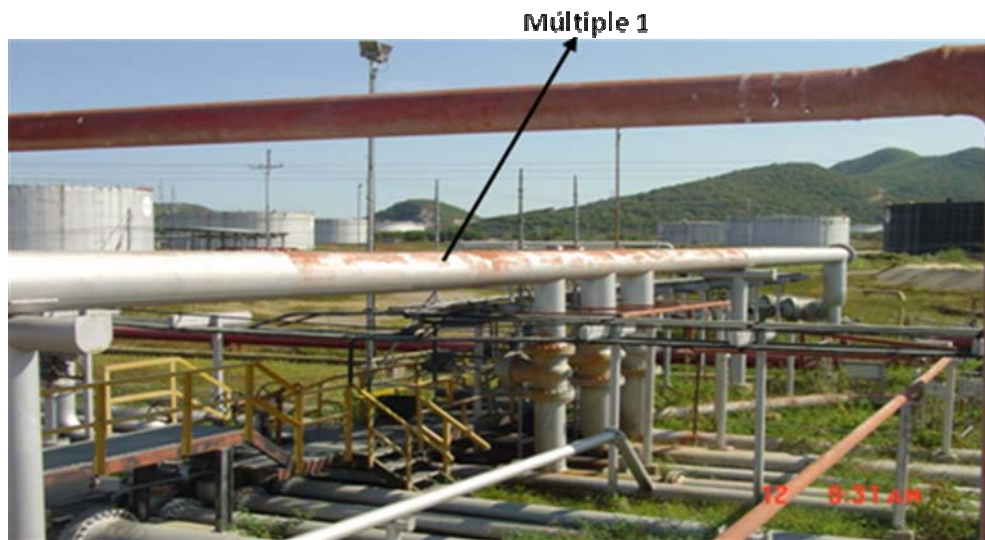
#### **3.4.2.1 Múltiple 1**

Como su nombre lo indica, es el primer punto del recorrido de las troncales dentro del patio Refinería. Está situado entre el tanque 97x8 (el número 97 significa la cantidad de Miles de barriles que puede almacenar el tanque, es decir 97000 y el número 8 la cantidad de tanques que se encuentran en el patio de almacenamiento ubicado en la Refinería Puerto la Cruz) y la bombas de transferencia. Desde este múltiple se distribuyen las líneas de recibo de crudo de 0,36 m (14 pulg) de diámetro hacia los tanques 97x15 al 97x20 (Batería 5 y 6). Este múltiple también recibe de los crudos de las diferentes troncales a través de las líneas de succión de 0,51 m (20 pulg) de diámetro.

En este múltiple se encuentra ubicado el mezclador L-003, el cual realiza una operación de mezcla de crudo, en donde se interconectan dos corrientes de crudo (A-B) que se combinan según los requerimientos de la mezcla.

El Múltiple 1(Ver Fig. 3.2) se encuentra equipado con instalaciones y conexiones que facilitan el "rescate" de las herramientas electromagnéticas o de limpieza utilizadas para inspeccionar las troncales.





**Figura 3.2.** Múltiple 1 ubicado en el patio de almacenamiento en la Refinería Puerto la Cruz.

#### 3.4.2.2 Múltiple 2

Se encuentra ubicado entre los tanques 97x8 y 97x2. Distribuye el crudo desde el tanque 97x8 hasta el tanque 97x14 (baterías 3 y 4). Posee una conexión exclusiva (succión) para la recepción directa de la troncal 51 por una tubería de 0,51 m (20 pulg) de diámetro a los tanques 97x8 al 97x10 (batería 3). Actualmente, la troncal 52 llega hasta este múltiple. Desde el Múltiple 2 se envía el crudo al patio de tanques El Chaure por una línea de 0,30 m (12 pulg) y otra de 0,41 m (16 pulg) de diámetro.

En este Múltiple cada troncal posee tres o cuatro válvulas de alivio de presión asociadas a los tanques 97x1 y 97x2. Entre las válvulas de alivio de presión (Ver Fig. 3.3) y el primer cabezal están ubicados los bypass y las válvulas de control que son manipulados por los operadores de acuerdo a los requerimientos del mezclador para obtener diferentes segregaciones de crudos.



**Figura 3.3.** Sistema de Alivio ubicado en el Múltiple 2.

Se utilizaron planos representativos del sistema y datos correspondientes de cada troncal suministrados por el personal de Servicios Técnicos de la Refinería Puerto La Cruz. No obstante, las visitas de campo permitieron verificar la información (por ejemplo la longitud) y cuantificar las válvulas y accesorios que conforman cada Troncal, siempre y cuando los mismos se encuentren en la dirección del flujo. Las longitudes de las tuberías entre los Múltiples 1 y 2 se pueden observar en la Tabla E.1 (Apéndice E).

Para llevar un registro de las características más relevantes del sistema, se utilizó la siguiente modalidad de especificación para cada Troncal:

- Servicio
- Diámetro nominal de la tubería en pulgadas.
- Costura: SMLS (tubería sin costura), Welded (tubería con costura).
- Schedule (SCH) de la tubería.
- Material de la tubería.
- Longitud de la tubería en el tramo de estudio.

- Rating de accesorios.
- Esfuerzo máximo permisible de la tubería.

Detalles constructivos de las Troncales ubicadas en los Múltiples 1 y 2:

- Tubería. Está construida de acero al carbono, fabricada por medio de soldadura de arco eléctrico con cordón longitudinal. Los mismos se encuentran protegidos externamente con alquitrán de hulla y reparaciones con brea epóxica entre el Múltiple 4 y el Múltiple Principal de Carga. Las tuberías son de peso STD (estándar).
- Diámetros. Se tomaron los diámetros internos de las Troncales, los cuales dependen del tipo de “Schedule” y diámetro nominal de la tubería. Las troncales 51 y 54x26 son de 30 pulg (0,762 m) y 26 pulg (0,66 m) de diámetro nominal respectivamente, en el tramo entre el Múltiples 1 y 2. Las Troncales restantes son de 16 pulg (0,406 m) de diámetro nominal en todo el trayecto del estudio.
- Espesor del tubo. Al igual que los diámetros internos, dependen del diámetro nominal y el tipo de Schedule. El valor para todos los casos fue de 0,375 pulg (0,0095 m) de espesor (ver Tabla D.4 Apéndice D).
- Material. Las Troncales consideradas en este estudio fueron de Acero al Carbono A53 Grado B.

En las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4 se observan algunas de las características de las tuberías ubicadas en los Múltiples 1 y 2.

**Tabla 3.2.** Características de las Troncales [4]

<b>Servicio</b>	Crudo
<b>Material</b>	ASTM A-53 Grado B
<b>Clase (Norma PDVSA H-221)</b>	AA1
<b>Esfuerzo Permisible "S" (ASME/ANSI 31,1)</b>	20000 psig
<b>Costura</b>	Welded
<b>Bridas y Accesorios Bridados (Ratings-ANSI B.16.5)</b>	150 (-20 a 122 °F)

Ta  
bla  
3.3.  
Car

acterísticas de diseño de las Troncales ubicadas en el Múltiples 1.

TRONCAL	DIÁMETRO EXTERNO (pulg)	ESPEJOR (pulg)	DIÁMETRO INTERNO (pulg)	ESTADO (VÁLVULAS)
51 (Roja)	30	0,375	29,259	DETERIORADA
52 (Azul)	16	0,375	15,250	DETERIORADA
53 (Verde)	16	0,375	15,250	DETERIORADA
54x26 (Morada)	26	0,375	25,250	DETERIORADA
54x2x16 (Blanca)	16	0,375	15,250	DETERIORADA
54x2x16 (Marrón)	16	0,375	15,250	DETERIORADA

**Tabla 3.4.** Características de diseño de las Troncales ubicadas en el Múltiple 2.

TRONCAL	DIÁMETRO EXTERNO (pulg)	ESPESOR (pulg)	DIÁMETRO INTERNO (pulg)	ESTADO (VÁLVULAS)
51 (Roja)	24	0,375	23,250	DETERIORADA
52 (Azul)	16	0,375	15,250	DETERIORADA
53 (Verde)	16	0,375	15,250	DETERIORADA
54x26 (Morada)	24	0,375	23,250	DETERIORADA
54x2x16 (Blanca)	16	0,375	15,250	DETERIORADA
54x2x16 (Marrón)	16	0,375	15,250	DETERIORADA

### 3.5 ESTUDIO DE LAS CONTINGENCIAS QUE GENERAN SOBREPRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 Y 2

El estudio de las contingencias que generan sobrepresión fue la base para el dimensionamiento de las válvulas de alivio de presión, para ello se requirió de un análisis de las diferentes contingencias que generaron mayor sobrepresión en cada troncal entre los Múltiples 1 y 2, fundamentados en la historia del sistema y en los criterios establecidos por las normas, de acuerdo al manejo de crudo.

Las contingencias de sobrepresión se determinaron de acuerdo a los criterios establecidos por las normas API 521, aplicadas a las Troncales de crudo que conforman el sistema. En búsqueda de mayor información fue necesaria la recopilación de:

- Diagramas de flujo de proceso, diagramas de tuberías e instrumentación (DTI).

- Presión y temperatura, a las condiciones de operación y de diseño en todas las Troncales que conforman el sistema de alivio.

Basados en los criterios establecidos por las normas API 521, y con ayuda de los DTI, se desarrolló una lista de contingencias (Expansión Térmica y Golpe de Ariete) que causaron sobrepresión en el sistema de alivio ubicado en los Múltiples 1 y 2, como se muestra en la Tabla 3.5:

**Tabla 3.5.** Contingencias que generan sobrepresión en los Múltiples 1 y 2.

MÚLTIPLE	LÍNEA	CONTINGENCIAS
<b>Múltiple 1</b>	Entrada (A) del Mezclador	Expansión Térmica
	Entrada (B) del Mezclador	Expansión Térmica
<b>Múltiple 2</b>	Troncal 51 (Roja)	Expansión Térmica
		Golpe de Ariete
	Troncal 52 (Azul)	Expansión Térmica
		Golpe de Ariete
	Troncal 53 (Verde)	Expansión Térmica
		Golpe de Ariete
	Troncal 54x26 (Morado)	Expansión Térmica
		Golpe de Ariete
Troncal 54x2x16 (Marrón)	Expansión Térmica	
	Golpe de Ariete	
Troncal 54x2x16 (Blanca)	Expansión Térmica	
	Golpe de Ariete	

La contingencia por Expansión Térmica se debe al calentamiento de las tuberías de recibo/succión por medio de los rayos solares. Este fenómeno se explica

de la siguiente manera: al calentarse las tuberías, el líquido que se encuentre entrampado cambia de estado (se dilata), generando así una sobrepresión en la línea.

La contingencia por Golpe de Ariete, se debe al cierre u obstrucción del paso del fluido en una tubería o línea de flujo, creando así una sobrepresión en la tubería, con la aparición de una onda la cual hace que se produzca un aumento significativo de la presión que puede provocar una falla o en su caso, el quiebre de una sección parcial o completa de la tubería por donde circula el crudo.

Para conocer las necesidades de alivio de presión del sistema se llevó a cabo un levantamiento en campo a fin de examinar el estado físico de las válvulas de alivio, verificando que estuvieran en sitio, y tomando directamente de campo aquellos datos que no se encontraron disponibles en los archivos de despacho de petróleo e ingeniería de proceso. En la Tabla 3.6 se muestra el número de válvulas de alivio que existen en los Múltiples 1 y 2.

**Tabla 3.6.** Número de válvulas de alivios que se encuentran ubicadas en los Múltiples 1 y 2

MÚLTIPLE	LÍNEA	Nº VÁLVULAS
<b>Múltiple 1</b>	Entrada (A) del Mezclador	1
	Entrada (B) del Mezclador	1
<b>Múltiple 2</b>	Troncal 51 (Roja)	4
	Troncal 52 (Azul)	1
	Troncal 53 (Verde)	2
	Troncal 54x26 (Morado)	3
	Troncal 54x2x16 (Blanca)	3

	Troncal 54x2x16 (Marrón)	2
--	-----------------------------	---

### **3.6 DETERMINACIÓN DE LAS CARGAS DE ALIVIO SEGÚN LO ESTABLECIDO EN LAS NORMAS API 520 Y 521**

Para la determinación de las cargas de alivio o caudales a desalojar por las válvulas de alivio en las diferentes Troncales, se estudiaron las contingencias determinadas con el procedimiento de la Secc. 3.5. Con la ayuda de un simulador se determinaron las propiedades termodinámicas del fluido a las condiciones de operación. La elaboración de una hoja de cálculo en Microsoft Excel, permitió determinar los factores que intervienen en el cálculo de la carga de alivio para las diferentes contingencias evaluadas en las líneas que conforman el sistema de alivio.

El flujo volumétrico que se utilizó para analizar las contingencias, fue la mayor tasa de bombeo registrada en los últimos dos años de recibo de crudo para la Refinería Puerto La Cruz. Las condiciones operacionales “máximas” parten del criterio que proporcionan una mayor velocidad de flujo y por ende un aumento en la caída de presión de las tuberías evaluadas (Escenario más crítico). La tasa de bombeo en los últimos dos años con destino a la Refinería Puerto La Cruz se determinó a partir de los reportes operacionales ejecutados por el programa CENTINELA OLEO y se observan, de manera resumida en la Tabla 3.7.



**Tabla 3.7.** Recibo de crudo en los últimos años [23].

TRONCAL	FECHA	RECIBO (BPH)
51 (Roja)	01/03/2008	16.000
52 (Azul)	27/05/2008	2200
53 (Verde)	17/02/2007	3200
54x26 (Morado)	9/03/2008	20000
54x2x16 (Marrón)	16/05/2008	12000

Las presiones suministradas, fueron las máximas presiones a la entrada de las Troncales en la Refinería que han sido registradas en el Múltiple 1. Estas máximas presiones, registradas a la entrada de las troncales se muestran en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8.** Máximas Presiones en la entrada de las troncales ubicadas en el Múltiple 1 [23].

TRONCAL	PRESIÓN DE OPERACIÓN	
	kPa <sub>m</sub>	psig
51 (Roja)	1075,59	156
52 (Azul)	110,32	16
53 (Verde)	482,63	70
54x26 (Morado)	758,43	110
54x2x16 (Marrón)	620,53	90
54x2x16 (Blanca)	620,53	90

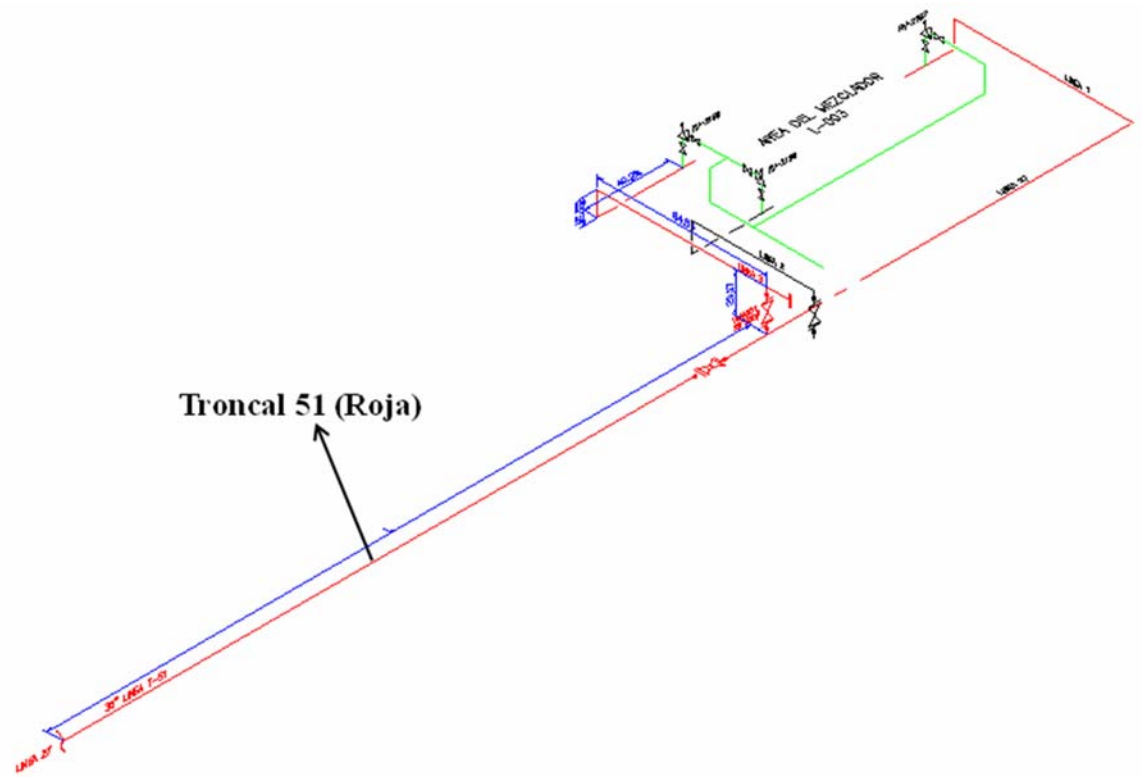
### **3.6.1 Evaluación de las Troncales**

Entre las posibles contingencias causantes de sobrepresión se encuentran: (Expansión Térmica y Golpe de Ariete).

#### **3.6.1.1 Expansión Térmica**

Para evaluar este escenario lo primero que se realizó fue verificar que el fluido dentro de la tubería se encuentre retenido entre dos válvulas por un período mayor a 10 hrs, mediante entrevistas a los operadores de la Refinería Puerto la Cruz. Esta verificación se examina en campo y con ayuda de los DTI (Diagrama de Tubería e Instrumentación), comprobando que existan válvulas de compuerta que estén relacionadas con el sistema de alivio, es decir; una aguas abajo del sistema y otra aguas arriba del sistema.

La capacidad de alivio para esta contingencia se obtuvo mediante la Ec. (2.13), donde primero fue necesario conocer el calor transferido al crudo ( $H$ ), el coeficiente de expansión térmica ( $\beta$ ). A continuación, se muestran los cálculos de estos parámetros para el caso de la Troncal 51, la cual maneja crudo Merey. En la Fig. 3.4 se muestra el tramo de la troncal 51 (Roja) ubicada en el Múltiple 1.



**Figura 3.4.** Troncal 51 ubicada en el Múltiple 1.

### 3.6.1.1.1 El calor transferido al crudo (H)

El calor transferido al crudo se calculó con la Ec. (2.15), pero antes se necesitó determinar la superficie bajo radiación térmica (S) y la densidad de radiación ( $\alpha$ ). La superficie bajo radiación térmica (S), se determinó mediante la Ec. (2.16).

$$S = \pi r L \quad (2.16)$$

Datos:

$$r = 1,22 \text{ pie}$$

$$L = 160,216 \text{ pie}$$

$$S = \pi \cdot 1,22 \text{ pie} \cdot 160,216 \text{ pie}$$

$$S = 614,07 \text{ pie}^2$$

La densidad de radiación térmica depende de la zona en la que se encuentra el área sometida a estudio. Para el estado Anzoátegui la densidad de radiación térmica es igual a 330 Btu/h.pie<sup>2</sup> [6]. El calor transferido (H), viene dado por.

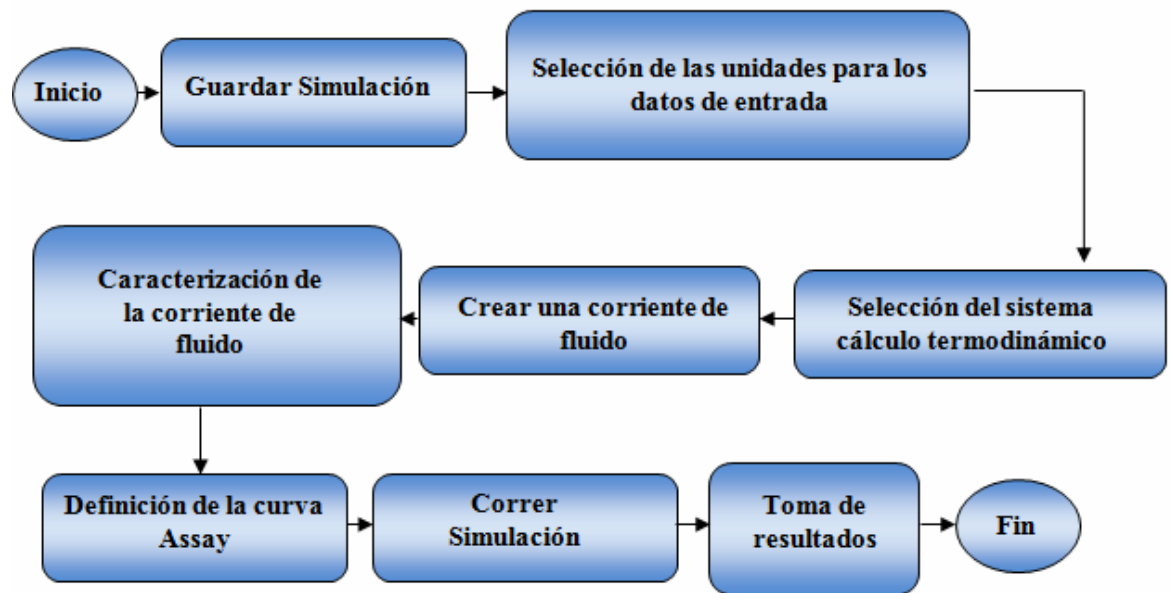
$$H = \alpha \cdot S \tag{2.15}$$

$$H = \left( 330 \text{ Btu/h.pie}^2 \right) \cdot 614,07 \text{ pie}^2$$

$$H = 202643,1 \text{ Btu/h}$$

### 3.6.1.1.2 Coeficiente de Expansión Térmica ( $\beta$ )

Para la determinación del coeficiente de expansión térmica ( $\beta$ ), fue necesario usar el simulador Pro II versión 8.1 para determinar la densidad del crudo y la derivada de la densidad en función de la temperatura. El procedimiento para llevar a cabo la simulación en el PRO/II® se resume a continuación (Ver Fig. 3.5). En la Tabla 3.9, se muestran los valores de las densidades para cada valor de temperatura.



**Figura 3.5.** Procedimiento para realizar la simulación en el programa PRO/II®

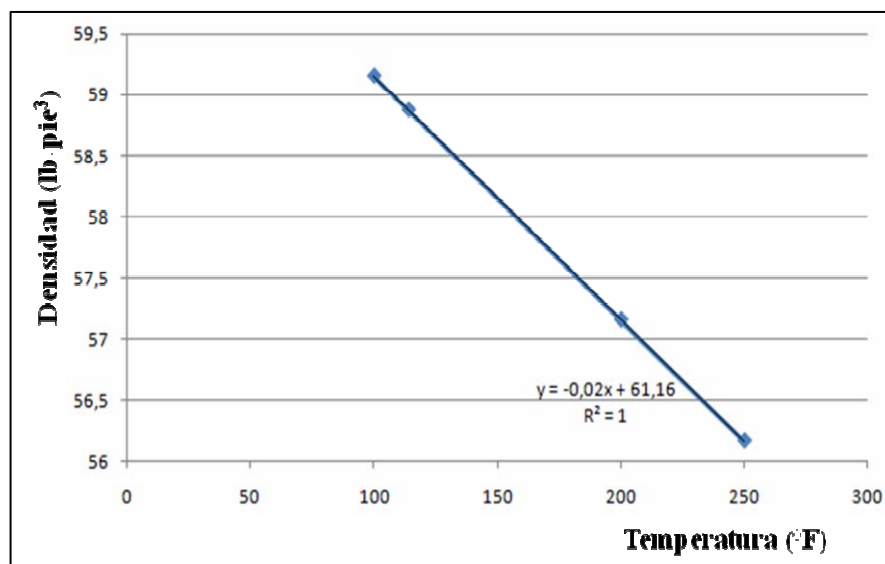
Para una descripción más detallada de cómo se realizó la simulación con el programa PRO/II® ver el Apéndice A.

**Tabla 3.9.** Valores de densidad para distintos valores de temperatura

CRUDOS	TEMPERATURA		DENSIDAD	
	(°F)	(°C)	(LB/PIE <sup>3</sup> )	(kg/m <sup>3</sup> )
Anaco Wax	100	37,77	50,097	802,47
	114	45,55	49,707	796,23
	200	93,33	47,183	755,80
	250	121,11	45,571	729,97
Mesa 30	100	37,77	53,809	861,93
	114	45,55	53,468	856,47
	200	93,33	51,344	822,45
	250	121,11	50,054	801,78
Merey	100	37,77	59,165	947,73
	114	45,55	58,879	943,15
	200	93,33	57,156	915,55
	250	121,11	56,167	899,71
Santa Bárbara	100	37,77	50,650	811,34

	114	45,55	50,277	805,36
	200	93,33	47,883	767,01
	250	121,11	46,374	742,84

Mediante una hoja de cálculo de Microsoft Excel se realizó la gráfica de variación de la densidad con la temperatura para el crudo Merey (Ver Fig. 3.6). Las gráficas de la variación de la densidad en función de la temperatura para los crudos Anaco Wax, Mesa y Santa Bárbara se muestran en el Apéndice C.



**Figura 3.6.** Variación de la densidad con la temperatura para el crudo Merey

Del análisis de regresión lineal se obtuvo la ecuación del comportamiento de la densidad con la temperatura, y luego se derivó la ecuación y se obtuvo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = -0,02 \frac{lb}{pie^3 \cdot ^\circ F}$$

El coeficiente de expansión térmica ( $\beta$ ) se determinó mediante la Ec. (2.14):

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$$

(2.14)

Donde:

$$\rho = 58,879 \text{ lb/pe}^3$$

$$\beta = -\frac{1}{58,879\left(\frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3}\right)} \cdot (-0,02\left(\frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3 \cdot ^\circ\text{F}}\right))$$

$$\beta = 0,000339 \frac{1}{^\circ\text{F}}$$

### 3.6.1.1.3 Caudal de alivio (Q)

Para el cálculo del caudal de alivio (Q), fue necesario determinar el calor específico del crudo (Cp), el cual se obtuvo mediante el simulador Pro II versión 8.1.

El caudal de alivio se determinó mediante la Ec. (2.13):

$$Q = \frac{\beta \cdot H}{500 \cdot SG \cdot Cp} \quad (2.13)$$

Donde:

$$SG = 0,9593$$

$$H = 202643,1 \text{ Btu/h}$$

$$Cp = 0,468 \text{ Btu/Lb} \cdot ^\circ\text{F}$$

$$\beta = 0,000339 \text{ 1/}^\circ\text{F}$$

$$Q = \frac{0,000339\left(\frac{1}{^\circ\text{F}}\right) \cdot 202643,1\left(\frac{\text{Btu}}{\text{h}}\right)}{500 \cdot 0,9593 \cdot 0,468\left(\frac{\text{Btu}}{\text{Lb} \cdot ^\circ\text{F}}\right)}$$



$$Q = 0,311 \text{ gpm } (1,98 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s})$$

### 3.6.1.2 Golpe de Ariete

Para evaluar el escenario de golpe de ariete, lo primero que se hizo fue verificar la existencia de válvulas de compuerta que estén relacionadas con el sistema de alivio, ya que puede producirse un cierre total instantáneo o un cierre lento total de la válvula, lo cual provoca una sobrepresión en la tubería, por lo que es necesario desalojar un caudal para un buen funcionamiento del sistema.

Para determinar la capacidad de alivio se utilizó la Ec. (2.2), en donde influye la presión producida por el golpe de ariete y la presión de apertura de la válvula de alivio (la presión de alivio a la cual está sometida la tubería).

Para el cálculo de la presión por golpe de ariete, se determinó la sobrepresión producida en la Troncal 51 (Roja) crudo Merey. Esta sobrepresión se calculó para un cierre total instantáneo y un cierre total lento de la válvula de compuerta, ya que fue suministrado el tiempo de cierre de la válvula de compuerta, debido a que está accionada por un actuador eléctrico, que es manipulado por el personal encargado de la consola en la superintendencia de movimientos de crudos. Se tomó la longitud desde la válvula de cierre en la tubería hasta la válvula de alivio.



### 3.6.1.2.1 Cierre Instantáneo y Total de la Válvula

En la determinación de la sobrepresión que ocurre en la Troncal 51 (Roja), intervienen diferentes parámetros como: densidad del fluido ( $\rho$ ), velocidad del fluido ( $V$ ) y velocidad de onda del fluido ( $a$ ).

La velocidad del fluido se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$Q = V \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \quad (3.1)$$

Donde:

Q = Caudal del fluido, = 0,706 m<sup>3</sup>/s (24,95 pie<sup>3</sup>/s)

D = Diámetro de la tubería, = 0,59 m (1,937 pie)

V = Velocidad del fluido m/s (pie/s)

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{24,95 \frac{\text{pie}^3}{\text{s}}}{\frac{\pi}{4} \cdot (1,937 \text{ pie})^2}$$

$$V = 8,47 \text{ pie/s} \quad (2,58 \text{ m/s})$$

La velocidad de onda se calculó mediante la Ec. (2.25).

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{K}{E} \cdot \frac{D}{\delta}}} \quad (2.25)$$

Donde:

$$\delta = 0,0095\text{m} \quad (0,375\text{pulg})$$

$$E = 205939649,99 \text{ kPa} \quad (29868921,80 \text{ psi})$$

$$\rho = 958,39 \text{ kg/m}^3 \quad (59,83 \text{ lb/pie}^3)$$

El módulo de elasticidad del crudo (K), depende de la temperatura de operación y gravedad API, y viene dado por la Ec. (3.2) [24].

$$K = 10^{5,722708 - 0,00819 \cdot \text{API} - 0,00219 \cdot T} \quad (3.2)$$

Datos:

$$T = 114^\circ\text{F}$$

$$\text{API} = 16^\circ$$

$$K = 10^{5,722708 - 0,00819 \cdot 16 - 0,00219 \cdot 114}$$

$$K = 219790,04 \text{ psi} \quad (1,52 \times 10^9 \text{ Pa})$$

Después de haber calculado el módulo de elasticidad del fluido, se procede a determinar la velocidad de propagación de onda:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{1,52 \times 10^9 \text{ Pa}}{958,39 \text{ kg/m}^3}}{1 + \frac{1,52 \times 10^9 \text{ Pa}}{205939650,99 \text{ kPa}} \cdot \frac{0,59 \text{ m}}{0,0095 \text{ m}}}}$$

$$a = 1043,26 \text{ m/s} \quad (3422,77 \text{ pie/s})$$

Por lo tanto, la sobrepresión para un cierre total instantáneo de la válvula viene dada por la Ec. (2.23)

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot V \quad (2.23)$$

$$\Delta p = 958,39 \text{ kg/m}^3 \cdot 1043,26 \text{ m/s} \cdot 2,58 \text{ m/s}$$

$$\Delta p = 2579,62 \text{ kPa} \quad (374,14 \text{ psi})$$

La presión por golpe de ariete se determinó por la Ec. (3.3).

$$P_{\text{golpe}} = P_{\text{línea}} + \Delta p \quad (3.3)$$

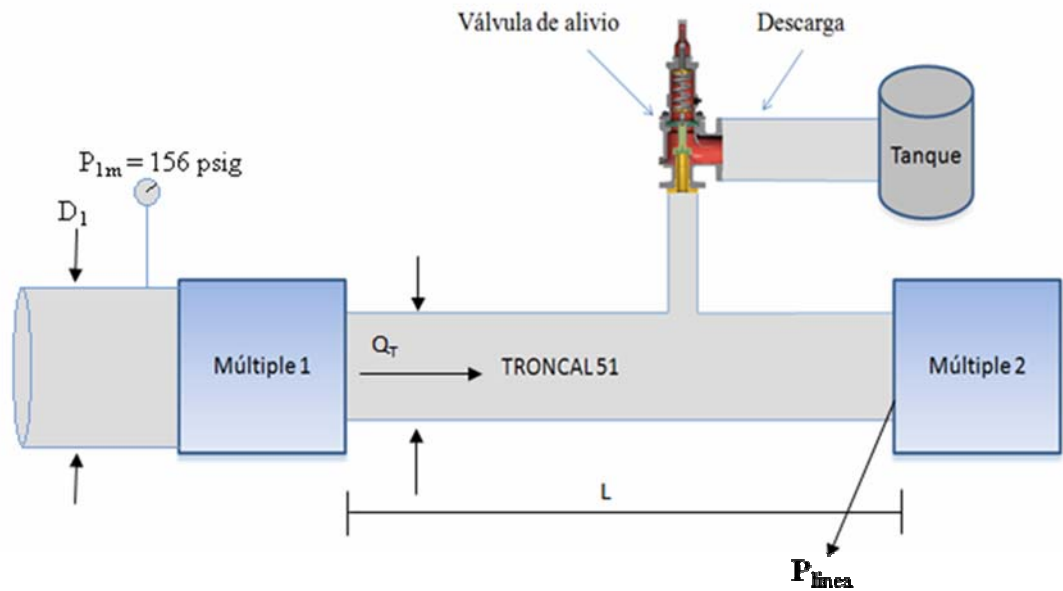
Donde:

$\Delta p$  = Sobrepresión generada por el cierre de la válvula, Pa (psi)

$P_{\text{golpe}}$  = Presión producida por el golpe de ariete, Pa (psi)

$P_{\text{línea}}$  = Presión que se generada en la línea, Pa (psi)

La presión de la línea ( $P_{\text{línea}}$ ) se determinó mediante la Ec. (2.2), aplicada en la Troncal 51 (Roja) entre los puntos de presión como se muestra en la Fig. 3.7:



**Figura 3.7.** Troncal 51 (Roja) comprendida entre el Múltiple 1 y 2.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_{línea}}{\gamma} + \frac{V_{línea}^2}{2g} + Z_{línea} + H_F \quad (2.2)$$

Donde:

$$P_{1m} = 156 \text{ psig} + 14,7 \text{ psi} = 170,7 \text{ psi} \text{ (1176,58 kPa)}$$

$$V_1 = 1,65 \text{ m/s} \text{ (5,41 pie/s)}$$

$$D_1 = 0,743 \text{ m} \text{ (2,438 pie)}$$

$$\gamma = 9401,80 \text{ N/m}^3$$

$$Z_1 = 0 \text{ m}$$

$$V_{línea} = 2,58 \text{ m/s} \text{ (8,45 pie/s)}$$

$$D_{línea} = 0,59 \text{ m} \text{ (1,937 pie)}$$

$$Z_{línea} = 2 \text{ m}$$

$H_F$  = Pérdidas Totales en la Tubería

$$\frac{170,7 \text{ psig} \cdot \frac{6894,75 \text{ Pa}}{1 \text{ psig}}}{9401,80 \frac{\text{Nw}}{\text{m}^3}} + \frac{(1,65 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2,9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + Z_1 = \frac{P_{\text{linea}}}{\gamma} + \frac{(2,58 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2,9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 2 \text{ m} +$$

$$\left( f_1 * \frac{37 \text{ m}}{0,74 \text{ m}} \cdot \frac{(1,65 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2,9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) + \left( f_2 * \frac{75,9 \text{ m}}{0,59 \text{ m}} \cdot \frac{(2,58 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2,9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) + \left( \sum K * \frac{(2,58 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2,9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right)$$

$$125,18 \text{ m} + 0,13 \text{ m} = \frac{P_{\text{linea}}}{\gamma} + 0,33 \text{ m} + 2 \text{ m} + (f_1 \cdot 6,87 \text{ m}) + (f_2 \cdot 43,61 \text{ m}) + (\sum ((0,75,3) + 2 + 0,25) \cdot 0,33 \text{ m})$$

$$125,31 \text{ m} - 2,33 \text{ m} - (f_1 \cdot 6,87 \text{ m}) - (f_2 \cdot 43,61 \text{ m}) - 1,52 \text{ m} = \frac{P_{\text{linea}}}{\gamma}$$

El factor de fricción de Moody, se determinó mediante la Ec. (2.4), pero primero se debió conocer si el flujo presentaba condiciones de flujo turbulento o flujo laminar; esta condición se conoce con la determinación del número de Reynolds, por la Ec. (2.7).

$$\text{Re} = \frac{D \cdot V}{\nu} \quad (2.7)$$

Donde:

$$D = 0,59 \text{ m (23,25 pulg)}$$

$$V = 2,58 \text{ m/s (8,45 pie/s)}$$

$$\nu = 4,618 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Re} = \frac{2,58 \text{ m/s} \cdot 0,59 \text{ m}}{4,618 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$\text{Re} = 3296,2$$

Como el número de Reynolds es mayor a 2000, se deduce que el flujo está en la región de transición. Para tuberías de acero comercial de rugosidad relativa “ $\epsilon$ ” es igual a 0,00015 pie (ver tabla E.2 en el Apéndice E). Debido al tipo de flujo, el factor de fricción viene dado por la ecuación de Colebrook Ec. (2.6),

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[ -2 \log \left[ 12 \cdot \left( \frac{0,00015}{\frac{23,250}{3,7}} \right) + \left( \frac{2,51}{3296,2 \cdot \sqrt{f}} \right) \right] \right]$$

$$f = 0,0423$$

Debido al cambio de diámetros que presenta la línea en estudio, se calculó otro factor de fricción, de la misma forma expuesta en este capítulo ( $f = 0,0454$ ), todo esto para realizar el cálculo de la presión en la Troncal 51 (Roja).

$$125,31 m - 2,33 m - (0,0454 \cdot 6,87 m) - (0,0423 \cdot 43,61 m) - 1,52 m = \frac{P_{linea}}{\gamma}$$

$$125,31 m - 6,02 m = \frac{P_2}{\gamma} \rightarrow 119,29 m = \frac{P_{linea}}{9401,80 \frac{N}{m^3}}$$

$$P_{linea} = 1121,54 \text{ kPa} (162,66 \text{ psi})$$

Por lo tanto la presión producida por el golpe de ariete es igual:

$$P_{\text{golpe}} = 3701,32 \text{ kPa} (536,83 \text{ psi})$$

Una vez calculada la presión por golpe de ariete producida en la Troncal 51, se procedió a estimar la presión de alivio, (presión a la cual se produce la apertura de la válvula para el paso del flujo de alivio). Esta presión está asociada con la presión de trabajo máxima permisible de la tubería (PTMP).

La presión de trabajo máxima permisible o presión de ajuste, se realizó comparando las normas asociadas al diseño de tubería (ASME/ANSI B31.3 y B16.5), seleccionando el menor valor de presión entre éstos estándares. Para una tubería de diámetro externo de 24 pulg (correspondiente a la Troncal 51 (Roja) entre el Múltiple 1 y el Múltiple 2) de acero comercial se realizaron las siguientes consideraciones:

- S = Esfuerzo máximo permisible igual a 20000 psi ( 127895, 60 kPa)  
Acero A53 Gr.B
- Y = Coeficiente dependiente del Material igual a 0,4.
- $\delta$  = Espesor mínimo excluyendo tolerancias por corrosión y erosión, y tolerancias por fabricación igual a 0,256 pulg.
- E = Factor de eficiencia de la unión soldada: 0,85 para tubos con costura longitudinal y soldadura por arco eléctrico.

Primeramente se comprobó que  $\delta < D/6$  (ver la Secc. 2.10.1):

$$0,256 \text{ pulg} < 24/6 \text{ pulg}$$

La PTMP se determinó mediante la Ec. (2.9).

$$PTMP = \frac{2.t.S.E}{D - 2.\delta.Y} \quad (2.9)$$

Donde:

$$\delta = 0,256 \text{ pulg}$$

$$S = 20000 \text{ psi (127895, 60 kPa)}$$

$$E = 0,85$$

$$D = 24 \text{ pulg (0,609 m)}$$

$$Y = 0,4$$

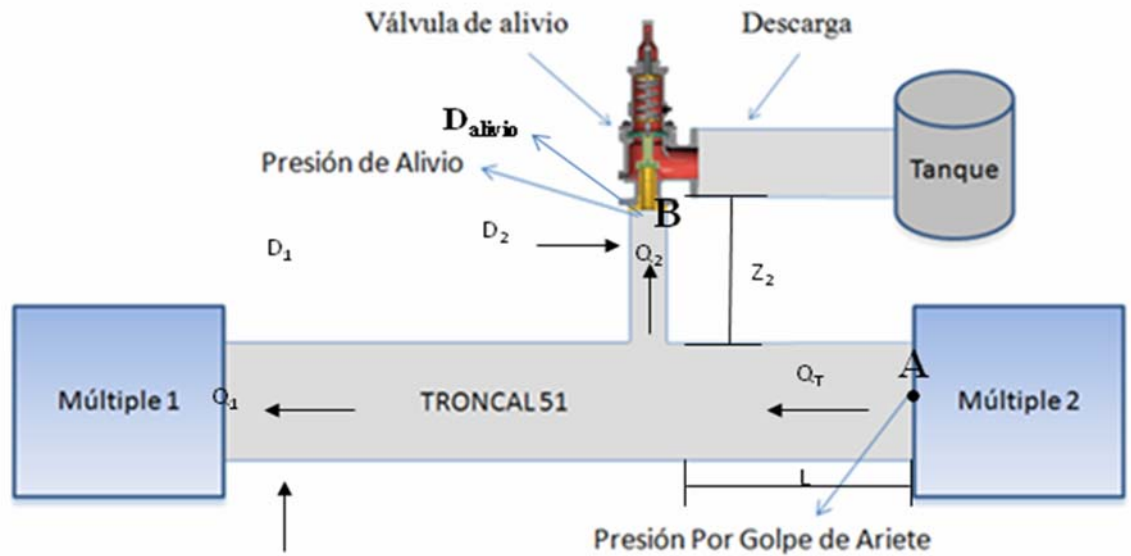
$$PTMP = \frac{2.0,256 \text{ pulg} . 20000 . 0,85}{24 \text{ pulg} - 2.0,256 \text{ pulg} . 0,4}$$

$$PTMP = 365,78 \text{ psi (2521,97 kPa)}$$

De acuerdo a la Norma B16.5 del código ASME/ANSI la PTMP es 284 psig (1958,11 kPa<sub>m</sub>) para una temperatura de 114 °F y accesorios de clase 150 (ver Apéndice E, Tabla E.6), por lo tanto la PTMP utilizada fue 298,7 psia (2059,47 kPa<sub>a</sub>).

El caudal de alivio se determinó aplicando el Teorema de Bernoulli (Ec. (2.2)), entre los puntos **A** y **B** (Múltiple 2 y Válvula de alivio) (Ver Fig. 3.8):





**Figura 3.8.** Troncal 51 (Roja), con los puntos de presión para la determinación del flujo de alivio.

$$\frac{P_{golpe}}{\gamma} + \frac{V_{golpe}^2}{2g} + Z_{golpe} = \frac{P_{alivio}}{\gamma} + \frac{V_{alivio}^2}{2g} + Z_{alivio} + \left( f \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \right) + \left( \sum K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \right)$$

Donde:

$$P_{golpe} = 536,86 \text{ psi}$$

$$V_{golpe} = 2,58 \text{ m/s}$$

$$Z_{golpe} = 0 \text{ m}$$

$$P_{alivio} = 284 \text{ psig} + 14,7 \text{ psi} = 298,7 \text{ psi}$$

$$Q_T = 0,706 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_1 = 0,59 \text{ m (23, 250 pulg)}$$

$$D_2 = 0,15 \text{ m (6 pulg)}$$

$$D_{alivio} = 0,101 \text{ m (4 pulg)}$$

$$\frac{536,86 \text{ psi} \cdot \frac{6894,75 \text{ Pa}}{1 \text{ psi}}}{9401,80 \text{ N/m}^3} + \frac{(2,58 \text{ m/s})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} + 0 = \frac{298,7 \text{ psi} \cdot \frac{6894,75 \text{ Pa}}{1 \text{ psi}}}{9401,80 \text{ N/m}^3} + \frac{(Q_{alivio})^2}{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot A_{alivio}^2} + 1 \text{ m} +$$

$$\left( f_1 \cdot \frac{17m}{0,59m} \cdot \frac{(2,58m/s)^2}{2,981m/s^2} \right) + \left( f_2 \cdot \frac{1m}{0,15m} \cdot \frac{(Q_{alivio})^2}{2,981m/s^2 \cdot A_{alivio}^2} \right) + \left( \sum K \cdot \frac{Q_{alivio}^2}{2,981m/s^2 \cdot A_{alivio}^2} \right)$$

$$393,702 m + 0,33 m = 219,05 m + \frac{(Q_{alivio})^2}{2,981m/s^2 \cdot (8,01 \times 10^{-3} m^2)^2} + 1 m +$$

$$\left( 0,0423 \cdot \frac{17m}{0,59m} \cdot \frac{(2,58m/s)^2}{2,981m/s^2} \right) + \left( f_2 \cdot \frac{1m}{0,15m} \cdot \frac{(Q_{alivio})^2}{2,981m/s^2 \cdot A_{alivio}^2} \right) + \left( \sum K \cdot \frac{Q_{alivio}^2}{2,981m/s^2 \cdot A_{alivio}^2} \right)$$

$$173,57 m = \frac{(Q_{alivio}^2)}{2,981m/s^2 \cdot 6,41 \times 10^{-5} m^4} + \left( f_2 \cdot \frac{1m}{0,15m} \cdot \frac{(Q_{alivio})^2}{2,981m/s^2 \cdot 3,31 \times 10^{-4} m^4} \right) + \left( 0,95 \cdot \frac{Q_{alivio}^2}{2,981m/s^2 \cdot 3,32 \times 10^{-4} m^4} \right)$$

$$173,57 m = 795,54 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2 + f_2 \cdot 1026,55 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2 + 145,51 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2$$

Debido a que se tienen dos (2) incógnitas, se procedió a suponer el factor de fricción ( $f_2 = 0,015$ ), entonces se tiene.

$$173,57 m = 795,54 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2 + 15,39 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2 + 145,51 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2$$

$$173,57 m = 956,44 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2$$

Por lo tanto el caudal de alivio estimado es igual:

$$Q_{alivio} = 0,426 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Después de tener el valor del caudal de alivio, se realizó el cálculo del nuevo factor de fricción ( $f_2'$ ).

Se determinó la velocidad de alivio del fluido ( $V_{alivio}$ ), el número de Reynolds (Re), y viene siendo igual a:

$$Q_2 = Q_{alivio} = V_{alivio} \cdot A_{alivio} \Rightarrow V_{alivio} = \frac{Q_{alivio}}{A_{alivio}} \Rightarrow V_{alivio} = \frac{0,426 \text{ m}^3 / \text{s}}{8,107 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 52,54 \text{ m} / \text{s}$$

$$\text{Re} = \frac{D \cdot V_{alivio}}{\nu} \Rightarrow \text{Re} = \frac{0,102 \text{ m} \cdot 52,54 \text{ m} / \text{s}}{4,618 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}} = 11604,76$$

Debido a que el número de Reynolds es mayor a 2000, se deduce que el flujo está en la región de turbulencia. El factor de fricción viene dado por la ecuación de Colebrook Ec.(2.6),

$$\frac{1}{\sqrt{f_2'}} = \left[ -2 \log \left[ 12 \cdot \left( \frac{0,00015}{3,7} \right) + \left( \frac{2,51}{11604,76 \cdot \sqrt{f_2'}} \right) \right] \right]$$

$$f_2' = 0,030$$

Con el nuevo factor de fricción se realizó el cálculo del caudal de alivio.

$$173,57 \text{ m} = 795,54 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2 + (0,029) \cdot 1026,55 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2 + 145,51 (s^2 / m^5) Q_{alivio}^2$$

$$173,57m = 795,54(s^2 / m^5) Q_{alivio}^2 + 30,38(s^2 / m^5) Q_{alivio}^2 + 145,51(s^2 / m^5) Q_{alivio}^2$$

$$173,57m = 971,43(s^2 / m^5) Q_{alivio}^2$$

Por lo tanto el caudal de alivio estimado tendrá un valor de:

$$Q_2 = Q_{alivio} = 0,423 m^3 / s$$

Una vez obtenido el caudal de alivio, se determinó nuevamente el factor de fricción ( $f_2''$ ) mediante el procedimiento antes descrito, viene siendo igual a:

$$f_2'' = 0,030$$

Debido a que el nuevo factor de fricción ( $f_2''$ ) obtuvo el mismo resultado al anterior factor de fricción ( $f_2'$ ), el caudal de alivio ( $Q_{alivio}$ ) estimado es.

$$Q_2 = 0,423 m^3 / s (6704,69 gpm)$$

### 3.6.1.2.2 Cierre Lento y Total de la Válvula

Debido a que por el fenómeno de cierre instantáneo y total de la válvula, la presión generada en la Troncal 51 (Roja) fue muy elevada en comparación con la presión de trabajo máxima permisible calculada (365,78 psi), se descartó este fenómeno y se realizó el estudio para un cierre lento total de la válvula.

En la evaluación del sistema de alivio para un cierre lento y total de la válvula de compuerta, se necesitó un tiempo de cierre, igual a 10 s, el cual fue proporcionado por los operadores en la empresa, debido a la experiencia al momento de manipular los actuadores eléctricos para la apertura y cierre de la válvula de cierre.

Para la determinación de la sobrepresión debido al cierre lento y total de la válvula se aplicó la Ec. 2.29.

$$\Delta p = K_e \cdot \frac{\rho \cdot L \cdot V}{t_{\text{cierre}}} \quad (2.29)$$

Donde:

$$K_e = 1,3$$

$$\rho = \text{Densidad del Crudo, } 958,39 \text{ kg/m}^3 \text{ (59,83 lb/pie}^3\text{)}$$

$$V = \text{Velocidad del crudo, } 2,58 \text{ m/s (8,47 pie/s)}$$

$$T_{\text{cierre}} = 10 \text{ s}$$

$$L = \text{Longitud desde la válvula de alivio hasta la válvula de cierre, } 17 \text{ m (669,29 pulg)}$$

$$\Delta p = 1,3 \cdot \frac{958,39 \text{ kg/m}^3 \cdot 2,58 \text{ m/s} \cdot 17 \text{ m}}{10 \text{ s}}$$

$$\Delta p = 5464,55 \text{ Pa (0,793 psi)}$$

Entonces la presión producida por el golpe de ariete es igual:

$$P_{\text{golpe}} = P_{\text{linea}} + \Delta p$$

Donde:

$$P_{\text{linea}} = 162,66 \text{ psia}$$

$$P_{\text{golpe}} = 1127,57 \text{ kPa (163,65 psia)}$$

Como la presión por golpe no es mayor a la presión de trabajo permisible (298,7 psia), el fenómeno de cierre lento y total de la válvula se estudió para un escenario crítico estableciendo un tiempo crítico como parámetro fundamental para el estudio.

El tiempo que tarda la onda en ir y venir desde la válvula de cierre hasta la válvula de alivio es llamado Tiempo Crítico ( $T_{\text{crítico}}$ ), y viene dado por la siguiente ecuación.

$$T_{\text{crítico}} = \frac{2.L}{a} \quad (3.4)$$

Donde:

$L$  = Longitud desde la válvula de alivio hasta la válvula de cierre, 17 m (669,29 pulg)

$a$  = Velocidad de la onda, 1043,26 m/s

$$T_{\text{crítico}} = \frac{2 \cdot 17 \text{ m}}{1043,26 \text{ m/s}} \Rightarrow T_{\text{crítico}} = 0,0325 \text{ s}$$

Antes de hacer el cálculo de la sobrepresión debido al cierre lento de la válvula, se debe corroborar que el tiempo de cierre sea mayor al tiempo crítico ( $T_{\text{crítico}}$ ), es decir:

$$t_c \gg T_{crítico}$$

Debido a que se cumple la condición de que el tiempo de cierre ( $t_c$ ) es mucho mayor al tiempo crítico ( $T_{crítico}$ ), se procedió a calcular la sobrepresión cuando ocurre el cierre lento y total de la válvula en la Troncal 51 (Roja) aplicando la Ec. (2.29):

$$\Delta p = K_e \cdot \frac{\rho \cdot L \cdot V}{T_{crítico}} \quad (2.29)$$

Donde:

$$K_e = 1,3.$$

$$\rho = \text{Densidad del Crudo, } 958,39 \text{ kg/m}^3 \text{ (59,83 lb/pie}^3\text{)}$$

$$V = \text{Velocidad del crudo, } 2,58 \text{ m/s (8,47 pie/s)}$$

$$\Delta p = 1,3 \cdot \frac{958,39 \text{ kg/m}^3 \cdot 17 \text{ m} \cdot 2,58 \text{ m/s}}{0,0325 \text{ s}} = 1681,399 \text{ kPa (243,86 psi)}$$

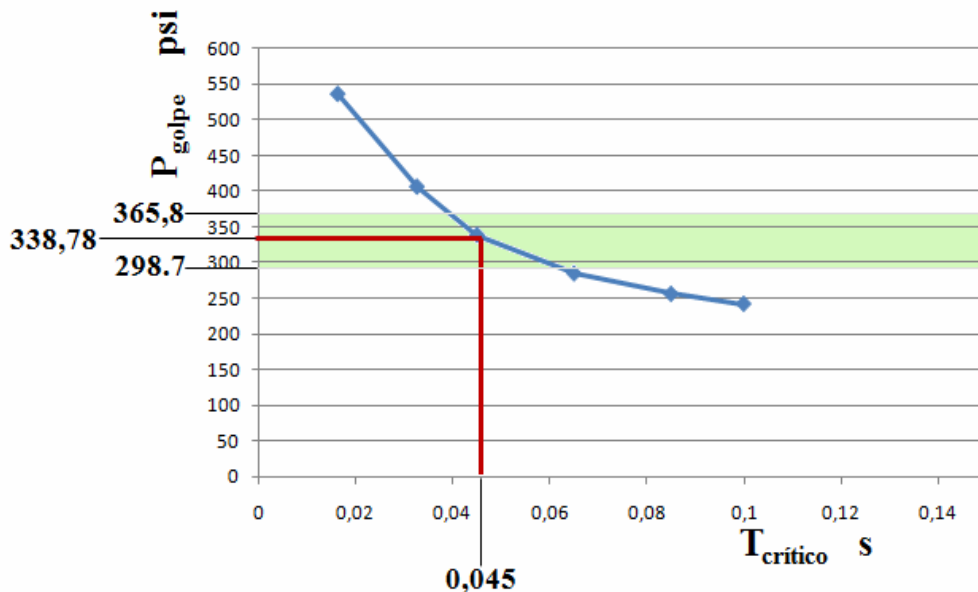
La presión por golpe de ariete viene dado por:

$$P_{golpe} = P_{línea} + \Delta p \quad (3.3)$$

$$P_{golpe} = 162,66 \text{ psi} + 243,86 \text{ psi} = 406,52 \text{ psi}$$

Una vez calculada la presión producida por el golpe de ariete ( $P_{golpe}$ ), se muestra que esta presión por golpe es mayor a la presión de trabajo máxima permisible calculada (PTMP) lo cual indica que la tubería no soporta esta presión y ocurrirá una falla (cederá), por ende se realizó una gráfica de la presión producida por el golpe de ariete y el tiempo crítico ( $T_{crítico}$ ) donde se seleccionó un tiempo el cual

este comprendido entre la presión de trabajo máxima permisible (365,8 psi) y la presión de alivio (298,4), (Ver Fig. 3.9).



**Figura 3.9.** Grafica de la presión producida por el golpe de ariete vs el tiempo crítico

Para un tiempo crítico ( $T_{\text{crítico}}$ ) de 0,045 s, la presión producida por el golpe de ariete ( $P_{\text{golpe}}$ ) es 338,78 psi.

Por lo tanto, el caudal de alivio estimado es:

$$Q = 0,172 \text{ m}^3 / \text{s} (2726,26 \text{ gpm})$$

De tal manera, se tomó el cálculo del flujo de alivio con el procedimiento de cierre lento y total de la válvula para la condición crítica, para la selección de la válvula de alivio a implantarse en la tubería. De igual manera, se realizó el procedimiento parecido para las Troncales 54x26 (Morado), 54x2x16 (Blanca) y 54x2x16 (Marrón).



### **3.7 CÁLCULO DE LAS CAIDAS DE PRESIÓN EN CADA TRONCAL, CON LA AYUDA DE UN SIMULADOR COMERCIAL**

Esta etapa cubre la simulación de las condiciones de operación de las troncales, mediante el uso del simulador Pipephase versión 9.1.

En esta etapa se hicieron las siguientes consideraciones:

- a) El petróleo se considera como una mezcla homogénea e incompresible.
- b) El petróleo es desgasificado y deshidratado en los Patios de Tanques de donde provienen (Patio de tanques Oficina, Anaco y Travieso) a menos del 1% de agua y sedimentos antes de ser bombeado a la Refinería Puerto La Cruz, por lo tanto los diferentes crudos manejados pueden tratarse como líquidos puros.
- c) La temperatura de operación de los troncales es de 45,55 °C (114 °F).
- d) La temperatura del ambiente es de 38 °C (100,40 °F).

#### **3.7.1 Datos de entrada en Pipephase Versión 9.1**

Para realizar la simulación fue necesario recopilar cierta información referente a las características del sistema de tuberías y las propiedades del crudo que circulaba por cada Troncal respectiva. Estos últimos se hallaron en las etapas anteriores. Esta información requerida fue la siguiente:

- a) Tipo de técnica de simulación: Es un análisis no composicional (fase líquida simple).
- b) Propiedades físicas del hidrocarburo: Gravedad específica y viscosidad absoluta y/o relativa.

- c) Características del sistema de tuberías: Diámetro, schedule, longitud, cotas de elevación y accesorios).
- d) Temperatura de operación: la temperatura fue de 45,55 °C (114 °F).
- e) Establecer como valores fijos en la simulación dos de los siguientes parámetros: Presión a la entrada de la tubería, presión a la salida y/o flujo volumétrico.

Una vez calculada la caída de presión en la troncal mediante la ayuda del simulador comercial, se procedió a realizar el montaje del sistema actual con las diferentes válvulas de alivio, para verificar la capacidad de alivio en la troncal para el caso de existir un golpe de ariete.

Para realizar el montaje de la simulación se tomó en cuenta la consideración de que el crudo se trasladó desde el Múltiple 2 hacia el Múltiple 1. Todo esto para tener una mejor facilidad al momento de realizar el montaje de la simulación en el software. Debido a que la simulación se realizó para un flujo en estado estacionario, el cambio en la presión del crudo fue colocado en el Múltiple 2 (Fuente) como una presión fija cuyo valor fue de 338,78 psi.

Como en esta simulación se va a determinar el caudal de alivio, se colocó en la salida o sumidero del sistema, el valor de la presión de alivio 2059,47 kPa (298,7 psi) y el caudal que maneja la Troncal 51 (Roja), cuyo valor es de 0,706 m<sup>3</sup>/s (16000 BPH).

### 3.8 SELECCIÓN DE LAS DIFERENTES VÁLVULAS A UBICARSE EN EL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN, SEGÚN LA NORMA API-520

Una vez que se selecciona para cada troncal la contingencia que generó la mayor tasa de flujo de alivio, así como la contrapresión existente, se determinó el tamaño del orificio de las válvulas que se requieren para aliviar dicho flujo según la Norma API 520 para líquido. En la Fig. 3.10 se muestra el diagrama de flujo donde se establecen los pasos seguidos por las Norma API 520 para el cálculo del área del orificio de la válvula.

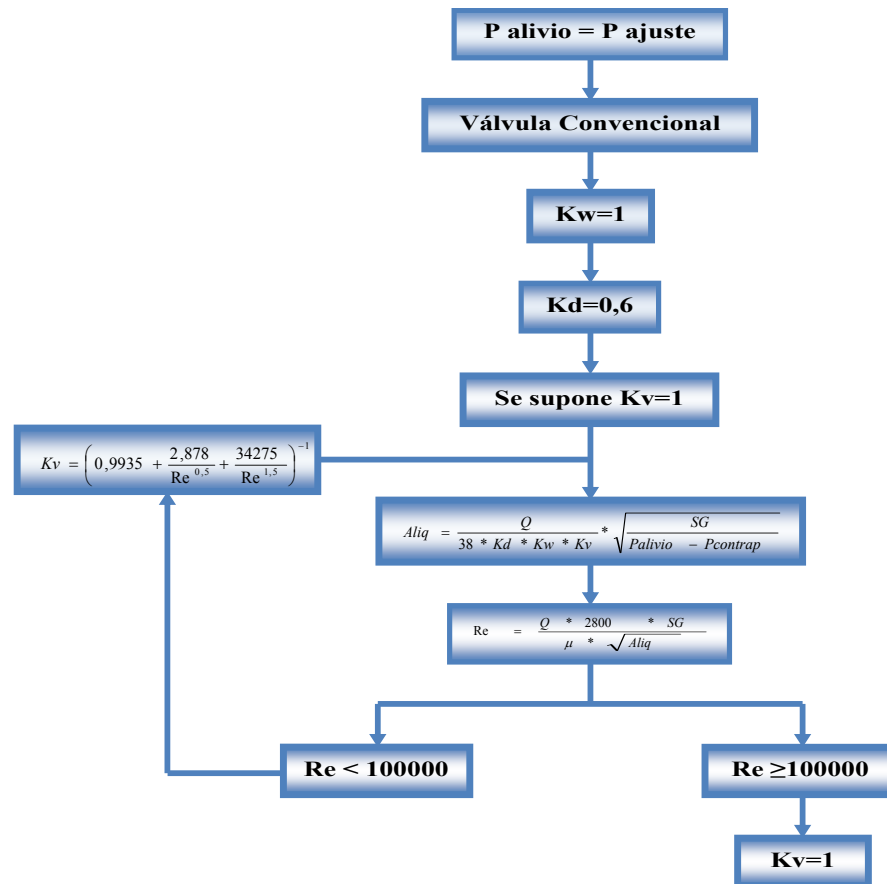


Figura 3.10. Procedimiento para el cálculo del área de la válvula de alivio

Para el caso de la troncal 51 (Roja) la mayor cantidad de caudal a desalojar por la válvula de alivio, fue generada con la contingencia de Golpe de ariete. Por lo tanto el área del orificio viene dado por la siguiente expresión:

$$A = \frac{Q}{38.Kd.Kw.Kv} \cdot \sqrt{\frac{SG}{P_{alivio} - P_{contrap}}} \quad (2.30)$$

Datos.

$$P_{alivio} = 298,7 \text{ psi}$$

$$P_{contrap} = 10\% (P_{alivio})$$

$$Q = 2726,26 \text{ gpm}$$

$$SG = 0,9593$$

$$Kd = 0,65$$

$$Kw = 1$$

Se supone  $Kv = 1$

$$A_{liq} = \frac{2726,26}{38,0.0,65.1.0.1,0} \cdot \sqrt{\left(\frac{0,9593}{298,7 - 29,87}\right)}$$

$$A_{liq} = 6,59 \text{ pulg}^2$$

El número de Reynolds se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{Q.2800.SG}{\mu.\sqrt{A_{liq}}}$$

Donde:

SG = Gravedad específica del crudo, 0,9593

$\mu$  = Viscosidad Dinámica, 443,32 cP

$$Re = \frac{2726,26 \cdot 2800 \cdot 0,9593}{443,32 \cdot \sqrt{6,59}}$$

$$Re = 6434,57$$

Debido a que el  $Re < 100000$ , se debe de calcular el factor Kv mediante la siguiente ecuación:

$$Kv = \left( 0,9935 + \frac{2,878}{Re^{0,5}} + \frac{34275}{Re^{1,5}} \right)^{-1}$$

$$Kv = \left( 0,9935 + \frac{2,878}{6434,57^{0,5}} + \frac{34275}{6434,57^{1,5}} \right)^{-1}$$

$$Kv = 0,936$$

Por lo tanto, el área requerida sería igual a:

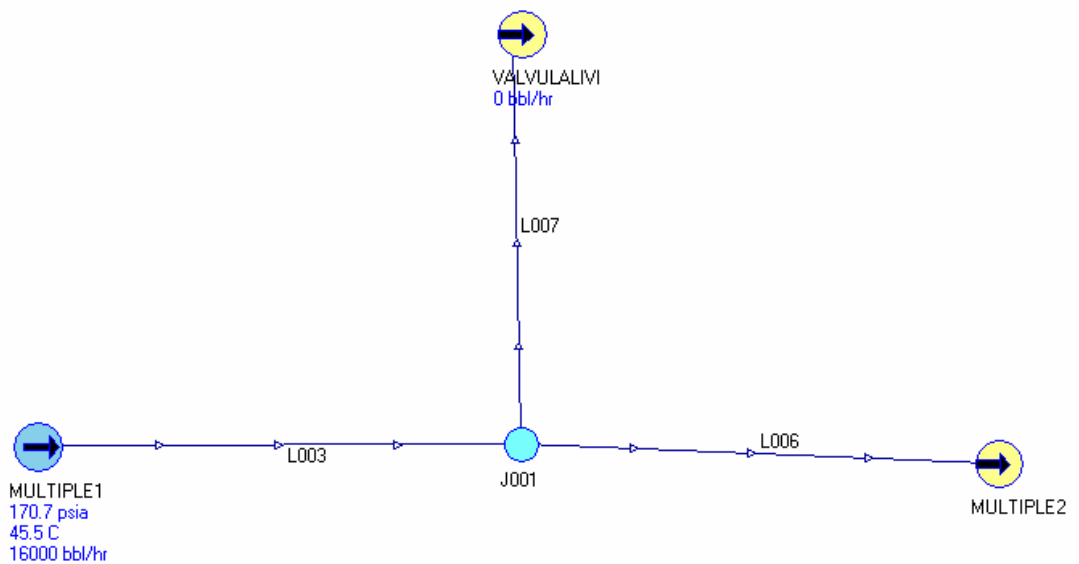
$$A_{liq} = 7,04 \text{ pulg}^2$$

En la Tabla B.1 del Apéndice B, se presentan los tamaños comerciales API de las válvulas de alivio que han de ser recomendados. Para un área requerida de 7,04

pulg<sup>2</sup>, se requiere una válvula de alivio de 11,05 pulg<sup>2</sup> tamaño “Q” de tipo convencional.

### 3.9 CÁLCULO DE LAS NUEVAS CAIDAS DE PRESIÓN EN CADA TRONCAL CON LAS VÁLVULAS SELECCIONADAS

Una vez seleccionada las válvulas a implantarse en el sistema en estudio, se procedió a realizar una simulación para verificar la caída de presión con la implantación de las nuevas válvulas (Ver Fig. 3.11). En la Tabla 3.10 se muestran los resultados de la simulación en la Troncal 51 (Roja) comprendida entre el Múltiple 1 y 2.



**Figura 3.11.** Esquema en PIPEPHASE de la Troncal 51 (Roja) comprendida entre el Múltiple 1 y 2.

Esta nueva simulación se realizó de la misma forma que en el capítulo anterior (ver Secc. 3.6), en la Tabla 3.10 se muestra los resultados de la simulación.

**Tabla 3.10.** Caída de presión de la troncal 51 (Roja) desde el Múltiple 1 hacia el Múltiple 2 obtenidas por PIPEPHASE.

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>TRONCAL 51</b>
<b>Caída de Presión Total entre Múltiple 1 y 2, del Sistema de Alivio Actual (psi)</b>	0,64
<b>Caída de Presión Total entre Múltiple 1 y 2, con las Válvulas Seleccionadas (psi)</b>	0,63

### **3.10 ACTUALIZACIÓN DE LOS PLANOS DE UBICACIÓN DE LAS VÁLVULAS EN CADA TRONCAL DE LOS MÚLTIPLES 1 Y 2**

Una vez seleccionada las válvulas a implantarse en el sistema de tubería, se verificó en planos anteriores las válvulas que están actualmente ubicadas en el sistema, para luego hacer una actualización colocando las nuevas válvulas (en caso de ser necesarios).

Para dicha actualización se utilizó el programa de diseño Autocad 2006, el cual facilitó la representación de las válvulas en el sistema. En la Fig. 3.12 muestra una vista de una sección del sistema de alivio ubicada en el Múltiple 2 con sus respectivas válvulas.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN UBICADO EN LOS MÚLTIPLES 1 Y 2

En las Tablas 4.1 y 4.2 se muestran las especificaciones más importantes de las válvulas de alivio en el sistema actual ubicadas en el Múltiple 1 y 2. En estas tablas se puede observar que todas las válvulas del sistema de alivio se encuentran deterioradas por partes rotas o por falta de calibración de algunos componentes desde el año 1997. Este estado de deterioro ha evitado una buena operación de estas válvulas de alivio a la presión de 285 psig. Cabe destacar que este mal estado de las válvulas fue debido a la falta de un plan de mantenimiento desde el año antes mencionado.

**Tabla 4.1.** Especificaciones de las válvulas de alivio ubicadas en el Múltiple 1

LÍNEA	VÁLVULA DE ALIVIO	PRESIÓN DE ALIVIO (psig)	ÁREA COMERCIAL (pulg <sup>2</sup> )	Nº DE VÁLVULAS	ÚLTIMA CALIBRACIÓN	ESTADO
Entrada (A) de Mezclador	Convencional	285	0,110	1	17/09/1997	Deteriorada
Entrada (B) del Mezclador	Convencional	285	0,110	1	17/09/1997	Deteriorada



**Tabla 4.2.** Especificaciones de las válvulas de alivio ubicadas en el Múltiple 2

TRONCAL	VÁLVULA DE ALIVIO	PRESIÓN DE ALIVIO (psig)	AREA COMERCIAL (pulg <sup>2</sup> )	Nº DE VALVULAS	ÚLTIMA CALIBRACIÓN	ESTADO
51(Roja)	Convencional	285	6,38	4	29/10/2004	Deteriorada
52(Azul)	Convencional	285	0,2279	1	29/10/2004	Deteriorada
53(Verde)	Convencional	285	6,38	2	29/10/2004	Deteriorada
54x26 (Morada)	Convencional	285	4,34	3	29/10/2004	Deteriorada
54x2x16 (Blanca)	Convencional	285	11,05	3	29/10/2004	Deteriorada
54x2x16 (Marrón)	Convencional	285	6,38	2	29/10/2004	Deteriorada

#### 4.2 CONTINGENCIAS QUE GENERAN SOBREPRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 Y 2 SEGÚN LAS NORMAS API 520 Y 521

En este trabajo las contingencias estudiadas que podrían causar sobrepresión en los Múltiples 1 y 2 fueron: Expansión Térmica y Golpe de Ariete.

En la Tabla 4.3 se muestran las contingencias que fueron evaluadas en las troncales ubicadas en los Múltiples 1 y 2. En esta tabla se puede observar que para las entradas (A) y (B) del Mezclador ubicado en el Múltiple 1 no se realizó el estudio de la contingencia por golpe de ariete debido a que no existen válvulas de cierre en las entradas del Mezclador, mientras que en las Troncales 52 (Azul) y 53 (verde) no se estudio la contingencia por golpe de ariete ya que las presiones producidas por este fenómeno no fueron mayores que la presión de alivio (presión de ajuste).

**Tabla 4.3.** Contingencias evaluadas en los Múltiples 1 y 2 que generaron Sobrepresión

MÚLTIPLE	LÍNEA	CONTINGENCIAS
<b>Múltiple 1</b>	Entrada (A) del Mezclador	Expansión Térmica
	Entrada (B) del Mezclador	Expansión Térmica
<b>Múltiple 2</b>	Troncal 51 (Roja)	Expansión Térmica
		Golpe de Ariete
	Troncal 52 (Azul)	Expansión Térmica
	Troncal 53 (Verde)	Expansión Térmica
	Troncal 54x26 (Morado)	Expansión Térmica
		Golpe de Ariete
	Troncal 54x2x16 (Marrón)	Expansión Térmica
		Golpe de Ariete
Troncal 54x2x16 (Blanca)	Expansión Térmica	
	Golpe de Ariete	

### 4.3 CARGAS DE ALIVIO SEGÚN LO ESTABLECIDO EN LAS NORMAS API 520 Y 521

Después de haber identificado las contingencias que generan sobrepresión en las Troncales de los Múltiples 1 y 2, se determinaron las capacidades de alivio de las válvulas de alivio que se encuentran instaladas en las Troncales.

#### 4.3.1 Expansión Térmica

En la Tabla 4.4 se puede observar que el coeficiente de expansión térmica obtuvo su mayor valor para las troncales cuyo servicio fue de crudo Anaco Wax (0,000554 1/°F), seguido crudo Santa Bárbara, Crudo Mesa y el crudo Merey resultó

con el menor valor ( $0,000348 \text{ 1/}^\circ\text{F}$ ), lo cual indica que para los crudos menos densos este coeficiente será mayor que para los crudos más densos.

**Tabla 4.4.** Coeficientes de expansión térmica para varios tipos de crudo a la temperatura de operación ( $114 \text{ }^\circ\text{F}$ ).

CRUDO	$^\circ\text{API}$	$\beta \text{ (1/}^\circ\text{F)}$
Merey	16	0,000348
Mesa	31,5	0,000452
Santa Bárbara	40,1	0,000540
Anaco Wax	46,2	0,000554

En la Tabla 4.5 se muestran el calor específico del crudo ( $C_p$ ), el calor transferido al crudo ( $H$ ) y el caudal de alivio para las troncales ubicadas en el Múltiple 1. El mayor caudal de alivio se manifestó en la Troncal 54x26 Morado (transporta crudo Mesa), esta alta tasa de alivio de crudo se debió a que esta Troncal presentó una alta transferencia de calor, un alto coeficiente de expansión térmica y un mínimo calor específico del crudo. Mientras que el menor caudal de alivio se obtuvo en la Troncal 51 Roja (transporta crudo Merey), esta baja tasa de alivio de crudo se debió a que esta troncal presentó una alta transferencia de calor, un bajo coeficiente de expansión térmica y un alto calor específico del crudo.

**Tabla 4.5.** Calor transferido al crudo y caudal de alivio para las Troncales del Múltiple 1.

TRONCAL	Cp (lb/pie <sup>3</sup> )	CALOR TRANSFERIDO H (Btu/h)	CAUDAL DE ALIVIO	
			(m <sup>3</sup> /s)	(gpm)
51 (Roja)	0,468	202643,1	$1,98 \times 10^{-5}$	0,311
52 (Azul)	0,433	100379,4	$1,52 \times 10^{-5}$	0,241
53 (Verde)	0,443	127416,3	$2,56 \times 10^{-5}$	0,405
54x26 (Morado)	0,433	195934,2	$2,97 \times 10^{-5}$	0,471
54x2x16 (Blanca)	0,433	122271,6	$2,30 \times 10^{-5}$	0,364
54x2x16 (Marrón)	0,440	102219,9	$1,55 \times 10^{-5}$	0,246

En la Tabla 4.6 al igual que para la tabla anterior, se puede observar el calor específico del crudo (Cp), el calor transferido al crudo (H) y el caudal de alivio para las troncales ubicadas en el Múltiple 2. El mayor caudal de alivio se manifestó en la Troncal 54x26 Morado (transporta crudo Mesa), esta alta tasa de alivio de crudo se debió a que esta Troncal presentó una alta transferencia de calor, un alto coeficiente de expansión térmica y un mínimo calor específico del crudo. Mientras que el menor caudal de alivio se obtuvo en la Troncal 51 Roja (transporta crudo Merrey), esta baja tasa de alivio de crudo se debió a que esta troncal presentó una alta transferencia de calor, un bajo coeficiente de expansión térmica y un alto calor específico del crudo.

**Tabla 4.6.** Calor transferido al crudo y caudal de alivio para las Troncales del Múltiple 2

TRONCAL	Cp (lb/pie <sup>3</sup> )	CALOR TRANSFERIDO H (Btu/h)	CAUDAL DE ALIVIO	
			(m <sup>3</sup> /s)	(gpm)
51 (Roja)	0,468	327954,1	$3,20 \times 10^{-5}$	0,508
52 (Azul)	0,433	264379,5	$4,01 \times 10^{-5}$	0,636

53 (Verde)	0,443	205359,3	$4,12 \times 10^{-5}$	0,653
54x26 (Morado)	0,433	340484,1	$5,17 \times 10^{-5}$	0,819
54x2x16 (Blanca)	0,433	216813,3	$4,07 \times 10^{-5}$	0,645
54x2x16 (Marrón)	0,440	217248,9	$3,96 \times 10^{-5}$	0,627

### 4.3.2 Golpe de Ariete

Para la contingencia por golpe de ariete, el caudal de alivio fue determinado para dos casos: Caso 1. Cierre instantáneo y total, y caso 2. Cierre lento y total de la válvula de compuerta en la línea.

En la Tabla 4.7 se muestran los valores de diámetro interno, caudal total y la velocidad del fluido para cada línea Troncal del Múltiple 2. En las Troncales 54x2x16 (Blanca y Marrón) fueron donde se presentaron las mayores velocidades del fluido. Porque se maneja un flujo elevado ( $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y un área de paso menor o tubería menor. El valor de la velocidad del fluido se encuentra entre el rango de la norma PDVSA L-TP 1.5, ( $5 \text{ pie/s} < V < 15 \text{ pie/s}$ ). Se debe de tener muy en cuenta de que al momento de aumentar el flujo volumétrico de crudo, la velocidad del fluido aumentará

**Tabla 4.7.** Diámetro Interno, Caudal Total, Velocidad del fluido para las Trocales ubicadas en el Múltiple 2.

TRONCALES	DIÁMETRO INTERNO m (pie)	CAUDAL TOTAL $\text{m}^3/\text{s}$ (gpm)	VELOCIDAD DEL FLUIDO $\text{m/s}$ (pie/s)
51 (Roja)	0,59 (1,93)	0,71 (11200)	2,58 (8,45)
52 (Azul)	0,38 (1,27)	0,09 (1540)	0,81 (2,66)
53 (Verde)	0,38 (1,27)	0,14 (2240)	1,19 (3,90)
54x26 (Morado)	0,59 (1,93)	0,88 (14000)	3,22 (10,56)

54x2x16 (Blanca)	0,38 (1,27)	0,53 (8400)	4,49 (14,73)
54x2x16 (Marrón)	0,38 (1,27)	0,53 (8400)	4,49 (14,73)

En la Tabla 4.8, se observan las presiones en los Múltiple 1 y 2 así como las caídas de presión entre ellos. En esta tabla se puede observar que los valores de las caídas de presión cumplieron con lo establecido en la norma PDVSA L-TP 1.5, la cual indica que la caída de presión máxima para una tubería por cada 100 pies de longitud debe encontrarse en 4 psi.

**Tabla 4.8.** Presión en los Múltiples 1 y 2 y caída de presión entre los Múltiples.

TRONCALES	PRESIÓN EN MÚLTIPLE 1		PRESIÓN EN MÚLTIPLE 2		CAIDA DE PRESION ENTRE M1 Y M2 (psi/100pie)	
	(psi)	(kPa)	(psi)	(kPa)	(psi)	(kPa)
51 (Roja)	170,7	1176,9	162,6	1121,1	0,31	2,13
52 (Azul)	30,7	211,7	30,2	208,2	0,016	0,11
53 (Verde)	84,7	583,9	83,1	572,94	0,02	0,13
54x26 (Morado)	124,7	859,8	114,4	788,6	0,27	1,86
54x2x16 (Blanca)	104,7	721,9	90,1	621,2	0,9	6,20
54x2x16 (Marrón)	104,7	721,9	91,6	631,6	2,01	13,85

En la Tabla 4.9 se muestran las sobrepresiones generadas, las presiones producidas por el golpe de ariete y el caudal de alivio estimado en las troncales, para un estudio de cierre instantáneo y total de la válvula. La Troncal 54x2x16 (Marrón) presentó los valores más elevados para todos los parámetros (sobrepresión, presión por golpe de ariete y caudal de alivio), debido a que la velocidad del fluido en la Troncal fue muy elevada. En la Troncal 52 (Azul) y 53 (Verde) no se presentaron caudales de alivio, ya que la presión por golpe de ariete no fue mayor a la presión de

alivio o presión de ajuste de la válvula. En las Troncales 51 (Roja), 54x26 (Morado), 54x2x16 (Blanca) y 54x2x16 (Marrón) se presentaron las presiones por golpe de ariete mayores a la presión de trabajo máxima permisible ( $PTMP_{calculada}$ ), por lo tanto los valores de los caudales de alivio estimados fueron elevados de tal forma que representaron un porcentaje considerablemente alto en comparación con el caudal total que fluye por la Troncal.

**Tabla 4.9.** Sobrepresión, presión por golpe de ariete y caudal de alivio para las Troncales del Múltiple 2 para un estudio de cierre instantáneo.

TRONCALES	SOBREPRESION		PRESION		CAUDAL ESTIMADO		DIF.
	(psi)	(kPa)	(psi)	(kPa)	TOTAL m <sup>3</sup> /s (gpm)	ALIVIO m <sup>3</sup> /s (gpm)	
51 (Roja)	374,1	2574,4	536,8	3701,1	0,71 (11200)	0,33 (5230,6)	6,9
52 (Azul)	118,8	819,31	149,1	1028,1	0,09 (1540)	0	
3 (Verde)	132,7	914,7	215,1	1483,1	0,14 (2240)	0	
54x26 (Morado)	399,5	2754,3	513,8	3542,5	0,88 (14000)	0,34 (5389,1)	8,6
54x2x16 (Blanca)	531,5	3664,4	621,6	4285,8	0,53 (8400)	0,34 (5389,1)	3,9
54x2x16 (Marrón)	591,92	4081,2	683,5	4712,6	0,53 (8400)	0,41 (6498,6)	6,4

$$P_{alivio} = 298,7 \text{ psi}; PTMP_{calculada} = 365,8 \text{ psi}$$

En la Tabla 4.10 se muestran las sobrepresiones generadas, las presiones producidas por el golpe de ariete y el caudal de alivio estimado que se producen en las Troncales ubicadas en el Múltiple 2 para un cierre lento y total de la válvula de cierre. En la Troncal 54x2x16 (Blanca) presentó el mayor valor de sobrepresión,

presión producida por el golpe de ariete y el caudal de alivio estimado, ya que el tiempo crítico ( $T_{\text{crítico}}$ ) obtuvo el menor valor para esta Troncal (ver Apéndice F). Al momento de ocurrir el cierre lento y total de la válvula, el mayor caudal de alivio estimado a desalojar por la válvula representó un 34,5 % del caudal total manejado. Las presiones producidas por golpe de ariete no sobrepasan la presión de trabajo máxima permisible calculada, lo cual indica que no ocurrirá alguna eventualidad (falla de la tubería) por exceso de presión. Para las Troncales 52 (Azul) y 53 (Verde), no se realizó el cálculo del caudal de alivio por la contingencia por golpe de ariete debido a que las presiones generadas son menores a la presión de la válvula de alivio ( $P_{\text{alivio}}$ ).

**Tabla 4.10.** Sobrepresión, presión por golpe de ariete y caudal de alivio para las Troncales del Múltiple 2 para un estudio de cierre lento.

TRONCALES	SOBREPRESION		PRESION		CAUDAL ESTIMADO		DIF.
	(psi)	(kPa)	(psi)	(kPa)	TOTAL m <sup>3</sup> /s (gpm)	ALIVIO m <sup>3</sup> /s (gpm)	
51 (Roja)	176,2	1214,8	338,8	2335,9	0,71 (11200)	0,172 (2726,2)	4,2
52 (Azul)	68,8	474,3	98,9	681,9	0,09 (1540)	0	
53 (Verde)	89,8	619,2	172,1	1186,6	0,14 (2240)	0	
54x26 (Morado)	198,9	1371,4	313,1	2158,8	0,88 (14000)	0,105 (1664,2)	1,9
54x2x16 (Blanca)	263,5	1816,7	353,6	2437,9	0,53 (8400)	0,221 (3502,9)	1,6
54x2x16 (Marrón)	245,1	1689,9	336,7	2355,3	0,53 (8400)	0,175 (2773,8)	3,1

$$P_{\text{alivio}} = 298,7 \text{ psi} ; PTMP_{\text{calculada}} = 365,8 \text{ psi}$$



#### 4.4 CAÍDA DE PRESIÓN EN LAS TRONCALES CON LA AYUDA DE UN SIMULADOR COMERCIAL

En la Tabla 4.11, se puede observar la comparación entre las presiones y caídas de presión simuladas y calculadas, con su respectivo error, para las Troncales ubicadas en el Múltiple 2. Para las Troncales 51 (Roja) y 54x26 (Morado), las presiones obtenidas por el simulador y las presiones calculadas con la teoría de la mecánica de los fluidos, presentaron un error menor al 3 % entre ellas. Las caídas de presión de las Troncales no exceden el valor expuesto por la Norma PDVSA L-TP 1.5.

**Tabla 4.11.** Presiones, caídas de presiones obtenidas por el simulador y las presiones, caídas de presiones calculadas para las troncales ubicadas en el Múltiple 2.

TRONCALES	PRESIÓN		CAIDA DE PRESION (psi/100pie)		% ERROR
	SIMULADA psi (kPa)	CALCULADA psi (kPa)	SIMULADA psi (kPa)	CALCULADA psi (kPa)	
51 (Roja)	166,6 (1148,67)	162,6 (1121,09)	0,64 ( 4,41)	0,31 ( 2,13 )	2,4
52 (Azul)	30,59 (210,91)	30,2 (208,22)	0,056 ( 0,38 )	0,016 ( 0,11 )	1,2
53 (Verde)	83,91 (578,54)	83,1 (572,95)	0,075 ( 0,51 )	0,02 ( 0,13 )	0,9
54x26 (Morado)	117,18 (807,93)	114,4 (788,76)	0,74 ( 5,10 )	0,27 ( 1,86 )	2,4
54x2x16 (Blanca)	90,3 (622,59)	90,1 (621,22)	0,82 ( 5,65 )	0,9 ( 6,20 )	0,2
54x2x16 (Marrón)	92,1 (635,01)	91,6 (631,56)	1,55 ( 10,69 )	2,01 ( 13,85 )	0,5

En la Tabla 4.12 se observan los caudales de alivio determinados con la ayuda del simulador PIPEPHASE, los caudales de alivio estimados con su respectivo error. En esta etapa se realizó el estudio para cuatro (4) troncales ubicadas en el

Múltiple 2, ya que fueron las únicas que se estudiaron cuando ocurría la contingencia por el Golpe de Ariete. El mayor caudal de alivio se presentó en la Troncal 54x2x16 Blanca (0,22 m<sup>3</sup>/s), y en la Troncal 54x26 (Morado) se presentó el mayor porcentaje de error entre el caudal de alivio simulado y calculado el cual fue de 4,5 % aproximadamente. Cabe destacar que esta simulación se hizo en estado de flujo estacionario y no en estado de flujo transitorio, ya que el simulador no permitió la realización de la simulación en estado de flujo transitorio debido a no contar con ciertos parámetros como (corte de agua, composición química del crudo, relación gas/crudo), también se hizo el montaje de la simulación para el cierre lento y total de la válvula.

**Tabla 4.12.** Caudal total, caudal de alivio obtenido mediante el simulador y el calculado con su respectivo error para las Troncales ubicadas en Múltiple 2.

TRONCALES	CAUDAL TOTAL m <sup>3</sup> /s (gpm)	CAUDAL DE ALIVIO SIMULADO m <sup>3</sup> /s (gpm)	CAUDAL DE ALIVIO CALCULADO m <sup>3</sup> /s (gpm)	% ERROR
51 (Roja)	0,71 (11200,01)	0,17 (2705,93)	0,172 (2726,26)	0,74
54x26 (Morado)	0,88 (14000,01)	0,110 (1742,52)	0,105 (1664,29)	4,48
54x2x16 (Blanca)	0,53 (8400)	0,225 (3573,22)	0,221 (3502,92)	1,77
54x2x16 (Marrón)	0,53 (8400)	0,179 (2833,06)	0,175 (2773,8)	2,23

#### 4.5 VÁLVULAS A UBICARSE EN EL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN SEGÚN LA NORMA API-520

En la Tabla 4.13 se muestra los caudales de alivio, las áreas requeridas y comerciales de las válvulas de alivio y el N° de Válvulas a implantarse para las Troncales ubicadas en el Múltiple 1. En cuanto a las áreas de las válvulas de alivio se nota que todas las válvulas poseen el mismo tamaño comercial, el cual es 1xDx2 (el primer número significa el diámetro de entrada, la letra indica el tamaño comercial de la válvula y el segundo número significa el diámetro de salida), debido a que en Múltiple 1 se evaluó la contingencia de expansión térmica. La Norma API 520 expone que para este tipo de contingencia los valores de las áreas requeridas de las válvulas son de un valor pequeño, gracias a que el caudal de alivio a desalojar por las válvulas es mínimo. El número de válvulas a implantarse no se ve afectado ya que el sistema actual posee 1 sola válvula de alivio.

**Tabla 4.13.** Caudal de alivio, áreas requeridas y comerciales para las troncales del Múltiple 1.

TRONCAL	CAUDAL DE ALIVIO		ÁREA REQUERIDA		ÁREA COMERCIAL		N° VALVULAS
	(m <sup>3</sup> /s)	(gpm)	cm <sup>2</sup>	(pulg <sup>2</sup> )	(pulg <sup>2</sup> )	Letra	
51 (Roja)	1,98x10 <sup>-5</sup>	0,314	0,303	0,047	0,110	D	1
52 (Azul)	1,52 x10 <sup>-5</sup>	0,241	0,005	0,00074	0,110	D	1
53 (Verde)	2,56 x10 <sup>-5</sup>	0,405	0,006	0,00091	0,110	D	1
54x2 6 (Morado)	2,97 x10 <sup>-5</sup>	0,471	0,008	0,0013	0,110	D	1
54x2 x16 (Blanca)	2,30 x10 <sup>-5</sup>	0,364	0,004	0,00058	0,110	D	1
54x2x16 (Marrón)	1,55 x10 <sup>-5</sup>	0,246	0,007	0,0011	0,110	D	1

En la Tabla 4.14 se exponen los caudales de alivio, las áreas requeridas y comerciales de las válvulas de alivio y el N° de Válvulas a implantarse para las Troncales ubicadas en el Múltiple 2, en donde se observa que las áreas requeridas para las Troncales 51 (Roja), 54x26 (Morado), 54x2x16 (Blanca) y 54x2x16 (Marrón) son mayores en comparación con las Troncales 52(Azul) y 53(Verde) debido a que fueron evaluadas por la contingencia de Golpe de Ariete. En cuanto al número de válvulas que se requieren instalar es necesario eliminar todas las válvulas que se encuentran en el sistema de alivio actual ya que están deterioradas y sobre diseñada (con respecto al número de válvulas). Para la troncal 51 (Roja), 54x26 (Morado), 54x2x16 (Blanca) y 54x2x16 (Marrón) es necesario instalar dos (2) válvulas de alivio nuevas.

**Tabla 4.14.** Caudal de alivio, áreas requeridas y áreas comerciales para las Troncales en el Múltiple 2.

TRONCAL	CAUDAL DE ALIVIO		ÁREA		ÁREA COMERCIAL		N° VÁLVULAS
	(m <sup>3</sup> /s)	(gpm)	(cm <sup>2</sup> )	(pulg <sup>2</sup> )	(pulg <sup>2</sup> )	Letra	
51 (Roja)	0,172	2726,7	29,48	7,04	11,05	Q	2
52 (Azul)	5,73x10 <sup>-5</sup>	0,908	0,02	0,00238	0,110	D	1
53 (Verde)	5,88x10 <sup>-5</sup>	0,933	0,015	0,00207	0,110	D	1
54x26 (Morado)	0,105	1664,29	23,35	3,82	4,34	M	2
54x2x 16 (Blanca)	0,221	3502,92	42,70	7,85	11,05	Q	2
54x2x 16 (Marrón)	0,175	2773,8	30,19	6,38	11,05	Q	2

#### 4.6 NUEVAS CAÍDAS DE PRESIÓN EN LAS TRONCALES DEL SISTEMA CON LAS VÁLVULAS SELECCIONADAS CON LA AYUDA DE UN SIMULADOR COMERCIAL

En la Tabla 4.15 se muestran las caídas de presiones en las troncales ubicadas en los Múltiples 1 y 2. Estos valores de presión no varían con respecto a las presiones para el sistema actual de alivio debido a que las válvulas de alivio permanecen cerradas al momento del transporte de crudo entre Múltiples.

**Tabla 4.15.** Caída de Presión con las Válvulas Seleccionadas mediante el simulador para las Troncales ubicadas en Múltiple 2.

CARACTERISTICA	TRONCAL 51 (ROJA)	TRONCAL 52 (AZUL)	TRONCAL 53 (VERDE)	TRONCAL 54x26 (MORADO)	TRONCAL 54x2x16 (BLANCA)	TRONCAL 54x2x16 (MARRÓN)
CAIDA DE PRESIÓN TOTAL ENTRE MÚLTIPLE 1 Y 2 (VÁLVULAS ACTUAL) (psi)	0,64	0,056	0,075	0,74	0,82	1,55
CAIDA DE PRESIÓN TOTAL ENTRE MÚLTIPLE 1 Y 2 (VÁLVULAS SELECCIONADAS) (psi)	0,63	0,056	0,075	0,72	0,8	1,52

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

1. Los crudos que recibe la Refinería Puerto la Cruz de los patios de tanque de la región oriental son el Merey, Anaco Wax, Mesa y Santa Barbará, siendo el crudo Merey el pesado y el Anaco Wax el más liviano.
2. Las válvulas de alivio que se encontraron en el sistema actual de alivio de presión estaban deterioradas debido a la falta de mantenimiento por parte de la empresa.
3. En el Múltiple 1 se estudio la contingencia de Expansión Térmica, y para el Múltiple 2 se evaluó la contingencia de expansión térmica y la de golpe de ariete, aunque para el múltiple 2 la contingencia de golpe de ariete no ocurre debido a que los tiempos de cierre son muy pequeños para la ocurrencia de este fenómeno en las tuberías.
4. Los caudales de alivio calculados para la contingencia de expansión térmica son pequeños debido a que por esta contingencia ocurre una dilatación del fluido por efecto de la temperatura, en cambio los caudales de alivio por la contingencia de golpe de ariete fueron elevados debido a que ocurre un cambio brusco en la presión del fluido.
5. Las caídas de presión registradas en las troncales ubicadas en el múltiple 2, cumplen con lo expuesto en la norma PDVSA L-TP 1.5.

6. En la Troncal 54x2x16 (Blanca) ubicada en el Múltiple 2 la válvula de alivio a implantarse fue la que presentó un mayor valor de área requerida ( $7,85 \text{ pulg}^2$ ) de tipo convencional, debido a que la velocidad del fluido fue elevada y esto afecta de manera drástica el aumento de la presión producida por el golpe de ariete.
7. Las válvulas de alivio no afectan la caída de presión en las Troncales ubicadas en el Múltiple 2, ya que permanecen cerradas al momento de transportar crudo desde los múltiples hacia los tanques.
8. Las velocidades en las Troncales cumplieron con las especificaciones de la norma PDVSA L-TP 1.5, que rige el estudio.
9. En la Troncal 51 (Roja) ubicada en el Múltiple 2 se deben de eliminar todas las válvulas de alivio, debido a que se encuentran deterioradas y presentaron un sobre diseño en cuanto al N° de válvulas, lo cual deberían reducirse al N° de válvulas calculadas en este estudio.
10. Las válvulas que deben implantarse en el Múltiple 1 presentaron el mismo tamaño de área comercial ( $0,11 \text{ pulg}^2$ ).

## 5.2 RECOMENDACIONES

1. Realizar un mantenimiento periódico a las válvulas de alivio ubicadas en los Múltiple 1 y Múltiple 2, con el fin de que se mantengan en buen estado al momento de la operación de las mismas.
2. Realizar una evaluación de las válvulas de alivio para los demás múltiples, para el buen funcionamiento del transporte de crudo.
3. Evaluar la capacidad de alivio para condiciones futuras de operación en el Múltiple 1 y el Múltiple 2, para constatar que el sistema actual cumpla con los requerimientos para el buen manejo de las operaciones.
4. Aumentar el diámetro nominal en las secciones donde las velocidades estén fuera de lo establecido por la norma cuando se aumente la tasa de crudo para las Troncales 54x2x16 (Marrón) y 54x2x16 (Blanca), ya que afectarán las velocidades del fluido sobrepasando los límites recomendados por la norma PDVSA L-TP 1.5
5. Cambiar todas las válvulas del sistema de alivio actual por válvulas nuevas (calibradas), para el buen funcionamiento del sistema.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez, G. **Estudios y cálculos para la instalación de un sistema de alivio cerrado en la refinería El Chaure.** Tesis de grado, Departamento de Mecánica, Universidad de Oriente, (1980)
  
- [2] Borrell, J. **Evaluación del sistema de alivio de la unidad de destilación atmosférica DA-1 de la refinería PLC.** Trabajo de grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Simón Bolívar, (2005)
  
- [3] Cova, M. **Evaluación de los sistemas de alivio del área de patio de tanques del cerro de carga de la Refinería Puerto la Cruz y patio de tanques del cerro Bellorín de la Refinería el Chaure.** Trabajo de grado, Departamento de Química, Universidad de Oriente, (2008)
  
- [4] Osuna, L. **Evaluación de la capacidad hidráulica de las líneas troncales, desde el múltiple n°1 hasta el múltiple principal de carga de la refinería puerto la cruz, Pdvsa-Oriente.** Tesis de grado, Departamento de Mecánica, Universidad de Oriente, (2006)
  
- [5] PDVSA. **Libro de Refinería Puerto La Cruz.** Gerencia General de Refinación. (2006)
  
- [6] World. **Tabla de Energía.** – Disponible en la página web: <http://www.tablaenergiasolarh-world.com>, (2007)

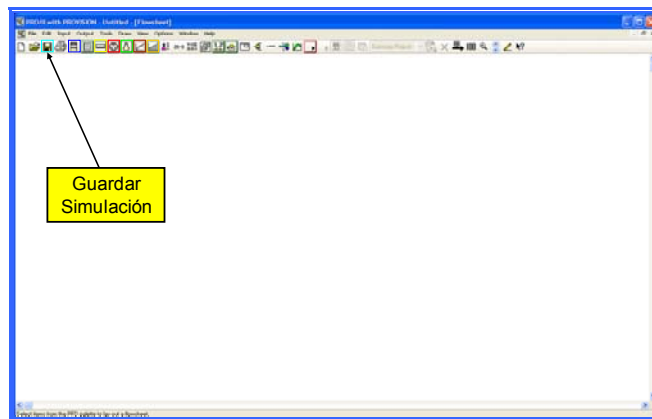
- [7] Mataix, C. **Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas**. Segunda Edición, Editorial Harla, México (1982)
- [8] Monografías. **Petróleo**. Disponible en la página Web: <http://www.monografias.com/trabajos5/petroleo/petroleo.shtml>. (1997)
- [9] Proyectosfindecarrera. **Válvula de seguridad**. Disponible en la página Web : [http://www.proyectosfindecarrera.com/valvula\\_seguridad.htm](http://www.proyectosfindecarrera.com/valvula_seguridad.htm). (1996)
- [10] Wikipedia. **Válvula de alivio de presión**. Disponible en la página Web: [http://es.wikipedia.org/wiki/Válvula\\_de\\_alivio\\_de\\_presión](http://es.wikipedia.org/wiki/Válvula_de_alivio_de_presión). (2008)
- [11] Crane. **Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías**. Décima quinta Edición Editorial McGraw-Hill, México (1976)
- [12] Greene, R. **Válvulas, Selección, Uso y Mantenimiento**. Primera Edición, Editorial McGraw-Hill, México (1992)
- [13] Wikipedia. **Diagrama de válvula de alivio**. Disponible en la página Web: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/dl/valvulaaliviodiagrama.gif>. (2000)
- [14] Centec de Venezuela, Equipos y Servicios para la Industria Petrolera y Afines **Válvulas de alivio**. Junio (1986)
- [15] Exxon Services Company. **Prácticas de diseños**. Volumen 9, Sección 15-C, Marzo (1981)

- [16] American Petroleum Institute recommended practice 520 **Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries**. fifth edition, (2003)
- [17] Estándar API RP 521. **Guide for pressure-relieving and despressuring system**. Cuarta edición, (1997)
- [18] ASME/ANSI B31.3. **Process piping**. American National of Mechanical Enginners, (2004)
- [19] ASME/ANSI B16.5, **Pipe flanges and flanged fittings**. American National of Mechanical Enginners, (2003)
- [20] INVENSIS®, SIMSCI – ESSCOR™, **User Guide, Pro II 8.1**. USA, (2006)
- [21] Streeter, V. **Mecánica de los Fluidos**. Primera Edición. Editorial McGraw-Hill. México (1972)
- [22] INVENSIS®, SIMSCI – ESSCOR™, **User Guide, Pipephase 9.1**. USA, (2006)
- [23] PDVSA, **Programa CENTINELA OLEO**. (2002)
- [24] INELECTRA **Guía de Diseño Para los Sistemas de Alivio de Presión**. (2008)
- [25] CRANE **Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías**. Decimoquinta Edición. Editorial McGraww-Hill. México (2000)

**APÉNDICE A**  
**(DESCRIPCION DEL PROCEDIMIENTO DE CÓMO REALIZAR LA**  
**SIMULACION CON EL PROGRAMA PROII)**

Al iniciar el programa se observa la imagen inicial del simulador y a continuación aparece otra imagen en la cual se explica el código de colores utilizado para mostrar el estatus de los datos de entrada (por ejemplo, cuando un dato es requerido o se le asigna un valor por defecto).

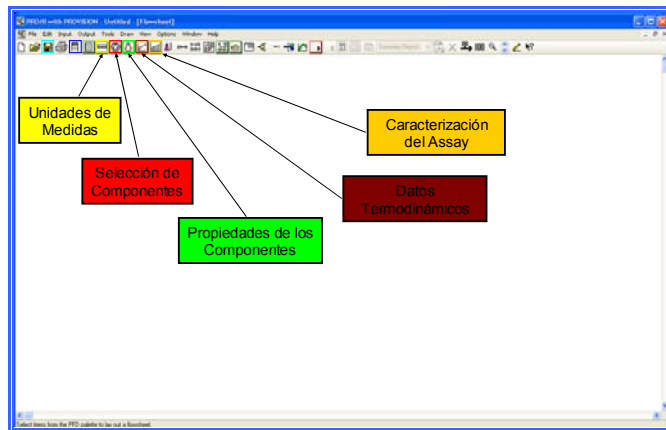
Luego aparece la ventana principal, la cual es utilizada para la implantación de todas las unidades y líneas correspondientes a los diagramas de flujo de proceso que se desean diseñar o evaluar en este simulador. Antes de iniciar la simulación se debe asignar un nombre a la misma y guardarla como una simulación nueva, (Ver Fig. A.1),



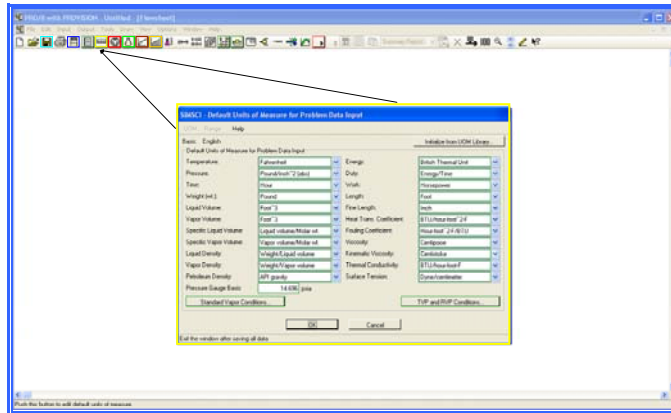
**Figura A.1.** Ventana principal para realizar la simulación

Una vez guardada la simulación, si se desea, se puede cambiar las unidades de medida en las cuales estarán expresados los datos de entrada para la simulación presionando el botón de la ventana principal con el nombre de “Unidades de Medida” (Ver Fig. A.2). Luego se presenta una ventana donde el programa muestra por defecto todas las unidades en el Sistema Inglés, debido a que este es el más utilizado. En este caso no se realizaron cambios y se trabajó en el Sistema Inglés (Ver Fig. A.3). Igualmente a través de los botones “Selección de Componentes” y “Propiedades de

los Componentes”, el programa proporciona las posibilidades de seleccionar diversos compuestos desde una extensa biblioteca de componentes en la base de datos del simulador. O crear cortes de crudo y definir sus respectivas propiedades, en el caso de que se conocieran estas características del fluido en el momento de simular un determinado problema. Pero debido a que éste no es el caso (ya que lo que se quiere es determinar los cortes de los crudos estudiados y sus propiedades), estas opciones no fueron tomadas en cuenta.

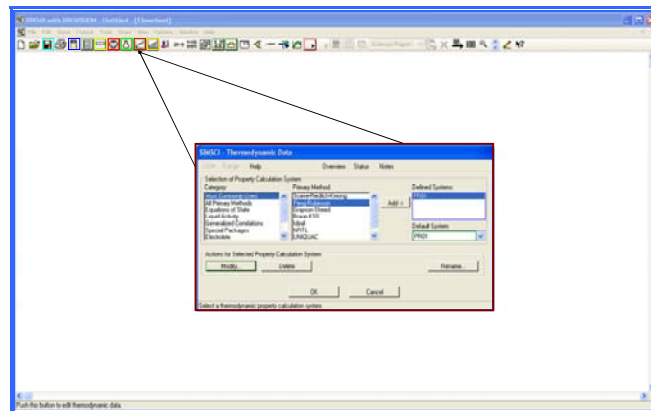


**Figura A.2.** Opciones que ofrece el simulador PRO/II® para caracterizar la simulación de un problema de procesos



**Figura A.3.** Selección de las unidades de medida para los datos de entrada del problema

Luego se debe seleccionar el botón con el nombre de “Datos Termodinámicos” ubicado en la ventana principal, para especificar el sistema de cálculo termodinámico con el cual se desea que el simulador PRO/II® realice la estimación de las propiedades tanto fisicoquímicas del fluido y como de transporte (Ver Fig. A.4).

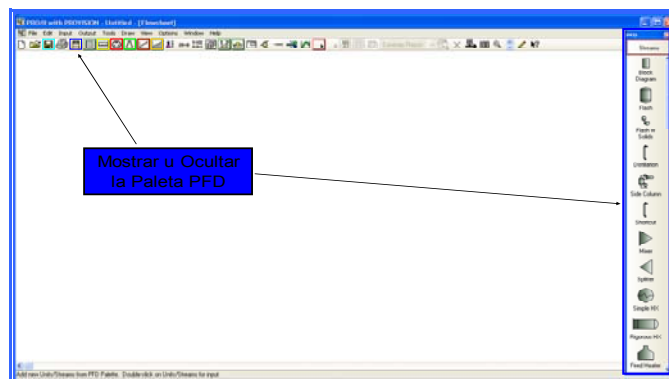


**Figura A,4.** Selección del sistema cálculo termodinámico

En esta sección se elige la categoría “Comúnmente más usados” y luego se selecciona como método primario el sistema “Peng- Robinson”. Luego se presiona el

botón “Add” para establecerlo como sistema definido. En este caso se trabajó con este sistema debido a que es el más recomendado para estimar las propiedades fisicoquímicas y de transporte y predecir el equilibrio de fases para hidrocarburos, de acuerdo a la Guía del usuario, aportada en las opciones de ayuda del PRO/II®.

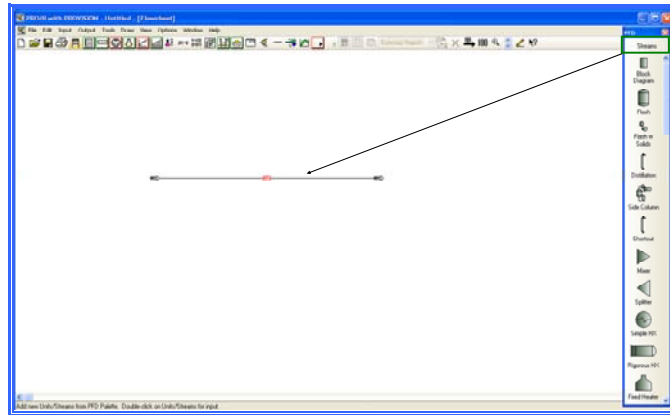
Una vez definidas las características primarias de la simulación se selecciona en la ventana principal el botón denominado “Mostrar u ocultar Paleta PFD”, el cual permite mostrar toda la gama de equipos y herramientas para crear el diagrama de flujo de proceso de un problema a simular (Ver Fig. A.5).



**Figura A.5.** Indicaciones para mostrar u ocultar la Paleta PFD

Posteriormente en la Paleta PFD se selecciona el botón “Streams” para crear una corriente en el área de trabajo de la ventana principal, y se presiona en el espacio en blanco para que aparezca la corriente del fluido que se desea simular (Ver Fig. A.6).

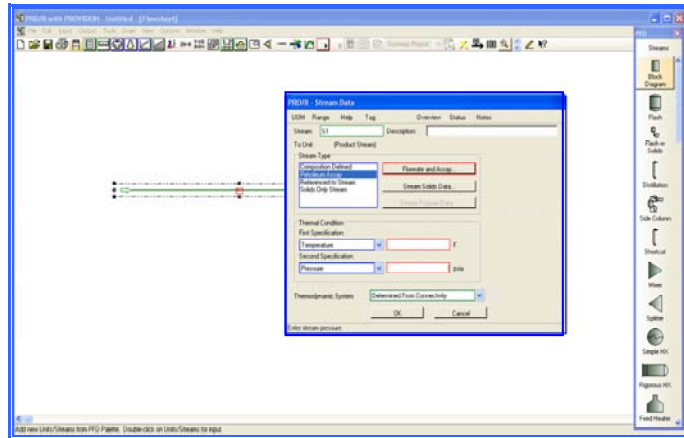




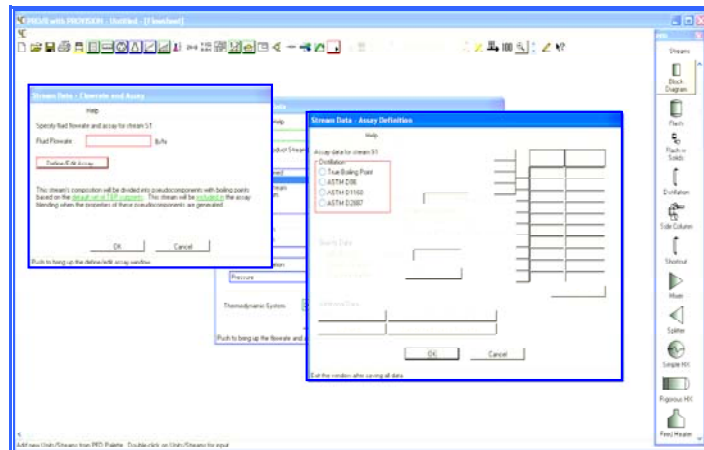
**Figura A.6.** Procedimiento para crear una corriente de fluido

Luego, una vez creada la corriente, se presiona dos veces en ella con la finalidad de que aparezca una ventana para caracterizar los datos de la corriente (Ver Fig. A.7), Allí se especifica el nombre de la corriente, el tipo de corriente (se selecciona Assay de Petróleo ya que se conoce la curva ASTM D-86 aportada por el sistema de laboratorio (ver anexo B), las condiciones térmicas, donde se deben proporcionar dos especificaciones (se colocó la temperatura de operación, 114°F y la presión de ajuste 298 psia) y el sistema termodinámico (se eligió el sistema PR01, el cual ya fue definido anteriormente). Posteriormente se presiona en esta ventana el botón con el nombre “Caudal del Fluido y Assay”, permitiendo que se despliegue la ventana donde se puede especificar el flujo másico del fluido y se muestra una tecla denominada “Definir/Editar Assay” (Ver Fig. A.8). Al presionar esta tecla se despliega una ventana donde se debe especificar las características de la curva Assay. Allí se elige como tipo de curva de destilación la ASTM D-86 en base volumen de líquido, se proporciona la gravedad API y finalmente se introducen los valores de los cortes de la curva ASTM D-86 (% destilado vs temperatura).

Una vez realizado todo lo anterior se presiona sucesivamente la tecla “ok” para aceptar los cambios.

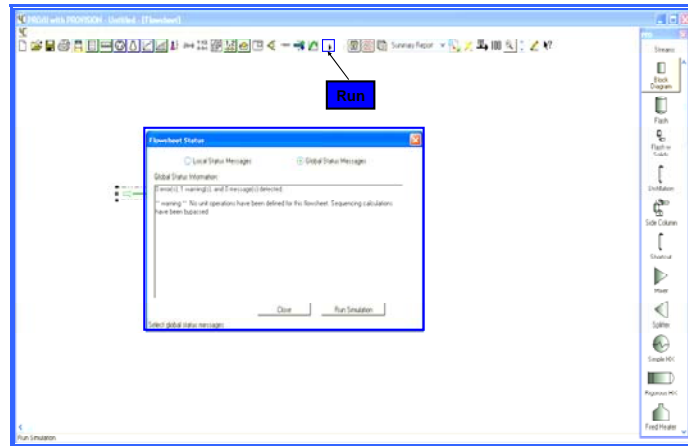


**Figura A.7.** Caracterización de la corriente de fluido



**Figura A.8.** Selección del caudal del fluido y definición de la curva Assay

Para finalizar se debe presionar el botón “Run” y se despliega la ventana de estatus (Ver Fig. A.9), donde el programa muestra advertencias con respecto a la simulación (si existen errores). Luego de revisar todas las notificaciones y realizar los cambios en caso de que existan errores, se presiona el botón “Correr Simulación” para que el simulador proceda a realizar los cálculos. Una vez hecho ésto se debe presionar la tecla “Generar Reporte” ubicado en la ventana principal, y asignarle un nombre al reporte para que el simulador muestre los resultados obtenidos.



**Figura A.9.** Ventana de estatus de la simulación

**APÉNDICE B**  
**(PROPIEDADES FISICOQUIMICAS DE LOS CRUDOS (ASSAY))**



## APÉNDICE B

CARACTERÍSTICA DEL CRUDO					HIDROCARBUROS			
GRAVEDAD API A 60 °F (°API)		41,3			IBP-20	20-100	100-150	
PUNTO DE INFLAMABILIDAD (°F)		<-4			%VOL	2,36	18,14	18,25
PRESIÓN DE VAPOR (psia)		7,40			C1 Y C2	0,0123	0	0
					C3	0,3191	0	0
					ISO-C4	0,5836	0,0071	0
					N-C4	1,2101	0,0528	0,001
					ISO-C5	0,2152	1,2524	0,005
					N-C5	0,0342	1,6453	0,004
					C6 <sup>+</sup>	0,0101	15,1825	18,236
DESTILADO DEL CRUDO	°C	20	100	150	200	250	300	
	%VOL	3,31	21,09	37,38	48,77	57,92	66,12	

**Tabla B.1** Propiedades físico químicas del crudo Anaco Wax

**Tabla B.2** Propiedades físico químicas del crudo Mesa

CARACTERÍSTICA DEL CRUDO					HIDROCARBUROS			
GRAVEDAD API A 60 °F (°API)		30			IBP-20	20-100	100-150	
PUNTO DE INFLAMABILIDAD (°F)		32			%VOL	1,34	6,83	8,58
PRESIÓN DE VAPOR (psia)		5,16			C1 Y C2	0,002	0	0
					C3	0,177	0	0
					ISO-C4	0,266	0,009	0,001
					N-C4	0,418	0,081	0,005
					ISO-C5	0,333	0,510	0,006
					N-C5	0,155	0,687	0,006
					C6 <sup>+</sup>	0,003	0	0
DESTILADO DEL CRUDO	°C	100	150	200	250	300	343	
	%VOL	6,83	15,41	23,30	32,22	41,38	50,43	



CARACTERÍSTICA DEL CRUDO		HIDROCARBUROS LIVIANOS									
16	GRAVEDAD API A 60 °F (°API)										
53	PUNTO DE INFLMABILIDAD (°F)	C1 Y C2	IBP-20	20-100	100-150						
1,55	PRESION DE VAPOR (psia)	C3	0	0	0						
		ISO-C4	0,011	0	0						
		N-C4	0,028	0,005	0,001						
		ISO-C5	0,067	0,028	0,004						
		N-C5	0,016	0,105	0,101						
		N-C5	0,008	0,127	0,013						
		C6 <sup>+</sup>	0,002	0	0						
DESTILADO DEL CRUDO	°C	0	00	50	00	50	00	43	02	61	00 <sup>+</sup>
	% VOL		,56	,8	,60	5,63	3,51	0,09	1,66	1,53	00

Tabla B.3 Propiedades físico químicas del crudo Merey

Tabla B.4 Propiedades físico químicas del crudo Santa Barbará

CARACTERÍSTICA DEL CRUDO		HIDROCARBUROS LIVIANOS										
	GRAVEDAD API A 60 °F (°API)	39,6										
	PUNTO DE INFLMABILIDAD (°F)	22										
	PRESION DE VAPOR (psia)	5,36										
			IBP-20	20-100	100-150							
			C1 Y C2	0	0	0						
			C3	0,063	0	0						
			ISO-C4	0,147	0,005	0						
			N-C4	1,296	0,052	0,001						
			ISO-C5	0,338	0,678	0,005						
			N-C5	0,103	0,917	0,005						
			C6 <sup>+</sup>	0,002	0	0						
DESTILADO DEL CRUDO	°C	20	100	150	200	250	300	343	402	4		
	% VOL	1,71	15,37	29,33	41,18	52,68	63,31	71,59	77,92	8		



## **APÉNDICE C**

**(TABLAS Y GRAFICAS DE LA CONTINGENCIA DE EXPANSIÓN  
TÉRMICA)**

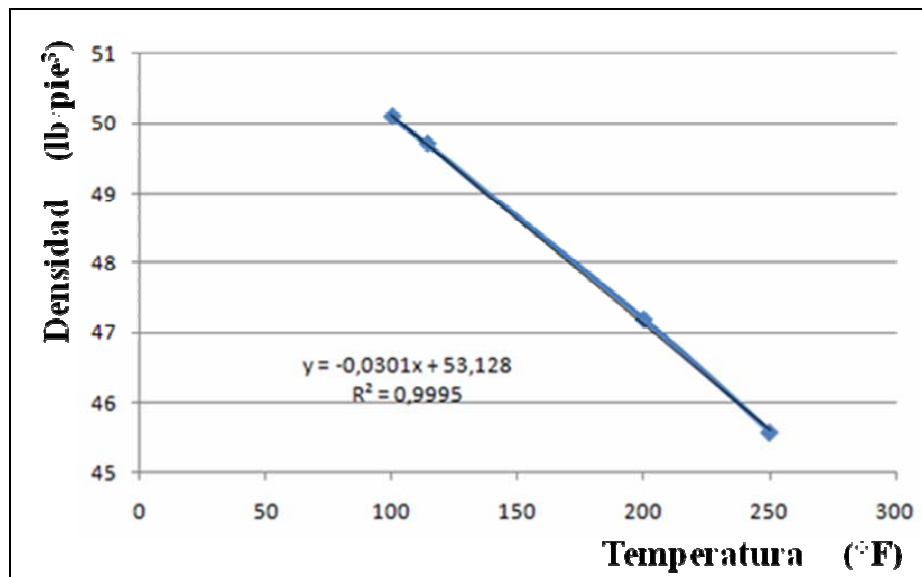






**Tabla C.1.** Parámetros obtenidos a partir del simulador PRO II para la contingencia de expansión térmica

Troncal	$\rho(\text{lb}/\text{pie}^3)$	$\partial\rho/\partial T(\text{lb}/\text{pie}^3 \cdot ^\circ\text{F})$
Tr-51	58,879	-0,02024
Tr-52	53,468	-0,02422
Tr-53	49,709	-0,02756
Tr-54x26	53,468	-0,02422
Tr-54x2x16	50,277	-0,02726
Tr-54x2x16	56,468	-0,02422



**Figura C.1** Grafica de la densidad en función de la temperatura para el crudo Anaco wax.

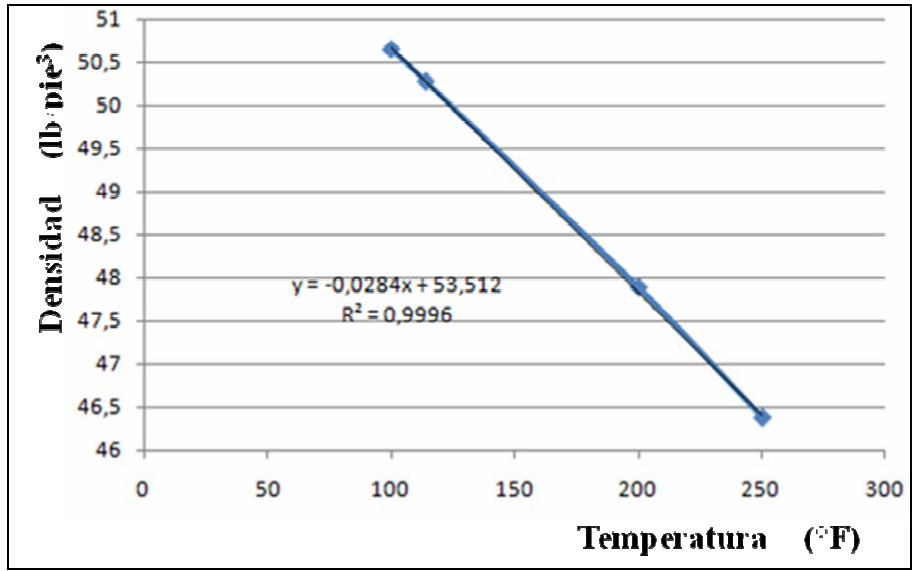


Figura C.2. Grafica de la densidad en función de la temperatura para el crudo Santa Barbará

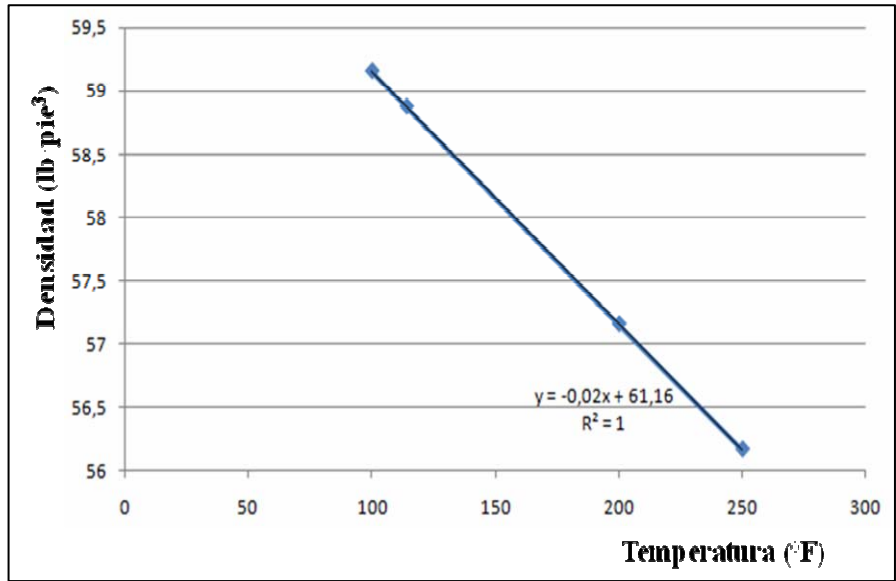


Figura C.3. Grafica de la densidad en función de la temperatura para el crudo Merrey

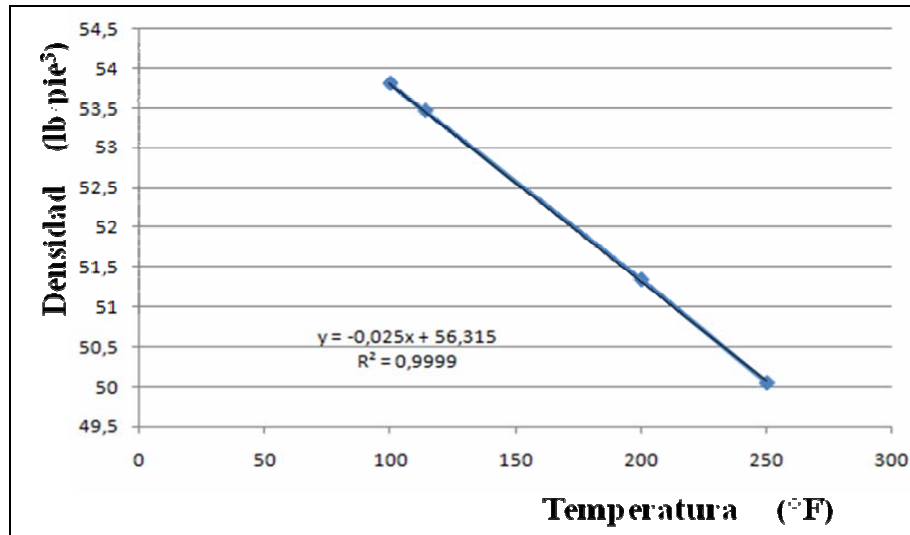


Figura C.4. Grafica de la densidad en función de la temperatura para el crudo Mesa



**APÉNDICE D**  
**(TAMAÑOS COMERCIALES DE VALVULAS DE ALIVIO)**





**Tabla D.1** Tamaños Comerciales API de Válvulas de Alivio

Letra Designada	Área API del Orificio de la Válvula (in <sup>2</sup> )
D	0,11
E	0,196
F	0,307
G	0,503
H	0,785
J	1,287
K	1,838
L	2,853
M	3,6
N	4,34
P	6,38
Q	11,05
R	16
T	30,21





**APÉNDICE E**  
**(TABLAS PARA EL DISEÑO DE TUBERIAS)**



**TABLA E.1.** Factores K para distintos accesorios

	Diámetro nominal, pulg											
	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1	$1\frac{1}{2}$	2	3	4	5	6	8-10	12-16	18-24
Válvula de compuerta (abierto)	0.22	0.20	0.18	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.096
Válvula de globo (abierto)	9.2	8.5	7.8	7.1	6.5	6.1	5.8	5.4	5.1	4.8	4.4	4.1
Codo estándar (atornillado) 90°	0.80	0.75	0.69	0.63	0.57	0.54	0.51	0.48	0.45	0.42	0.39	0.36
Codo estándar (atornillado) 45°	0.43	0.40	0.37	0.34	0.30	0.29	0.27	0.26	0.24	0.22	0.21	0.19
"T" estándar (flujo recto)	0.54	0.50	0.46	0.42	0.38	0.36	0.34	0.32	0.30	0.28	0.26	0.24
"T" estándar (flujo cruzado)	1.62	1.50	1.38	1.26	1.14	1.08	1.02	0.96	0.90	0.84	0.78	0.72

**Tabla E.2.** Rugosidad relativa para distintos materiales.

**Fuente:** Norma PDVSA L-TP 1.5

Materiales	Valores de E	
	Pies	Metros
Bronce, Plomo, Estaño, Vidrio, Tubería Fundida, Cemento Torneado Centrifugante y Revestimiento Bituminoso	0,000005	0,00000152
Acero Comercial y Hierro Forjado	0,00015	0,000046
Hierro Colado – Bañado en Asfalto	0,00040	0,000122
Hierro Galvanizado	0,00050	0,000152
Hierro Colado – No Revestido	0,00085	0,00026
Vara de Madera	0,0006–0,003	0,000183–0,00091
Concreto	0,001–0,01	0,00030–0,0030
Acero Remachado	0,003–0,03	0,00091–0,0091

**Tabla E.3.** Tabla de Equivalencia

Grados API	Gravedad Especifica	Densidad (Lb/ft <sup>3</sup> )
10	1,000	62,36
12	0,9861	61,5
14	0,9725	60,65
16	0,9593	59,83
18	0,9465	59,03
20	0,934	58,25
22	0,9218	57,87
24	0,91	56,75
26	0,8984	56,03
28	0,8871	55,32

30	0,8762	54,64
32	0,8654	53,97
34	0,855	53,32
36	0,8448	52,69
38	0,8348	52,06
40	0,8251	51,46
42	0,8155	50,86
44	0,8063	50,28

**Tabla E.4** Propiedades de diseño de tuberías de acero

Tamaño nominal de tubería y diámetro externo pulgadas	Número de calibre y/o peso	Espesor de pared  Pulg t	Diámetro interno  Pulg d	Quinta potencia de D.I miles  Pulg <sup>5</sup> d <sup>5</sup>	Áreas y pesos						
					Área de superficie del tubo		Sección Transversal		Peso de		
					Externa Pie <sup>2</sup> por Pie Ao	Interna Pie <sup>2</sup> por Pie Ai	Área Metálica Pulg <sup>2</sup> A	Área de flujo Pulg <sup>2</sup> Af	Tubería Lb. por Pie W	Agua Lb. por Pie Ww	
	160	0,906	6,813	14,7	2,258	1,784	21,97	36,5	74,7	15,8	
D= 10,750	SS	0,134	10,482	127	2,81	2,74	4,47	86,3	15,2	37,4	
		10S	0,165	10,420	123	2,81	2,73	5,49	85,3	18,7	36,9
	LW	0,188	10,374	120	2,81	2,72	6,24	84,5	21,2	36,6	
		0,203	10,344	118	2,81	2,71	6,73	84,0	22,9	36,4	
		0,219	10,310	116	2,81	2,70	7,28	83,5	24,7	36,1	
		20	0,250	10,250	113	2,81	2,68	8,25	82,5	28,0	35,7
		0,279	10,192	110	2,81	2,67	9,18	81,6	31,2	35,3	
		30	0,307	10,136	107	2,81	2,65	10,07	80,7	34,2	34,9
		0,348	10,054	103	2,81	2,63	11,37	79,4	38,7	34,4	
		40 ST 40S	0,365	10,020	101	2,81	2,62	11,91	78,9	40,5	34,1
		0,395	9,960	98,0	2,81	2,61	12,85	77,9	43,7	33,7	
		80 XS 80S	0,500	9,750	88,1	2,81	2,55	16,10	74,7	54,7	32,3
		0,531	9,687	85,3	2,81	2,54	17,06	73,7	58,0	31,9	
		80	0,593	9,564	80,0	2,81	2,50	18,92	71,8	64,3	31,1
		100	0,718	9,314	70,1	2,81	2,44	22,63	68,1	76,9	29,5
		0,750	9,250	67,7	2,81	2,42	23,56	67,2	80,1	29,1	
		120	0,843	9,064	61,2	2,81	2,37	26,24	64,5	89,2	27,9
140	1,000	8,750	51,3	2,81	2,29	30,63	60,1	104,1	26,0		
1,062	8,625	47,7	2,81	2,26	32,33	58,4	109,9	25,3			
160	1,125	8,500	44,4	2,81	2,23	34,02	56,7	115,7	24,6		
12	SS	0,156	12,438	296	3,34	3,26	6,17	121,5	21,0	52,6	
		10S	0,180	12,390	292	3,34	3,24	7,11	120,6	24,2	52,2
	LW	0,203	12,344	287	3,34	3,23	8,00	119,7	27,2	51,8	
		0,219	12,312	283	3,34	3,22	8,62	119,1	29,3	51,6	
		0,238	12,274	279	3,34	3,21	9,36	118,3	31,8	51,2	
		0,250	12,250	276	3,34	3,21	9,82	117,9	33,4	51,0	
		0,279	12,192	269	3,34	3,19	10,93	116,7	37,2	50,6	
		0,300	12,150	265	3,34	3,18	11,73	115,9	39,9	50,2	
		30	0,330	12,090	258	3,34	3,17	12,88	114,8	43,8	49,7
		0,344	12,062	255	3,34	3,16	13,41	114,3	45,6	49,5	

Continuación Tabla E.4...

Tamaño nominal de tubería y diámetro externo pulgadas	Número de calibre y/o peso	Espesor de pared  Pulg t	Diámetro interno  Pulg d	Quinta potencia de D.I miles  Pulg <sup>5</sup> d <sup>5</sup>	Áreas y pesos					
					Área de superficie del tubo		Sección Transversal		Peso de	
					Externa Pie <sup>2</sup> por Pie Ao	Interna Pie <sup>2</sup> por Pie Ai	Área Metá- lica Pulg <sup>2</sup> A	Área de flujo Pulg <sup>2</sup> Af	Tubería Lb. por Pie W	Agua Lb por Pie Ww
D= 12,750	ST 40S 40	0,375	12,000	249	3,34	3,14	14,58	113,1	49,6	49,0
		0,406	11,938	242	3,34	3,13	15,74	111,9	53,5	48,5
		0,438	11,874	236	3,34	3,11	16,94	110,7	57,6	47,9
	XS 80S 60	0,500	11,750	224	3,34	3,08	19,24	108,4	65,4	47,0
		0,562	11,626	212	3,34	3,04	21,52	106,2	73,2	46,0
		0,625	11,500	201	3,34	3,01	23,81	103,9	80,9	45,0
		0,687	11,376	191	3,34	2,98	26,04	101,6	88,5	44,0
		0,843	11,064	166	3,34	2,90	31,53	96,1	107,2	41,6
		0,875	11,000	161	3,34	2,88	32,64	95,0	111,0	41,1
		1,000	10,750	144	3,34	2,81	36,91	90,8	125,5	39,3
	140 160	1,125	10,500	128	3,34	2,75	41,09	86,6	139,7	37,5
		1,219	10,313	117	3,34	2,70	44,14	83,5	150,1	36,2
		1,312	10,126	106	3,34	2,65	47,14	80,5	160,3	34,9
D= 14,000	SS 10S	0,156	13,688	481	3,67	3,58	6,78	147,2	23,1	63,7
		0,188	13,624	469	3,67	3,57	8,16	145,8	27,7	63,1
		0,210	13,580	462	3,67	3,56	9,10	144,8	30,9	62,7
		0,220	13,560	458	3,67	3,55	9,52	144,4	32,4	62,5
		0,238	13,524	452	3,67	3,54	10,29	143,6	35,0	62,2
	10 20	0,250	13,500	448	3,67	3,53	10,29	143,6	35,0	62,2
		0,312	13,375	428	3,67	3,50	13,44	140,5	45,7	60,8
		0,375	13,250	408	3,67	3,47	16,05	137,9	54,6	59,7
	30 ST 40	0,406	13,188	399	3,67	3,45	17,34	136,6	59,0	59,1
		0,438	13,125	389	3,67	3,44	18,66	135,3	63,4	58,6
	XS 60	0,469	13,062	380	3,67	3,42	19,94	134,0	67,8	58,6
		0,500	13,000	371	3,67	3,40	21,12	132,7	72,1	57,5
		0,593	12,814	345	3,67	3,35	24,96	129,0	84,9	55,8
		0,625	12,270	337	3,67	3,34	26,26	127,7	89,3	55,3
		0,656	12,688	329	3,67	3,32	27,50	126,4	93,5	54,8
		0,750	12,500	305	3,67	3,27	31,22	122,7	106,1	53,1
0,937		12,125	262	3,67	3,17	38,47	115,5	130,8	50,0	



Continuación Tabla E.4...

Tamaño nominal de tubería y diámetro externo pulgadas	Número de calibre y/o peso	Espesor de pared Pulg t	Diámetro interno Pulg d	Quinta potencia de D.I miles Pulg <sup>5</sup> d <sup>5</sup>	Áreas y pesos					
					Área de superficie del tubo		Sección Transversal		Peso de	
					Externa Pie <sup>2</sup> por Pie Ao	Interna Pie <sup>2</sup> por Pie Ai	Área Metá- lica Pulg <sup>2</sup> A	Área de flujo Pulg <sup>2</sup> Af	Tubería Lb. por Pie W	AguaL b por Pie Ww
14	120	1,093	11,814	230	3,67	3,09	44,32	109,6	150,7	47,5
	140	1,250	11,500	201	3,67	3,01	50,07	103,9	170,2	45,0
		1,134	11,313	185	3,67	2,96	53,42	100,5	181,6	43,5
	160	1,406	11,188	175	3,67	2,93	55,63	98,3	189,1	42,6
D =16,000	SS 10S	0,169	15,670	945	4,19	4,10	8,21	192,9	27,9	83,5
		0,188	15,624	931	4,19	4,09	9,34	191,7	31,8	83,0
		0,219	15,562	913	4,19	4,07	10,86	190,2	36,9	82,4
		0,238	15,524	902	4,19	4,06	11,78	189,3	40,1	82,0
	10	0,250	15,500	895	4,19	4,06	12,37	188,7	42,1	81,7
		0,281	15,438	877	4,19	4,04	13,88	187,2	47,2	81,1
		0,312	15,375	859	4,19	4,02	15,40	185,7	52,4	80,4
		0,344	15,312	842	4,19	4,01	16,92	184,1	57,5	79,7
	30 ST	0,375	15,250	825	4,19	3,99	18,41	182,7	62,6	79,1
		0,406	15,188	808	4,19	3,98	19,89	181,2	67,6	78,4
		0,438	15,124	791	4,19	3,96	21,41	179,6	72,8	77,8
		0,469	15,062	775	4,19	3,94	22,88	178,2	77,8	77,2
	40 XS	0,500	15,000	759	4,19	3,93	24,35	176,7	82,8	76,5
		0,531	14,938	744	4,19	3,91	25,81	175,3	87,7	75,9
		0,656	14,688	684	4,19	3,85	31,62	169,4	107,5	73,4
		0,688	14,625	669	4,19	3,83	33,07	168,0	112,4	72,7
	60	0,750	14,500	641	4,19	3,80	35,90	165,1	127,5	71,5
		0,843	14,314	601	4,19	3,75	40,14	160,9	136,5	69,7
		1,031	13,938	526	4,19	3,65	48,48	152,6	164,8	66,1
		1,218	13,564	459	4,19	3,55	56,56	144,5	192,3	62,6
1,438		13,124	389	4,19	3,44	65,79	135,3	223,7	58,6	
1,500		13,000	371	4,19	3,40	68,33	132,7	232,3	57,5	
1,593		12,814	345	4,19	3,35	72,10	129,0	245,1	55,8	
18		SS	0,165	17,670	1723	4,71	4,63	9,24	245,2	31,4
	10S	0,188	17,624	1700	4,71	4,61	10,52	243,9	35,8	106,6
	10	0,250	17,500	1641	4,71	4,58	13,94	240,5	47,4	104,1
	20	0,312	17,375	1584	4,71	4,55	17,36	237,1	59,0	102,7

**Continuación Tabla E.4...**

Tamaño nominal de tubería y diámetro externo pulgadas	Número de calibre y/o peso	Espesor de pared Pulg t	Diámetro interno Pulg d	Quinta potencia de D.I miles Pulg <sup>5</sup> d <sup>5</sup>	Áreas y pesos						
					Área de superficie del tubo		Sección Transversal		Peso de		
					Externa Pie <sup>2</sup> por Pie Ao	Interna Pie <sup>2</sup> por Pie Ai	Área Metálica Pulg <sup>2</sup> A	Área de flujo Pulg <sup>2</sup> Af	Tubería Lb. por Pie W	Agua Lb por Pie Ww	
D =18,000	ST	0,375	17,250	1527	4,71	4,52	20,76	233,7	70,6	101,2	
	30	0,438	17,124	1472	4,71	4,48	24,17	230,3	82,2	99,7	
	XS	0,500	17,000	1420	4,71	4,45	27,49	227,0	93,5	96,3	
		0,562	16,876	1369	4,71	4,42	30,97	223,7	104,7	96,9	
	40	0,594	16,813	1344	4,71	4,40	32,46	222,0	110,4	96,1	
		0,625	16,750	1318	4,71	4,39	34,12	220,4	116,0	95,4	
		0,719	16,562	1247	4,71	4,34	38,98	215,5	132,5	93,3	
		60	0,750	16,500	1223	4,71	4,32	40,64	213,8	138,2	92,6
			0,812	16,375	1177	4,71	4,29	43,87	210,6	149,2	91,2
		80	0,937	16,126	1090	4,71	4,22	50,23	204,2	170,8	88,4
	100	1,156	15,680	950	4,71	4,11	61,71	193,3	208,0	83,7	
	120	1,375	15,250	825	4,71	3,99	71,81	182,2	244,2	79,1	
	140	1,562	14,870	728	4,71	3,89	80,66	173,8	274,3	75,3	
	160	1,688	14,625	669	4,71	3,83	86,48	168,0	294,0	72,7	
		1,781	14,438	627	4,71	3,78	90,75	163,7	308,5	70,9	
	D =20,000	SS	0,188	19,624	2,91	5,24	5,14	11,70	302,5	39,8	131,0
10S		0,218	19,564	2,87	5,24	5,12	13,55	300,6	46,1	131,0	
10		0,250	19,500	2,82	5,24	5,11	15,51	298,6	52,7	129,3	
		0,312	19,375	2,73	5,24	5,07	19,36	294,8	65,8	127,6	
20 ST		0,375	19,250	2,64	5,24	5,04	23,12	291,0	78,6	126,0	
		0,438	19,124	2,56	5,24	5,01	26,9	287,2	91,5	124,4	
30 XS		0,500	19,000	2,48	5,24	4,97	30,6	283,5	122,9	120,4	
		0,562	18,875	2,40	5,24	4,94	34,3	279,8	116,8	121,2	
40		0,593	18,814	2,36	5,24	4,93	36,2	278,0	122,9	120,4	
		0,625	18,750	2,32	5,24	4,91	38,0	276,1	129,3	119,6	
		0,812	18,376	2,10	5,24	4,81	48,9	265,2	166,4	114,8	
		0,875	18,250	2,02	5,24	4,78	52,6	261,6	178,7	113,3	
60		0,906	18,188	1,99	5,24	4,76	54,3	259,8	184,8	112,5	
		1,031	17,938	1,86	5,24	4,70	61,4	252,7	208,9	109,4	
30		1,031	17,938	1,86	5,24	4,70	61,4	252,7	208,9	109,4	
100		1,281	17,438	1,61	5,24	4,57	75,3	238,8	256,1	103,4	

Continuación Tabla E.4...

Tamaño nominal de tubería y diámetro externo pulgadas	Número de calibre y/o peso	Espesor de pared Pulg t	Diámetro interno Pulg d	Quinta potencia de D.I miles Pulg <sup>5</sup> d <sup>5</sup>	Áreas y pesos						
					Área de superficie del tubo		Sección Transversal		Peso de		
					Externa Pie <sup>2</sup> por Pie Ao	Interna Pie <sup>2</sup> por Pie Ai	Área Metá- lica Pulg <sup>2</sup> A	Área de flujo Pulg <sup>2</sup> Af	Tubería Lb. por Pie W	Agua Lb por Pie Ww	
	120	1,500	17,000	1,42	5,24	4,45	87,2	227,0	296,4	98,3	
	140	1,750	16,500	1,22	5,24	4,32	100,3	213,8	341,1	92,6	
		1,844	16,313	1,16	5,24	4,27	105,2	209,0	357,5	90,5	
	180	1,000	16,054	1,07	5,24	4,21	111,5	202,7	379,1	87,8	
D= 22,000	10	0,250	21,500	4,59	5,76	5,63	17,1	363	58,1	157,2	
		0,312	21,376	4,46	5,76	5,60	21,5	359	72,3	156,6	
	ST	0,375	21,250	4,43	5,76	5,56	25,5	355	86,6	153,6	
	XS	0,500	21,000	4,06	5,76	5,50	33,8	346	114,8	150,0	
		0,625	20,750	3,85	5,76	5,43	42,0	338	142,7	146,4	
		0,750	20,500	3,62	5,76	5,37	50,1	330	170,2	142,9	
		0,875	20,500	3,41	5,76	5,30	58,1	322	197,4	139,5	
1,000	20,000	3,20	5,76	5,24	66,0	314	224,3	136,0			
D =24,000	10	SS	23,564	7,26	6,28	6,17	16,3	436	55,4	188,8	
		10 S	23,500	7,17	6,28	6,15	18,7	434	63,4	187,8	
		0,312	23,376	6,98	6,28	6,12	23,2	429	78,9	185,8	
	20	ST	23,250	6,79	6,28	6,09	27,08	425	94,6	183,8	
		0,438	23,125	6,61	6,28	6,05	32,4	420	110,1	181,9	
	XS	0,500	23,000	6,44	6,28	6,02	36,9	415	125,5	179,9	
		30	0,562	22,876	6,26	6,28	5,99	41,4	411	140,7	178,0
		0,625	22,750	6,09	6,28	5,96	45,9	406	156,0	176,0	
	40	0,678	22,626	5,93	6,28	5,92	50,3	402	171,1	174,1	
		0,750	22,500	5,77	6,28	5,89	54,8	398	186,3	172,2	
		60	0,968	22,064	5,23	6,28	5,78	70,0	3,82	238,1	165,6
		1,031	21,938	5,08	6,28	5,74	74,4	378	252,9	163,7	
	80	1,218	21,564	4,06	6,28	5,65	87,2	365	296,4	158,1	
	100	1,531	20,938	4,02	6,28	5,48	106,1	344	367,4	149,1	
	120	1,812	20,376	3,51	6,28	5,33	126,3	326	429,4	141,2	
	140	2,062	19,876	3,10	6,28	5,20	142,1	310	483,2	134,3	
	2,188	19,625	2,91	6,28	5,14	149,9	302	509,7	131,0		
160	2,343	19,314	2,69	6,28	5,06	159,4	293	542,0	126,9		

Continuación Tabla E.4...

Tamaño nominal de tubería y diámetro externo pulgadas	Número de calibre y/o peso	Espesor de pared Pulg t	Diámetro interno Pulg d	Quinta potencia de D.I miles Pulg <sup>5</sup> d <sup>5</sup>	Áreas y pesos					
					Área de superficie del tubo		Sección Transversal		Peso de	
					Externa Pie <sup>2</sup> por Pie Ao	Interna Pie <sup>2</sup> por Pie Ai	Área Metálica Pulg <sup>2</sup> A	Área de flujo Pulg <sup>2</sup> Af	Tubería Lb. por Pie W	Agua Lb. por Pie Ww
26  D =26,000	ST	0,312	25,376	10,52	6,81	6,64	25,2	506	85,7	219,0
		0,375	25,250	10,26	6,81	6,61	30,2	501	102,6	216,8
		0,438	25,124	10,01	6,81	6,58	35,2	496	119,6	214,7
	XS	0,500	25,000	9,77	6,81	6,54	40,1	491	136,2	212,5
		0,562	24,876	9,53	6,81	6,51	44,9	486	152,7	210,4
		0,625	24,750	9,29	6,81	6,48	49,8	481	169,4	208,3
		0,656	24,688	9,17	6,81	6,46	52,2	479	177,6	207,3
		0,750	24,500	8,83	6,81	6,41	59,5	471	202,3	204,1
		0,812	24,376	8,61	6,81	6,38	64,3	467	218,5	202,1
		0,875	24,250	8,39	6,81	6,35	69,1	462	234,8	200,0
0,938	24,124	8,17	6,81	6,32	73,9	457	251,2	197,9		
28  D =28.000	ST	0,312	27,376	15,38	7,33	7,17	27,1	589	92,3	254,9
		0,375	27,250	15,03	7,33	7,13	32,5	583	110,7	252,5
		0,438	27,124	14,68	7,33	7,10	37,9	578	128,9	250,2
	XS	0,500	27,000	14,35	7,33	7,07	43,2	573	146,9	247,9
		0,562	26,876	14,02	7,33	7,04	48,4	567	164,7	245,6
		0,625	26,750	13,70	7,33	7,00	53,8	562	182,8	243,4
		0,656	26,688	13,54	7,33	6,99	56,4	559	191,6	243,2
		0,750	26,500	13,07	7,33	6,94	64,2	552	218,3	238,8
		0,812	26,376	12,77	7,33	6,91	69,4	546	235,8	236,6
		0,875	26,250	12,46	7,33	6,87	74,6	541	253,5	234,3
0,938	26,124	12,17	7,33	6,84	79,7	536	271,1	232,1		
1,000	26,000	11,88	7,33	6,81	84,8	531	288,4	229,9		
30	SS	0,250	29,500	22,23	7,85	7,72	23,4	683	79,4	296,0
	10 10S	0,312	29,376	21,9	7,85	7,69	29,1	678	98,9	293,5
	ST	0,375	29,250	21,4	7,85	7,66	34,4	672	118,7	291,0
	20 XS	0,438	29,125	21,0	7,85	7,62	40,6	666	138,0	288,4
		0,500	29,000	20,5	7,85	7,59	46,3	661	157,6	286,0
	30	0,562	28,875	20,1	7,85	7,56	52,0	655	176,8	283,6
0,625	28,750	19,6	7,85	7,53	57,7	749	196,1	281,1		

**Continuación Tabla E.4...**

Tamaño nominal de tubería y diámetro externo pulgadas	Número de calibre y/o peso	Espesor de pared Pulg t	Diámetro interno Pulg d	Quinta potencia de D.I miles Pulg <sup>5</sup> d <sup>5</sup>	Áreas y pesos							
					Área de superficie del tubo		Sección Transversal		Peso de			
					Externa	Interna	Área Metálica	Área de flujo	Tubería	Agua		
					Pie <sup>2</sup> por Pie Ao	Pie <sup>2</sup> por Pie Ai	Pulg <sup>2</sup> A	Pulg <sup>2</sup> Af	Lb. por Pie W	Lb. por Pie Ww		
D =30,000		0,656	28,688	19,4	7,85	7,51	60,5	646	205,6	279,9		
		0,750	28,500	18,8	7,85	7,46	68,9	638	234,3	275,2		
		0,812	28,376	18,4	7,85	7,43	74,5	632	253,2	273,8		
		0,875	28,250	18,0	7,85	7,40	80,1	627	272,2	271,4		
		0,938	28,124	17,6	7,85	7,36	85,6	621	291,2	269,0		
		1,000	28,000	17,2	7,85	7,33	91,1	616	309,8	266,6		
D =32,000	32	ST	0,312	31,376	30,4	8,38	8,21	31,1	773	105,6	334,8	
			0,375	31,250	29,8	8,38	8,18	37,3	767	126,7	332,1	
			0,438	31,124	29,2	8,38	8,15	43,4	761	147,7	322,4	
		XS	0,500	31,000	28,6	8,38	8,12	49,5	755	168,2	326,8	
			0,562	30,876	28,1	8,38	8,08	55,5	749	188,7	324,2	
			0,625	30,750	27,5	8,38	8,05	61,6	743	209,5	321,6	
	0,656		30,688	27,2	8,38	8,03	64,6	740	219,6	320,3		
	0,750		30,500	26,4	8,38	7,98	73,6	731	250,3	316,4		
	0,812		30,376	25,9	8,38	7,95	79,6	725	270,5	313,8		
	D =34,000	34	ST	0,312	33,376	41,4	8,90	8,74	33,0	875	112,3	378,8
				0,375	33,250	40,6	8,90	8,70	39,6	868	134,7	376,0
				0,438	33,124	39,9	8,90	8,67	45,2	862	157,0	373,1
XS		0,500	33,000	39,1	8,90	8,64	52,6	855	178,9	370,3		
		0,562	32,876	38,4	8,90	8,61	59,0	849	200,7	367,6		
		0,625	32,750	37,7	8,90	8,57	65,5	842	222,8	364,8		
	0,656	32,688	37,3	8,90	8,56	68,7	839	233,6	363,4			
	0,750	32,500	36,3	8,90	8,51	78,3	830	266,4	359,2			
	0,812	32,376	35,6	8,90	8,48	84,7	823	287,9	356,5			
D =34,000	34	ST	0,875	32,250	34,9	8,90	8,44	91,1	817	309,6	353,7	
			0,938	32,124	34,2	8,90	8,41	97,4	810	331,3	350,9	
			1,000	32,000	33,6	8,90	8,38	103,7	804	352,5	348,2	

**Tabla E.5** Longitud y diámetro de las líneas troncales en el tramo de estudio

<b>TRAMO</b>	<b>TRONCAL</b>	<b>LONGITU D (m)</b>	<b>NPS (in)</b>
<b>EM1-SM1</b>	<b>51 (Roja)</b>	37	3
<b>EM1-SM1</b>	<b>52 (Azul)</b>	34	
<b>EM1-SM1</b>	<b>53 (Verde)</b>	40	12-
<b>EM1-SM1</b>	<b>54x26</b>	40,80	2
<b>EM1-SM1</b>	<b>54x2x16</b>	38,80	1
<b>EM1-SM1</b>	<b>54x2x16 (Marrón)</b>	31	12- 16
<b>SM1-M2</b>	<b>51 (Roja)</b>	99,40	2
<b>SM1-M2</b>	<b>52 (Azul)</b>	121,45	1
<b>SM1-M2</b>	<b>53 (Verde)</b>	94,34	1
<b>SM1-M2</b>	<b>54x26</b>	103,20	2
<b>SM1-M2</b>	<b>54x2x16</b>	99,60	1
<b>SM1-M2</b>	<b>54x2x16 (Marrón)</b>	99,80	1 6



**Tabla E.6.** Presión de Trabajo Máxima Permisible según Norma A.S.M.E

B.16.5

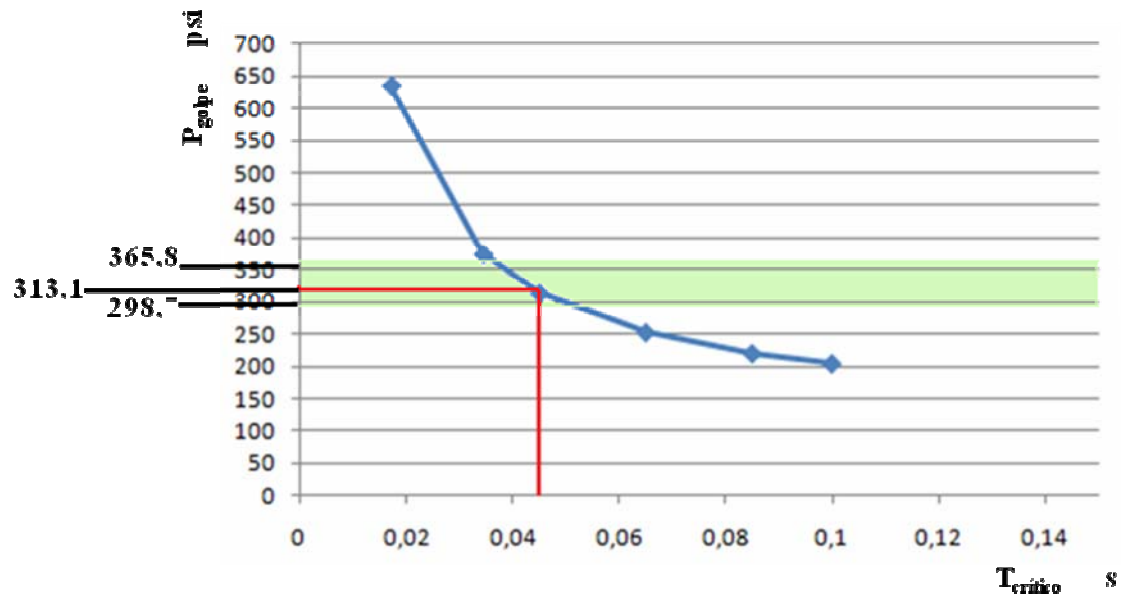
Nominal Designation	Forgings		Castings			Plates	
C-Si	A 105 (1)		A 216 Gr. WCB (1)			A 515 Gr. 70 (1)	
C-Mn-Si	A 350 Gr. LF2 (1)					A 516 Gr. 70 (1), (2)	
C-Mn-Si-V	A 350 Gr. LF6 Cl. (4)						
3 <sup>1</sup> / <sub>2</sub> Ni	A 350 Gr. LF3					A 537 Cl. 1 (3)	
Working Pressure by Classes, bar							
Class							
Temp., °C	150	300	400	600	900	1500	2500
-29 to 38	19.6	51.1	68.1	102.1	153.2	255.3	425.5
50	19.2	50.1	66.8	100.2	150.4	250.6	417.7
100	17.7	46.6	62.1	93.2	139.8	233.0	388.3
150	15.8	45.1	60.1	90.2	135.2	225.4	375.6
200	13.8	43.8	58.4	87.6	131.4	219.0	365.0
250	12.1	41.9	55.9	83.9	125.8	209.7	349.5
300	10.2	39.8	53.1	79.6	119.5	199.1	331.8
325	9.3	38.7	51.6	77.4	116.1	193.6	322.6
350	8.4	37.6	50.1	75.1	112.7	187.8	313.0
375	7.4	36.4	48.5	72.7	109.1	181.8	303.1
400	6.5	34.7	46.3	69.4	104.2	173.6	289.3
425	5.5	28.8	38.4	57.5	86.3	143.8	239.7
450	4.6	23.0	30.7	46.0	69.0	115.0	191.7
475	3.7	17.4	23.2	34.9	52.3	87.2	145.3
500	2.8	11.8	15.7	23.5	35.3	58.8	97.9
538	1.4	5.9	7.9	11.8	17.7	29.5	49.2
NOTES:							
(1) Upon prolonged exposure to temperatures above 425°C, the carbide phase of steel may be converted to graphite. Permissible but not recommended for prolonged use above 425°C.							
(2) Not to be used over 455°C.							
(3) Not to be used over 370°C.							
(4) Not to be used over 260°C.							

**1bar = 14,50 psi**

**APÉNDICE F**  
**(TABLAS Y GRAFICAS DEL TIEMPO CRÍTICO ( $T_{\text{crítico}}$ ) PARA LA**  
**CONTINGENCIA POR GOLPE DE ARIETE)**

**Tabla F.1.** Tiempo crítico para la Troncal 54x26 (Morado), en el estudio de la contingencia de golpe de ariete.

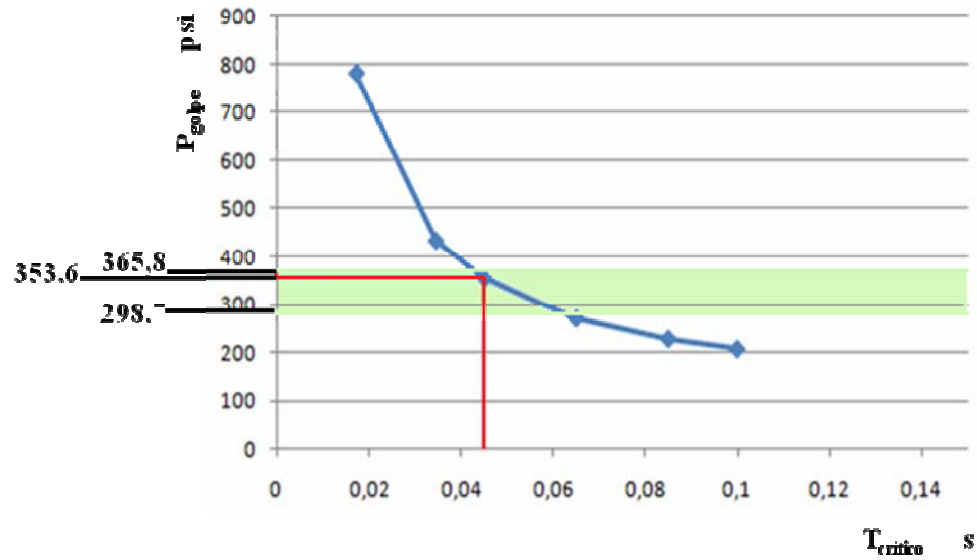
$T_{\text{crítico}}$ (s)	$P_{\text{golpe}}$ (psi)
0,0172	634,7
0,0345	373,8
0,045	313,1
0,065	252,08
0,085	219,68
0,1	203,89



**Figura F.1.** Grafica de la presión producida por el golpe de ariete vs el tiempo crítico para la Troncal 54x26 (Morado)

**Tabla F.2.** Tiempo crítico para la Troncal 54x2x16 (Blanca), en el estudio de la contingencia de golpe de ariete.

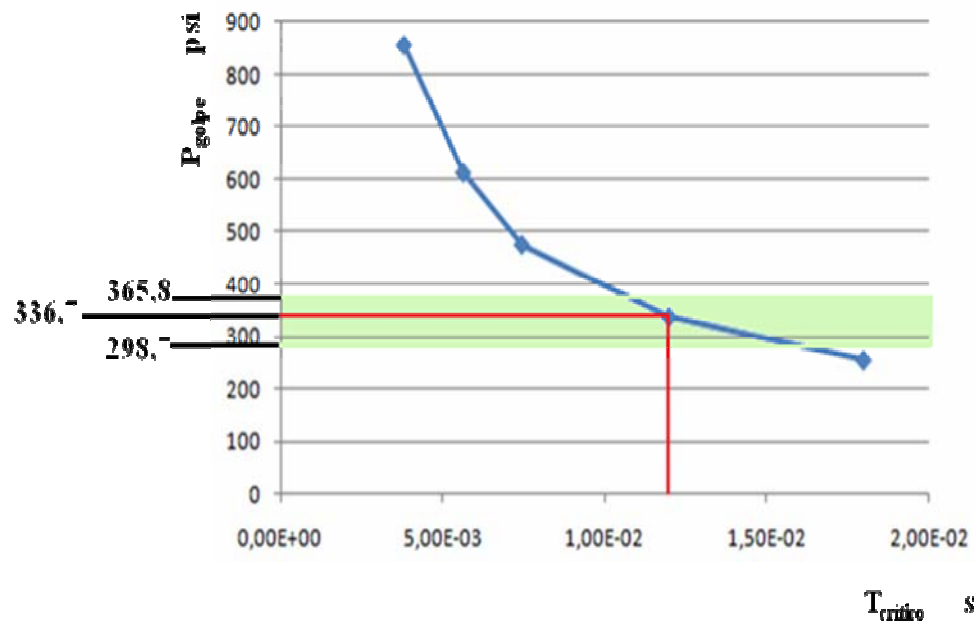
<b>T<sub>crítico</sub> (s)</b>	<b>P<sub>golpe</sub> (psi)</b>
0,0172	779,4
0,0345	433,8
0,045	353,6
0,065	272,5
0,085	229,58
0,1	208,66



**Figura F.2.** Grafica de la presión producida por el golpe de ariete vs el tiempo crítico para la Troncal 54x2x16 (Blanca)

**Tabla F.3.** Tiempo crítico para la Troncal 54x2x16 (Marrón), en el estudio de la contingencia de golpe de ariete.

$T_{critico}$ (s)	$P_{golpe}$ (psi)
$3,82 \times 10^{-3}$	854,2
$5,65 \times 10^{-3}$	611,2
$7,64 \times 10^{-3}$	475,8
$1,2 \times 10^{-2}$	336,7
$1,8 \times 10^{-2}$	254,7



**Figura F.3.** Grafica de la presión producida por el golpe de ariete vs el tiempo crítico para la Troncal 54x2x16 (Marrón)

## **APÉNDICE G**

**(PLANOS GENERADOS MEDIANTE EL AUTOCAD 2006)**

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

<b>TÍTULO</b>	<b>“EVALUACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE ALIVIO DE PRESIÓN EN LOS MÚLTIPLES 1 y 2, DEL PATIO DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE LA REFINERÍA PUERTO LA CRUZ”</b>
<b>SUBTÍTULO</b>	

**AUTOR (ES):**

<b>APELLIDOS Y NOMBRES</b>	<b>CÓDIGO CULAC / E MAIL</b>
<b>MATA M., GERMÁN A.</b>	<b>CVLAC: 17.417.913 E MAIL: mmga_20_6@hotmail.com</b>
	<b>CVLAC: E MAIL:</b>

**PALÁBRAS O FRASES CLAVES:**

SISTEMA DE ALIVIO

PRESIÓN

MÚLTIPLES

PATIO DE TANQUES

ALMACENAMIENTO



METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUBÁREA
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS	INGENIERÍA MECÁNICA

RESUMEN (ABSTRACT):

En este trabajo se presenta una evaluación hidráulica de los sistemas de alivio de presión en los Múltiples 1 y 2 del área de recepción, almacenaje y entrega de crudos de la Refinería Puerto La Cruz. El desarrollo del proyecto se inició a partir de visitas de campo donde se describieron las condiciones del sistema actual de alivio así como también se obtuvieron datos de operación para las troncales que están asociadas al sistema de alivio de presión en los Múltiples 1 y 2. Luego, se identificaron las diferentes contingencias que generan sobrepresión en los Múltiples 1 y 2 y se determinaron las cargas de alivio mediante el uso de las Normas API 520 y 521. Aunado a esto se calcularon las caídas de presión en cada Troncal con la ayuda del simulador PIPEPHASE VERSION 9.1; se seleccionaron las diferentes válvulas a ubicarse en el sistema de alivio de presión según la Norma API 520 y 521, igualmente se calcularon las nuevas caídas de presión en cada línea del sistema con las válvulas seleccionadas mediante el simulador comercial y se actualizaron los planos de ubicación de las válvulas en cada línea de crudo que pasan por los Múltiples 1 y 2, utilizando el software AUTOCAD 2006. En esta evaluación, se encontró que las contingencias que generaron sobrepresión se debió a la de expansión térmica y golpe de ariete; el caudal máximo desalojado por las válvulas de alivio fue de 0,221 m<sup>3</sup>/s (3502,92 gpm) en la Troncal 54x2x16 (Blanca). Los diámetros de las nuevas válvulas de alivio fueron mayores en el Múltiple 2; cumpliendo con lo referido a las Normas API 520 y 521.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Prof. Martínez Johnny	AS	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	8.340.871			
	E_MAIL	Johnnymartinr@gmail.com			
	E_MAIL				
Prof. Rengel José E.	JU	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	9.278.475			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Prof. Ayala Orlando	JU	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	11.420.758			
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

AÑO	MES	DÍA
2010	05	19

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.Mata.doc	application/msword
TESIS.Mata.dwg	application/acad

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

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO MECÁNICO

---

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PREGRADO

---

ÁREA DE ESTUDIO:

INGENIERÍA MECÁNICA

---

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

---

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del Reglamento de Trabajo de Grado:

*“Los trabajos son propiedad exclusiva de la Universidad de Oriente, y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento expreso del Consejo de Núcleo respectivo, quien participará al Consejo de Universidades”*

**AUTOR**

---

**Mata M. Germán A.**

**TUTOR**

**JURADO**

**JURADO**

---

**Prof. Johnny Martínez.**

**Prof. José Rengel**

**Prof. Orlando Ayala**

**POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS**

---

**Prof. Diógenes Suarez**