

5



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

CAMPUS ARAGON

"IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONDUCCION POR DUCTO PARA HIDROCARBUROS LIQUIDOS, ENTRE LA REFINERIA FRANCISCO I. MADERO Y LA TERMINAL DE ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCION DE SAN LUIS POTOSI".

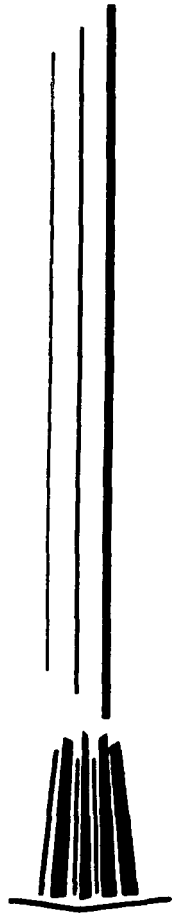
T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICO  
P R E S E N T A N :  
LUIS ANTONIO <sup>ARISTE</sup> LUGO/  
EARL MARCO A. SALINAS GONZALEZ

ASESOR:  
ING. PATROCINIO ARROYO HERNANDEZ

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D.F.

2002





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**Gracias.**

A Dios.

A nuestra querida Universidad.

A Santa.

A Mari, Lino y Hannia por su apoyo incondicional.

A Rosa, Arturo y Diana por su gran apoyo.

A nuestros profesores por sus valiosos comentarios en especial a nuestros sinodales e ing. Patrocinio Arroyo.

A los departamentos de las subgerencias de distribución y operación y a la subgerencia de medición de Pemex Refinación, en especial a los ingenieros Alfredo Arriaga Aldana, Javier Ortíz, Mario Ortega Pérez y Arturo Rodríguez por sus valiosos Comentarios y apoyo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# Índice

## Prefacio.

### Capítulo 1

#### Consideraciones Generales.

1.1	Introducción.	1
1.2	Importancia y Desarrollo de la Red De Ductos en Pemex.	1
1.3	Desarrollo de los Poliductos en Pemex.	3
1.4	Situación Actual del Transporte y Conducción de Destilados a las Terminales de Almacenamiento y Distribución en San Luis Potosí.	4
1.5	Normatividad y Marco Gubernamental	7
1.5.1	Marco Gubernamental.	7
1.5.2	Norma CID-NOR-07.3.13.	13
1.6	Planeación Económica.	15
1.7	Identificación y Planteamiento del Problema.	18

### Capítulo 2.

#### Conceptos Fundamentales en la Conducción de Hidrocarburos Líquidos.

2.1	Introducción	20
2.2	Propiedades de los Líquidos.	20
2.3	Presión.	25
2.4	Características del Escurrimiento.	28
2.5	Características de los Ductos.	30
2.6	Ecuaciones Fundamentales.	37
2.7	Fenómenos Transitorios.	45
2.8	Calculo del Gasto de Diseño.	49

### Capítulo 3.

#### Bombas, Tuberías y Válvulas para Hidrocarburos Líquidos.

3.1	Bombas Roto Dinámicas.	55
3.1.1	Definición.	55
3.1.2	Clasificación.	55
3.1.3	Elementos Constitutivos.	56
3.1.4	Pérdidas, Potencias Y Rendimiento.	57
3.1.4.1	Perdidas.	57
3.1.4.2	Pérdidas Hidráulicas.	57
3.1.4.3	Pérdidas Volumétricas.	57
3.1.4.4	Pérdidas Mecánicas.	58
3.1.5	Potencia y Rendimiento.	58
3.1.5.1	Potencia de Accionamiento, $P_a$	58
3.1.5.2	Potencia Interna, $P_i$	59
3.1.5.3	Potencia Útil, $P_u$	59
3.1.6	Rendimiento.	59
3.1.6.1	Rendimiento Hidráulico $\eta_H$	59
3.1.6.2	Rendimiento Volumétrico, $\eta_V$	59
3.1.6.3	Rendimiento Interno, $\eta_i$	60
3.1.6.4	Rendimiento Mecánico $\eta_M$	60
3.1.7	Terminología.	60
3.1.7.1	Columna o Carga Total de Bombeo.	60
3.1.7.2	Carga Neta de Succión Positiva (CNPS O NPSH).	64

TEXOS CON  
FALLA DE ORIGEN

3.1.7.3 CNSP Disponible en Casos Típicos.	65
3.1.8 Uso de Curvas.	66
3.1.9 Curva Característica de la Bomba.	66
3.1.10 Curva del Sistema.	68
3.1.11 Operación en Paralelo o en Serie.	69
3.1.12 Punto de Operación.	69
3.1.13 Punto de Corte.	70
3.1.14 Cambios de Columna.	71
3.1.15 Especificaciones de la Columna de la Bomba.	71
3.2 Tuberías.	71
3.2.1 Tuberías Usadas en Sistemas de Abastecimiento de Combustibles.	72
3.2.2 Tubería de Acero.	72
3.2.3 Observaciones y Recomendaciones para la Selección de Tubería.	73
3.2.4 Piezas Especiales y Dispositivos de Control de Flujo.	73
3.2.5 Tipo de Válvula.	74
3.2.6 Válvulas Eliminadoras de Aire.	76
3.2.7 Válvulas de Retención.	78
3.2.8 Válvulas de Mariposa.	79
3.2.9 Válvulas de Globo	79
3.2.10 Válvulas de Compuerta.	79
3.2.11 Válvulas de Alivio Contra Golpe de Ariete.	83
3.3 Selección de Válvulas.	84
3.3.1 Capacidades de Presión y Temperatura.	85
3.3.2 Material de Empaquetaduras y Juntas.	85
3.3.3 Mecanismos de Control de Flujo.	85
3.2.4 Materiales de Construcción.	86

#### Capítulo 4.

##### Diseño de la Línea de Conducción.

4.1 Flujo De Hidrocarburos en la Línea de Conducción.	87
4.2 Localización.	87
4.3 Propiedades de los Líquidos a Conducir.	88
4.4 Determinación del Gasto.	89
4.4.1 Método Anitmético.	90
4.4.2 Expectativas de Demandas para las TADs de San Luis Potosí.	90
4.5 Calculo del Diámetro Para la Línea de Conducción.	92
4.6 Gradiente Hidráulico.	93
4.7 Curva del Sistema.	99
4.8 Selección de la Bomba.	106
4.9 Selección del Motor Eléctrico.	110
4.10 Ruta Propuesta para el Poliducto Madero-San Luis.	112
4.11 Análisis de Costos de la Línea de Conducción y Transportación por auto tanque.	113

#### Capítulo 5

##### Operación y Mantenimiento.

5.1 Operación de la Línea de Conducción.	116
5.2 Filosofía del Mantenimiento.	116
Conclusiones.	123
Anexos.	124
Bibliografía.	127



## **Prefacio.**

El presente trabajo surgió del proyecto que realizará Pemex Refinación, cuyo objetivo es conducir gasolina y diesel de la Refinería Francisco I. Madero en Cd. Madero Tamaulipas a una Terminal de Almacenamiento y Distribución en san Luis Potosí por medio de la construcción de un ducto.

Este proyecto surge de la necesidad de satisfacer las demandas de estos hidrocarburos en San Luis Potosí y sus áreas de influencia, ya que el actual sistema logístico de "carro tanque y "auto tanque no alcanza a cubrir las demandas de estos importantes energéticos.

El alcance de nuestro trabajo es proporcionar una guía de fácil consulta para todo el que necesite realizar un trabajo parecido y no sepa como iniciarlo. A demás de tratar de aportar una posible solución a los problemas de abasto de estos hidrocarburos; proponiendo una disposición oportuna del combustible; Reducir los costos de abastecimiento de: gasolinas y diesel a las ciudades del estado de San Luis Potosí y sus áreas de influencia, así como sustituir el movimiento de productos por auto tanques y carro tanques, por la conducción por ducto hasta San Luis Potosí.

En el capítulo uno, comentamos la historia de los sistemas de conducción por ductos, así como, el desarrollo de los poliductos (del cual tratara el tema, ya que a este tipo de ducto se le nombra poliducto). La situación actual del abastecimiento de gasolina y diesel a San Luis Potosí, S.L.P. La Normatividad y las dependencias de administración pública que regulan este tipo de obras, así como el planteamiento del problema.

El capítulo dos se mencionan conceptos fundamentales que influyen en la conducción de líquidos a través de un conducto cerrado.

El capítulo tres, da una idea general de los conceptos más importantes de las bombas, tubos y válvulas empleadas en la propuesta.

La parte medular del trabajo es el capítulo cuatro, en donde proponemos un método sencillo para calcular: gastos de diseño; el diámetro de la tubería así como su espesor; la capacidad de las bombas con sus respectivos motores eléctricos.

El capítulo cinco se explica de una manera muy general la operación y el mantenimiento. Pero debe tomarse en cuenta que estos dos apartados pueden considerarse como un tema de tesis ya que son bastante amplios.

La idea de desarrollar un tema de esta naturaleza surgió debido a que tuvimos la fortuna de que se nos diera acceso a la información (que es bastante y esta celosamente guardada), y nuestro objetivo es brindar una guía y proporcionar información difícil de obtener (como el caso de las curvas de una bomba). Así como cooperar con el desarrollo de este proyecto cuya principal meta es el de disminuir los costos e transportación y mantener un abastecimiento constante de estos energéticos al estado de San Luis Potosí.

Cabe mencionar que un proyecto de tales magnitudes es de carácter multidisciplinario y debido a esto, varios departamentos de ingeniería de Pemex se involucran y encargan de desarrollarlo y ponerlo en marcha. Por esto en el presente trabajo solo nos enfocaremos al diseño del ducto.

Para iniciar con nuestro tema, justificaremos un término que utilizaremos en nuestro trabajo, que es el de conducción:

---

<sup>1</sup> Por medio de ferrocarril.

<sup>2</sup> Por medio de Pipa.



¿Porque utilizamos el término conducción?:

En el lenguaje cotidiano de la industria, no solo de la petroquímica, se toman como sinónimos transportación y conducción de un líquido. Pero debemos tomar en cuenta que los líquidos se conducen en cauces abiertos o cerrados y tienen la capacidad de ser un medio por el cual se pueden transportar otros elementos; Como ejemplo, citamos el caso de un aserradero que se auxilia de un río para poder transportar los troncos que posteriormente procesara.

Entonces, al querer distribuir un líquido a otro lugar, nosotros nos auxiliamos de materiales y equipo para cumplir nuestro cometido. Al realizar este trabajo, nosotros estamos canalizando o conduciendo el líquido a través de una red construida por tubos de acero al carbón y que en su conjunto integran un ducto (que en Pemex Refinación se le llama Poliducto por el hecho de que en él se conducirán varios tipos de hidrocarburos líquidos, en nuestra propuesta del proyecto solo se conducirá Gasolina y Diesel).

Por ello optamos por emplear el término conducción para ser más específicos en nuestra propuesta.

Con el desarrollo de éste trabajo se espera que su utilización sea para beneficio de la población ( por un abastecimiento oportuno de los combustibles tan indispensables en su vida cotidiana) y para PEMEX, puesto que tendría un ahorro en sus gastos de transportación y una simplificación considerable en el movimiento de sus productos, puesto que estos representan su principal fuente de ingresos y son de gran utilidad en el progreso económico del país.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

# C A P I T U L O 1

## Consideraciones Generales.

### 1.1 Introducción.

Para satisfacer las necesidades de hidrocarburos a los centros de demanda, en Pemex ha sido necesario rehabilitar y construir una extensa red de ductos, debido a que los centros de consumo también son los de más abundante población, con mayor desarrollo industrial y distanciamiento de los centros de producción.

La población nacional, que de cuarenta millones en 1960 se duplicó a ochenta millones a principios de la década de los '80, y el afortunado boom petrolero de México entre la década de los '70 e inicio de los '80, dio lugar al notable incremento de centros de transformación industrial, para satisfacer la demanda externa e interna de energéticos.

Así nacieron las refinerías de: Tula, Cadereyta y Salina Cruz. Los complejos petroquímicos en los alrededores de Coatzacoalcos y Minatitlán, así como las plantas petroquímicas en: Salamanca, San Martín Texmelucan, Camargo, Madero, Topolobampo, Lázaro Cárdenas y Guaymas; y con el surgimiento de estos complejos, creció la necesidad de transportar los productos petrolíferos transformados. Por tierra son llevados en carro-tanque(Tren), en Auto-tanque (camión sistema); o conducidos en ducto.

Los Ductos, son un medio de conducción eficiente, abasteciendo a los centros de almacenamiento y distribución a tiempo sin importar condiciones climatológicas, ni las variaciones de gasto requeridas. Además no contaminan la atmósfera ni modifican la ecología, contribuyen a descongestionar el transporte terrestre, garantizan el abastecimiento de combustibles con la calidad solicitada por el mercado y satisfacen la demanda al mínimo costo del suministro. Se tienden sobre la superficie a nivel de tierra natural o si es necesario sepultados en una sepa. El tendido se realiza salvando los obstáculos topográficos que condicionan el trazo (ríos, lagunas, pantanos, barrancos, canales, carreteras y vías de ferrocarril).

Para Pemex el sistema de ductos es de vital importancia para ofrecer un servicio eficiente económico y oportuno en el suministro de hidrocarburos, por lo cual uno de sus principales retos es mantener en óptimas condiciones su infraestructura y funcionamiento, así como aumentar el número de redes de conducción de combustibles.

En la red de ductos actualmente se transportan diariamente a través de casi todo lo largo y ancho de México, alrededor de tres millones de barriles de petróleo crudo, un millón y medio de barriles de petrolíferos, como gasolinas, diesel, combustóleo, querosina y turbosina; Además del equivalente de cinco mil millones de pies cúbicos de gas.

### 1.2 Importancia y Desarrollo de la Red de Ductos en Pemex.

En 1915 se concluye el primer sistema de oleoductos en Cerro Azul, Ver., llegando a Tampico, Tams. con una longitud de 150 Km Para el año de 1921, México producía un volumen cercano a 530 MBD, situación asociada con el crecimiento de la infraestructura de transporte por ducto y Buque tanque. De igual forma, el consumo de petrolíferos para la mitad de la década de los años 30's, estaba en el orden de 440 MBD dentro de lo que figuraban principalmente: Combustóleo, Gasóleo y Gasolina. En 1930, se inicia el transporte y distribución de gas natural a lo largo de 155 Km de gasoductos tendidos en Cd. Alemán, Ver. y Monterrey, N.L.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Con el desarrollo de la explotación de crudo en México y hasta antes de la Expropiación Petrolera en 1938, se llegó a tener casi 5000 Km de oleoductos propiedad de compañías extranjeras destinados principalmente al transporte y recolección de petróleo crudo.

A partir de la década de los años 50's, debido al alto desarrollo industrial en la zona norte del país, se incrementa sustancialmente la red de ductos, enfocados principalmente hacia el transporte de gas natural, como se observa en la figura 1.1

### Desarrollo de la Red de Ductos.

Año	Tipo Ducto	Diámetro (Pulg.)	Longitud (Km)	Ruta	Producto
1950	Gasoducto	20	250	Poza Rica - México	Gas Natural
1958	Gasoducto	22	225	Reynosa - Monterrey	Gas Natural
1958	Gasoducto	18	310	Monterrey - Torreón	Gas Natural
1958	Ramal	18	30	Ramal Saltillo	Gas Natural
1961	Gasoducto	24	713	Cd. Pemex - México	Gas Natural
1961	Gasoducto	24	713	Cd. Pemex - México	Gas Natural
1961	Poliducto	12	579	Minatitlán - México	Gasolina
1970	Poliducto	14	235	Salamanca - Guadaluajara	Varios
1970	Poliducto	12	470	Madero - Cadereyta	Varios
1975	Oleoducto	24	24	Poza Rica - Salamanca	Crudo
1975	Oleoducto	20	15	Poza Rica - Salamanca	Crudo
1975	Oleoducto	24	470	Madero - Cadereyta	Crudo
1976	Gasoducto	48	1102	Cactus, Chiapas - Los Ramones, N. L.	Gas Natural
1976	Oleoducto	30	363.2	Nuevo Teapa - Poza Rica	Crudo
1976	Poliducto	12	171	Tula - Salamanca	Varios
1976	Oleoducto	30	363	Nuevo Teapa - Poza Rica	Crudo
1977	Oleoducto	24	470	Madero - Cadereyta	Crudo
1979	Oleoducto	30	265	Nuevo Teapa - Salina Cruz	Crudo
1980	Poliducto	12	375	Chihuahua - Cd. Juárez	Destilados
1985	Poliducto	8	195	Salamanca - Aguascalientes	Varios
1988	Oleoducto	48	265	Nuevo Teapa - Salina Cruz	Crudo
1990	Poliducto	12	125	Aguascalientes - Zacatecas	Varios
1990	Poliducto	12	125	Salamanca - León - Aguascalientes	Varios
1994	Poliducto	16	171	Tula - Salamanca	Destilados

figura 1.1 Desarrollo de la conducción de hidrocarburos.

En 1950, inició sus operaciones el primer gasoducto propiedad de Pemex, construido a base de tubería de acero de 20 pulgadas y con una longitud de 250 Km de Poza Rica hasta el Valle de México, donde existía un consumo de 130 millones de pies cúbicos diarios.

De igual forma en 1958, entra en servicio el segundo Gasoducto propiedad de Pemex, para conducir gas de los yacimientos cercanos a Reynosa, Tams., hasta Monterrey, N.L., Saltillo y Torreón, Coah. y para la década de los años 70's y principios de los 80's, la Subdirección de Producción Primaria, incremento notablemente la red de ductos enfocada a la recolección de crudo y líquidos asociados, aumentando de 4 a 8 mil kilómetros su longitud instalada. El crecimiento de la red de transporte de gas fue de los 2000 Km que existían, a su máximo desarrollo con una longitud de 12, 000 Km.

Para la década de los 90's Pemex contaba con una extensión de 60 mil Km de ductos, aproximadamente, (ver figura 1.2). De estos, 5 mil corresponden a oleoductos de suministro a refinerías, 12 mil a gasoductos, 8 mil más a poliductos y 32 mil de ductos de transporte y recolección en las áreas de producción de crudo, además de los ductos existentes en los complejos petroquímicos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

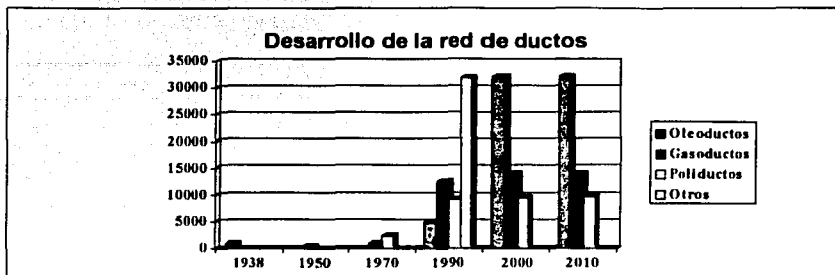


figura 1.2 Crecimiento de la longitud de ductos de 1938 al 2010.

### 1.3 Desarrollo de los Poliductos de Pemex Refinación.

La gerencia de transportación por Ducto perteneciente a la Subdirección de Distribución de Pemex – Refinación, administra opera y mantiene la principal red de Ductos para el transporte de productos. Esta gerencia tiene cuatro subgerencias regionales: norte, centro, golfo y sureste.

La red de Poliductos en operación está constituida por 8,230 kilómetros de ductos con diámetros entre cuatro y dieciocho pulgadas. Los poliductos están tendidos en 6,188 kilómetros de derechos de vía y se conducen 3.8 millones de barriles.

Los poliductos suministran productos destilados a 43 TADs<sup>1</sup> y dos terminales marítimas; asimismo, se transportan productos entre refinarias.

Durante 1999 por la red de poliductos se transporto un promedio de 1,497 miles de barriles por día (figura 1.3).

**4,416 Kilómetros de oleoductos, 31 estaciones de bombeo.  
8,230 Kilómetros de poliductos, 42 estaciones de bombeo.**

#### Transporte y Fletes ( 1999 )

	Transporte		Fletes
	MM Ton-Km	MBD	MM Dols.
<b>Oleoductos</b>	<b>33,365</b>	<b>1,289</b>	<b>163.2</b>
<b>Poliductos</b>	<b>8,202</b>	<b>1,497</b>	<b>120.2</b>
<b>Total</b>	<b>41,567</b>	<b>2,786</b>	<b>283.4</b>

figura 1.3 Volúmenes promedio de productos destilados conducidos durante 1999.

La red de poliductos está dividida en tres principales zonas (ver figura 1.4) que abastecen e interconectan a las siguientes instalaciones:

<sup>1</sup> Terminal de Almacenamiento y Distribución o Terminal de ventas.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

Red de Poliductos			
Zona	Refinerías (localidad)	Terminales de Ventas	Terminales Marítimas
Sureste - Golfo	Minatitlán, Ver. Salina Cruz, Oax.	10	2
Centro - golfo	Tula, Hgo. Salamanca, Gto.	17	-
Norte Pacifico	CD. Madero, Tamps. Cadereyta, N.L.	16	-

Figura: 1.4 principales zonas de distribución.

### 1.4 Situación actual del Transporte y Conducción de Destilados a las Terminales de Almacenamiento y Distribución de San Luis Potosí, Matehuala y Cd. Valles.

En el estado de San Luis Potosí, actualmente las demandas de gasolinas y Diesel (destilados) de las TADs SLP (capital de la entidad), TAD Matehuala, TAD Ciudad Valles y sus zonas de influencia, se satisfacen transportando por carretera, utilizando el auto-tanque, carro-tanques, empleando ferrocarril y una mínima parte conduciéndolo por ducto, procedentes de las refinerías de Madero, Cadereyta y Tula, así como de las TADs<sup>2</sup> de Aguascalientes, Zacatecas, Santa Catarina, Saltillo, Irapuato y Querétaro con los recorridos indicados en las figuras 1.5, 1.6, 1.7<sup>3</sup>.

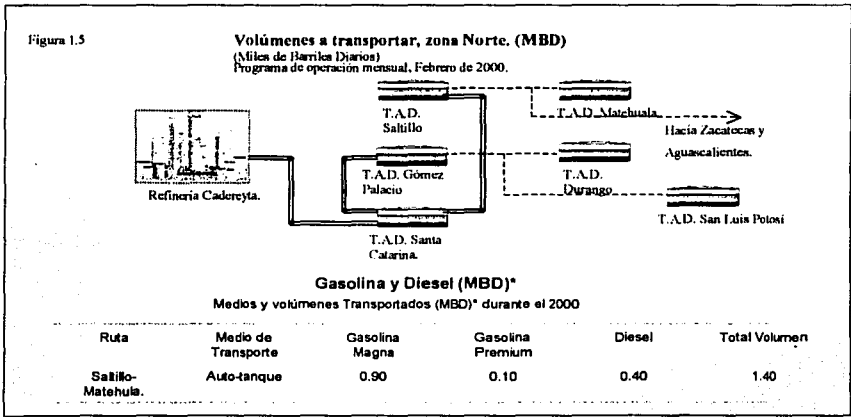


figura 1.5 Esquema que indica la distribución de las gasolinas y diesel a SLP y Matehuala.

<sup>2</sup> TADs Terminales de Almacenamiento y Distribución.  
<sup>3</sup> En la figura 1.6 se indica la simbología de las figuras 1.5, 1.6, 1.7

**TESIS CON FALLA DE ORIGEN**

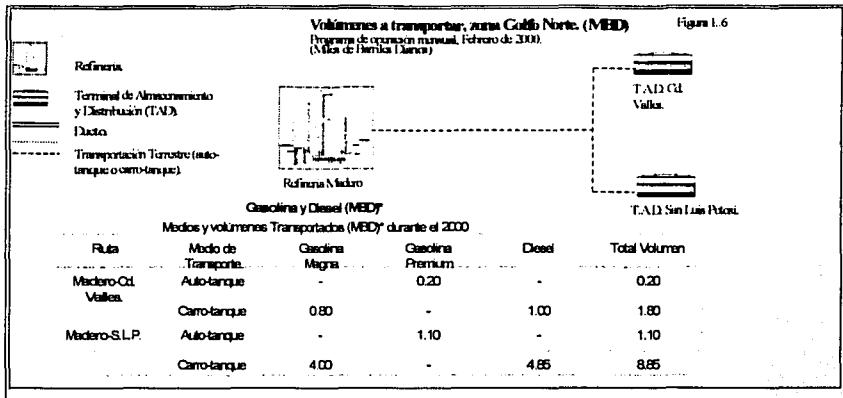


figura 1.6 Diagrama de distribución de combustibles a Cd. Valles y San Luis Potosí.

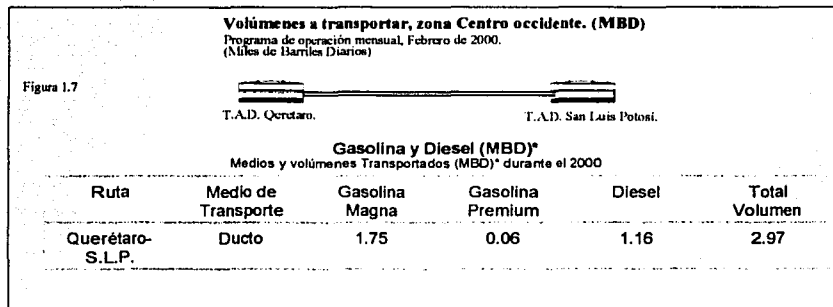


figura 1.7 Esquema que indica la distribución de combustibles a SLP.

En promedio se movilizan y conducen 8.91 Miles de barriles diarios de Gasolinas y 7.41 Miles de barriles diarios de Diesel como se indica en la figura 1.8. Para satisfacer las demandas de combustibles no solo se requieren suficientes unidades de transporte sino también un sistema de planeación y operación que pueda controlar estas unidades.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

<b>Medios y volúmenes Transportados (MBD)* durante el 2000</b>					
<b>Ruta</b>	<b>Medio de Transporte</b>	<b>Gasolina Magna</b>	<b>Gasolina Premium</b>	<b>Diesel</b>	<b>Total Volumen</b>
Salttillo-Matehuala.	Auto-tanque	0.90	0.10	0.40	1.40
Madero-Cd. Valles.	Auto-tanque	-	0.20	-	0.20
	Carro-tanque	0.80	-	1.00	1.80
Madero-S.L.P.	Auto-tanque	-	1.10	-	1.10
	Carro-tanque	4.00	-	4.85	8.85
Querétaro-S.L.P.	Ducto	1.75	0.08	1.16	2.97
<b>Total:</b>		<b>7.45</b>	<b>1.46</b>	<b>7.41</b>	<b>16.32</b>

figura 1.8 Volumen transportado de destilados a las Terminales de Almacenamiento y Distribución de San Luis Potosí.

Con el transporte terrestre se abastecen destilados a las TADs que no cuentan con el suministro por medio de Ductos, o para aquellas que es insuficiente abastecerlas por sistema de ducto.

Como en el caso de la construcción del poliducto de 10" y 203.4 Km de longitud, de la TAD de Querétaro a la TAD SLP; cuyo proyecto de construcción es prácticamente reciente. Inicio su construcción el primero de enero de mil novecientos noventa y siete y se concluyó el treinta y uno de diciembre de mil novecientos noventa y ocho, e inicio sus actividades el primero de enero de mil novecientos noventa y nueve, y actualmente no alcanza a cubrir las demandas de la TAD SLP.

Esta situación, ha motivado a la presente administración de Pemex – Refinación a desarrollar un proyecto para llevar a cabo la construcción del poliducto de la refinería Francisco I. Madero en Cd. Madero Tamaulipas a la TAD en San Luis Potosí, S.L.P., con capacidad para cubrir las demandas de dicha TAD y sus áreas de influencia hasta el año 2021.

Con esta obra se pretenden reducir los elevados costos de transporte que actualmente se generan por el movimiento de gasolinas y diesel:

- 1) De la Refinería de Cadereyta en N.L., a la TAD de STA. Catarina, TAD de Saltillo, hacia la TAD Matehuala (Fig.1.5), sustituyendo dichas rutas de transporte, con el movimiento de productos por auto-tanques únicamente de la TAD SLP a la TAD Matehuala.
- 2) De la refinería Francisco I. Madero en Cd. Madero, hacia la TAD SLP (Fig. 1.6 y Fig. 1.7), sustituyendo estas rutas de transporte con la conducción de productos de la refinería Francisco I. Madero a la TAD SLP, por medio del nuevo poliducto Madero – San Luis Potosí

Además con este proyecto, se pretende cumplir con el objetivo de Pemex- Refinación, que es el de llevar a cabo el crecimiento ordenado de la red nacional de ductos, para optimizar e implementar mejoras en el sistema actual de distribución de destilados, así como de reducir el congestionamiento vehicular y riesgo generado por el excesivo tránsito de auto-tanques en las carreteras que unen los puntos que se mencionan.

\* MBD Miles de Barriles Diarios.

TEXOS CON  
FALLA DE ORIGEN

## Con el proyecto se obtendrán las siguientes metas:

- Disposición oportuna del combustible.
- Reducir los costos de abastecimiento de: gasolinas y diesel a las ciudades de San Luis Potosí, Cd. Valles y Matehuala incluyendo sus áreas de influencia.
- Sustituir el movimiento de productos por auto-tanques y carro-tanques, por la conducción por ducto hasta San Luis Potosí, en condiciones más seguras y confiables.
- Contar con la flexibilidad de operación del poliducto para enviar los productos requeridos para su venta.
- Reducir el congestionamiento vehicular y el riesgo generado por el excesivo tránsito de auto-tanques, en las carreteras que unen los puntos que se mencionan y aumentar la seguridad en el traslado de los combustibles.
- Disminución de emisiones de contaminantes provenientes de la combustión de los vehículos automotores que transportan los combustibles.

## 1.5 Normatividad y Marco Gubernamental.

### 1.5.1 Marco Gubernamental.

Entidades gubernamentales tradicionales, hacen reclamo del control y reglamentación de los proyectos que puedan poner en riesgo a la población, de la cual son responsables.

Ante la necesidad de proteger contra riesgos a la creciente población y en general a la ecología regional, el marco gubernamental se ha ampliado y nuevas entidades gubernamentales condicionan el trazo de los ductos para la conducción de hidrocarburos.

#### 1.5.1.1 Secretaría de Energía.

La dirección General del Petróleo de la Secretaría de Energía, con fundamento en la ley reglamentaria del artículo 27 constitucional y el reglamento de trabajos petroleros, es el órgano gubernamental, inicial, para otorgar a Petróleos Mexicanos, el permiso indispensable para llevar a cabo la explotación del petróleo, incluyendo el transporte por ductos.

Los aspectos más relevantes a interés de esta secretaría toman en cuenta lo siguiente:

#### A) De la Solicitud de Obra.

<sup>5</sup>Toda solicitud deberá acompañarse de la memoria descriptiva y el o los planos necesarios para dar a conocer en detalle la obra proyectada, todo suscrito por un ingeniero autorizado para ejercer la profesión y cuyo título y cédula profesional, hayan sido registrados en la Dirección General de Minas y Petróleo de la Secretaría de Energía. Los dictámenes, informes y en general todos los documentos de carácter técnico y económico, deberán ser suscritos por peritos de capacidad reconocida, a juicio de la misma secretaría.

---

<sup>5</sup> Artículo 6 Reglamento de la secretaría de Energía.

## B) De las Memorias Descriptivas.

<sup>6</sup> Las memorias descriptivas tendrán por objeto justificar técnica y económicamente las obras y construcciones, desde el punto de vista de la seguridad y el mejor aprovechamiento de todos los hidrocarburos naturales a que se refiere el artículo 1º de la ley y que se comprenden en la palabra "Petróleo". Por lo tanto, contendrán todos los datos necesarios para la mejor interpretación del funcionamiento de las obras y demostrarán que ni en su ejecución ni durante el funcionamiento de las instalaciones que comprendan, se verán lesionados los derechos de terceros o los intereses generales del país.

### Contenido de la Memoria Descriptiva que Acompañará a la Solicitud del Permiso de Construcción:

- Ubicación de la obra.
- Clase de hidrocarburos.
- Gasto o volumen de hidrocarburos que manejará.
- Cálculo para diseño de la instalación.
- Especificaciones de fabricación de tubos, válvulas, conexiones y en general, materiales utilizados.
- Cálculo de pérdida de presión y estimación de la presión de operación de los diferentes tramos.
- Protección para control de corrosión.
- Cálculo de estabilidad de estructuras, para condiciones externas de riesgo.
- Detalles generales de estaciones de bombeo o compresión, regulación, medición y dispositivos de seguridad.
- Reglamentos y normas a que se sujetó el proyecto" Norma: NOR-07.3.13".
- Presupuesto estimado del costo global.

## C) De los Planos.

Plano del trazo general escala 1:100,000 con linderos de Municipios y Estados que atraviesen.

Plano escala 1:4000 en secciones máximas de 3 Km anotando linderos y nombres de los propietarios, con señalamientos de longitud y área ocupada. Además de trazo, el levantamiento topográfico, se acompañará a la misma escala longitudinal del perfil topográfico.

Planos en planta y perfil longitudinal de los cruzamientos con caminos, ríos, carreteras, ferrocarriles y otras vías de comunicación, indicando los detalles constructivos a la escala 1:200.

Planos de las estaciones de compresión o bombeo 1:1000.

## D) Terrenos, su Ocupación.

### Localización.

"El derecho de vía" se selecciona, en la forma necesaria para reducir al mínimo la posibilidad de peligro, debido a futuros desarrollos industriales y urbanos o invasiones del derecho de vía.

<sup>7</sup>En el ramo del petróleo, el permisionario solo podrá usar terrenos de propiedad particular si previamente ha celebrado con el propietario o poseedor de los mismos el convenio respectivo. De

<sup>6</sup> Artículo 7 Reglamento de la secretaria de Energía.

<sup>7</sup> Artículo 44. De conformidad con lo dispuesto en el artículo 37 del reglamento de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional.

no lograr establecer ese convenio en un plazo de 90 días contados a partir de la fecha del permiso de la Secretaría de Energía para la obra o trabajo de que se trate, el permisionario solicitará de la secretaría la declaratoria de ocupación temporal o la expropiación del terreno, según proceda, sujetándose a los planos aprobados por la secretaría "Tratándose de ductos."

Determinado una franja que no exceda de 10 m de ancho, para la instalación de la tubería principal y de sus ramales. El ancho de 10 m solo podrá aumentarse cuando se proyecte establecer más de tres tuberías, en este caso el ancho se podrá incrementar en 1.50 m por cada tubería adicional. La secretaría bajo justificación técnica, suele autorizar una mayor amplitud de derecho de vía para construcción de los ductos.

<sup>8</sup>Prevía autorización de la secretaría del Estado correspondiente, el permisionario podrá aprovechar los derechos de vía de las vías de comunicación, para la instalación de sus tuberías, contrayendo la obligación de cumplir las disposiciones de la secretaría que concede el permiso.

Este artículo debe ser aplicable a los ductos introducidos a zonas urbanas, en la que son prioritarias las redes de servicio a la población.

<sup>9</sup>El permisionario no podrá impedir el cruce de sus tuberías por las líneas de energía eléctrica, caminos, carreteras, canales y ferrocarriles que establecieran otras instituciones y, tendrá a su vez, derecho a cruzar líneas de energía eléctrica, canales y vías de comunicación, teniendo en cuenta las disposiciones que sobre cruzamientos se establezcan en los ordenamientos relativos y sujetándose a las condiciones que se hayan estipulado en los permisos respectivos, en la inteligencia de que los gastos que originen los cruces, serán por cuenta exclusiva de quien cruce las obras ya existentes y de que las nuevas obras o instalaciones se harán de acuerdo con el dictamen de la dirección y las condiciones que fijen las dependencias gubernamentales afectadas.

<sup>10</sup>La presión de pruebas hidrostáticas, se debe considerar para el cálculo de especificaciones de la tubería que regula la norma 07.3.13, esta a su vez analiza y hace que se cumpla con los requisitos establecidos para asegurar la protección de la población de acuerdo a su densidad por área existente o probable.

### **1.5.1.2 Secretaría del Medio Ambiente.**

El incremento de la población, si bien de mayor concentración en zonas urbanas, no ha sido ajena a ocupar y transformar zonas de vegetación silvestre, en las que se ha depredado la ecología en forma lamentable.

Bosques, selvas, pantanos; si no se han disipado sí han llegado a su expresión mínima, provocando la desaparición de la flora y la fauna locales, rompiendo el equilibrio ecológico para contaminar el clima y en muchos casos trayendo fuentes de contaminación.

Ante la Secretaría del Medio Ambiente habrá que presentar dos estudios relacionados con el entorno del área afectable en la que se pretende instalar el ducto en proyecto.

Esta secretaría tiene dentro de su estructura dos direcciones que reglamentan y condicionan los proyectos de construcción de ductos petrolíferos:

- La Dirección de Impacto Ambiental.
- La Dirección de Riesgo.

<sup>8</sup> Artículo 48. Reglamento de la secretaría de Energía.

<sup>9</sup> Artículo 188. Reglamento de la secretaría de Energía.

<sup>10</sup> Artículo 197. Reglamento de la secretaría de Energía.



La preocupación mundial a la que no escapa nuestro país, de preservar y mejorar las condiciones ambientales del mundo en que vivimos, es propósito de la Secretaría del Medio Ambiente y para ello nos invita mediante su reglamentación a reflexionar sobre la afectación que nuestros proyectos causan en el ecosistema.

Para el cumplimiento de lo que nos pide la secretaria parecería necesaria una preparación profesional multidisciplinaria, pero como pregona << contamos con el INEGI >>, con su bibliografía y mapas, con variedad de información física y científica, podemos recopilar casi el total de la información necesaria para cualquier área del territorio nacional.

Las gacetas de SEDESOL nos dan la guía general e información para cumplir con su reglamentación, básicamente del amplio conocimiento de lo que producimos y manejamos.

Aspectos relevantes ante la secretaria del medio ambiente:

### **1.5.1.2.1 Impacto Ambiental.**

Por impacto ambiental debe entenderse la modificación que sufrirá el ecosistema, posibles riesgos y su forma de evitarlos como obligación; cuáles serán los beneficios a que está comprometido el proyecto.

Para estudio y autorización de proyectos la Secretaría del Medio Ambiente requiere la siguiente información.

#### **A) Rasgos Físicos.**

##### **Climatología.**

- Tipo de clima.
- Temperatura promedio.
- Precipitación media anual de lluvia.
- Intemperismos severos, huracanes, heladas, granizadas, etc.
- Calidad de aire.

##### **Geomorfología y Geología.**

- Relieve terrestre.
- Edad geológica.
- Susceptibilidad de la zona:
  - \*Sismicidad.
  - \*Deslizamientos.
  - \*Derrumbes.
  - \*Actividad volcánica.
  - \*Movilidad del terreno.

##### **Suelos.**

- Tipos de suelos.
- Composición (clasificación de fao).
- Capacidad de saturación.

##### **Hidrología Rango 10 a 15 km**

- Principales ríos o arroyos cercanos:
  - \*Estimación de escorrentía.
  - \*Aprovechabilidad.

- \*Contaminación.
- Cuerpos de agua cercanos, localización y distancia, área inundable.
- Drenaje subterráneo.
  - \*Profundidad.
  - \*Usos principales.
  - \*Cercanía a pozos del proyecto.

## **B) Rasgos Biológicos.**

### **Vegetación.**

- Tipo de vegetación de la zona.
- Principales asociaciones vegetales y su distribución.
- Mencionar especies de interés comercial.
- Mencionar si hay vegetación endémica o en peligro de extinción.

### **Fauna.**

- Fauna natural característica de la zona.
- Especies de valor comercial.
- Especies de valor cinegético (caza).
- Especies amenazadas o en peligro de extinción.

### **Ecosistema.**

- ¿Modificará la dinámica natural de algún cuerpo de agua?
- ¿De las comunidades de flora y de fauna?
- ¿Crearán barreras físicas que limitarán el desplazamiento de la flora y/o la fauna?
- ¿Se contempla la introducción de especies exóticas?
- ¿Se considera la zona con cualidades estéticas únicas y/o excepcionales?
- ¿Es considerada como atractivo turístico?
- ¿De interés arqueológico o histórico?
- ¿Hay cerca un área natural protegida?
- ¿Modificará la armonía visual con la creación de un paisaje artificial?
- ¿Existe alguna afectación en la zona? Explique en que forma y su grado actual de degradación?

## **1.5.1.2 Medio Socioeconómico.**

### **Población.**

- Economía activa
- Grupos étnicos
- Salario mínimo vigente

### **Servicios.**

- De comunicación.
- De transporte.
- De servicio público.
  - \*Agua.
  - \*Energéticos.
  - \*Salubridad.
- Centros educativos.
- Centros de salud.

- Vivienda (tipo).
- Zonas de recreo.

### **Actividades en la Zona.**

Tipo de economía.

Indicar si motivará cambios sociales.

### **Vinculación con Normas y Regulaciones Sobre uso del Suelo.**

- Plan director urbano.
- Planes o programas ecológicos del territorio nacional.
- Sistema Nacional de Áreas protegidas.

### **Identificación de Impactos ambientales.**

Instalación de ductos subterráneos, en el subsuelo, en una extensa franja de terreno con un mínimo de 10 m de amplitud, idealmente libre de vegetación alta, transitable en todo el tiempo; propietarios particulares, conservan su propiedad con uso restringido del suelo. Las instalaciones superficiales significativas a cada 30 km más o menos constituidas por estaciones de bombeo o compresión y menores de control o señalamiento, con trato federal.

### **Medidas de Prevención y Mitigación de los Impactos Ambientales Identificados.**

Los ductos evitarán dentro de lo posible su paso por zonas pobladas, siendo en todo caso, responsables comprometidos, mediante la observación de normas colegiadas de reconocimiento internacional e ingeniería especializada, a cubrir cualquier riesgo para seguridad de la población, preservación y mejoramiento de la ecología, para complementar la misión de Pemex de servicio social sin perjuicio de terceros y menos de los intereses de la nación.

### **Análisis de Riesgo.**

La secretaría del Medio Ambiente para su análisis de riesgo, requiere la presentación del diseño técnico simplificado, del que se presenta a la Secretaría de Energía; en el aspecto de trazo, reglamentación, normatividad, especificación de materiales, para asegurar la integridad de los ductos contra cualquier riesgo, además del estudio y conocimiento del entorno ambiental, simplificando la presentación a la Dirección de Impacto Ambiental.

Por cuenta propia la Dirección de Análisis de Riesgo para la autorización del proyecto de construcción del ducto requiere se proporcionen las propiedades físicas y químicas, de los productos transportados en el ducto, destacando:

- Componentes riesgosos.
- Precauciones especiales.
- Riesgos para la salud por:
  - \*Ingestión.
  - \*Contacto con los ojos.
  - \*Contacto con la piel.
  - \*Absorción.
  - \*Inhalación.
  - \*Toxicidad.
  - \*Daño genético.
- Riesgo de fuego o explosión y su atención.

- \*Condiciones propicias de riesgo inminente.
- \*Medios de extinción.
- \*Equipo de protección y control.
- \*Limite de inflamabilidad.
- Reactividad.
- Condiciones a evitar.
- Corrosividad.
- \*Tolerancia %.
- \*Inhibidores.

### **Condiciones de Operación.**

- Diseño general de estaciones de compresión o bombeo en función del producto y flujo manejado.
- Tecnología, dispositivos para eficiencia y seguridad.

### **Riesgo ambiental.**

Antecedentes de la actividad del producto.

- Deflagración.
- Detonación.
- Intoxicación.
- Contaminación de mantos freáticos.
- Dispositivos de control de emergencias.
- Integridad de ductos.

#### **1.5.1.3 Gobierno del Estado y Municipio.**

Al Gobierno del Estado a través del Municipio, se presentarán planos del ducto y sus instalaciones superficiales, con localización topográfica respecto a la zona urbana, para que el municipio pueda establecer el uso del suelo para su desarrollo urbano, en consideración de la instalación del ducto cuyo trato será de derecho de vía federal.

El contacto con las autoridades municipales será constante y cordial, debiendo informárseles oportunamente sobre operaciones que puedan causar alarma a la población o posibles riesgos, comprometiéndose a implementar todos los recursos de vigilancia y control.

Se les presentará todo el dispositivo para control de emergencias, con el directorio del personal responsable de poner en marcha las acciones necesarias con el equipo y personal requerido.

La comunicación con las autoridades municipales en casos de emergencia coadyuvará a controlar las acciones necesarias, al agregarse los recursos y la autoridad municipal.

#### **1.5.2 Norma CID-NOR-07.3.13.**

Con motivo de la aprobación de la nueva Ley Orgánica de Petróleos Mexicanos, han sido creados los diversos organismos subsidiarios que integran la industria petrolera estatal.

Dichos organismos tienen a su cargo entre otras instalaciones, tuberías de transporte cuya normatividad se ha considerado conveniente estandarizar con la finalidad de que bajo los mismos preceptos se regulen los diferentes aspectos de diseño, construcción, operación, mantenimiento y seguridad.

Los organismos subsidiarios: Pemex-Exploración y Producción, Pemex-Refinación; Pemex-Gas y Petroquímica Básica; Pemex-Petroquímica; y el Corporativo, constituidos colegiadamente en el "Comité Inter organismos de Ductos" (CID) decidieron realizar la estandarización de la normatividad a través de la formación de un grupo que a su vez determino iniciar sus trabajos con la actualización de la **Norma de Seguridad Pemex NO. 07.3.13** conocida anteriormente con la nomenclatura de AVIII-1.

Para la actualización de esta norma se realizó su revisión subdividiéndola en los aspectos de corrosión y tubería; asesorándose con los especialistas correspondientes de cada organismo, incluyendo al personal de campo, consultando en normatividad de reconocido prestigio internacional e incorporando experiencias de campo, obteniéndose como resultado la norma **NO-07.3.13**

### **Su Objetivo.**

Establecer los requisitos mínimos de seguridad que deben cumplirse para el **diseño, selección de materiales, construcción, pruebas, operación, mantenimiento e inspección** de tuberías destinadas a conducir hidrocarburos.

### **Alcance:**

La presente norma aplica a todos los sistemas de tuberías destinados al transporte de hidrocarburos, de los diferentes organismos subsidiarios de Petróleos Mexicanos.

Por otra parte, <sup>11</sup> cuando por condiciones especiales sean necesarios requisitos de seguridad más estrictos deben especificarse en las bases de diseño.

Esta norma no es retroactiva ni debe ser interpretada para aplicarse a sistemas de conducción por tubería instalados antes de la emisión de la norma, para el diseño, materiales, construcción y pruebas. Sin embargo las consideraciones de esta norma deben ser aplicables para modificaciones, sustitución, incremento en las condiciones normales de trabajo o cambio de servicio de un sistema de tuberías existente; asimismo, en lo relativo a la operación, mantenimiento y control de la corrosión de sistemas de tuberías nuevas y/o existentes.

### **Ámbito de Aplicación:**

Las disposiciones contenidas en la presente norma son de aplicación general y obligatoria en los centros de trabajo de Pemex Refinación que cuente con sistemas de tuberías destinadas a la conducción de hidrocarburos.

### **Clasificación:**

Para efectos de esta norma, las tuberías se clasifican de la siguiente manera:

- <sup>12</sup>Sistemas para hidrocarburos líquidos.
- <sup>13</sup>Sistemas para hidrocarburos gaseosos.

De esta clasificación solo nos enfocaremos a los sistemas de conducción de hidrocarburos líquidos. Que serán las tuberías que se destinen para conducir petróleo crudo, condensados, gasolinas, gases licuados y productos derivados de la refinación del petróleo.

---

<sup>11</sup> Punto 3.3 de la norma 07.3.13.

<sup>12</sup> Punto 5.1.1. de NOR-07.3.13.

<sup>13</sup> Punto 5.1.2. de NOR-07.3.13.

## **14Sistemas de tuberías para el transporte de hidrocarburos líquidos.**

Dentro del alcance están las tuberías principales y auxiliares para hidrocarburos líquidos en terminales de sistemas de tuberías ( marítimas, Fluviales y terrestres, tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo, estaciones reductoras de presión, estaciones de medición, incluyendo trampas de recibo y envío de diablos.

Los sistemas de tuberías consisten de tubos, bridas, pernos o espárragos, empaquetaduras, válvulas, dispositivos de alivio, conexiones y partes sometidas a presión de otros componentes de los sistemas de tuberías. También incluye los soportes, apoyos y otros elementos del equipo necesarios para prevenir los sobreesfuerzos de las partes sometidas a presión.

### **Diseño:**

<sup>15</sup>El diseño de tuberías para la conducción de hidrocarburos en la fase líquida, debe considerar entre otros aspectos lo siguiente:

- Características físicas y químicas del fluido.
- Presión máxima de operación en condiciones normales de flujo.
- Temperatura máxima de operación.
- Espesor del tubo.
- Válvulas de seccionamiento.
- Clasificación de Localizaciones.
- Materiales, Inspección y Pruebas.
- Pruebas para clasificación de materiales.
- Resistencia mínima a la cedencia "R".
- Accesorios ( Válvulas, Bridas, Conexiones y otros accesorios).
- Requisitos generales de diseño para pruebas.

## **1.6 Planeación Económica:**

El descubrimiento de un nuevo campo de extracción, o la necesidad de abastecimiento de productos refinados, origina la necesidad inmediata de transportar el hidrocarburo para una refinería o a los centros de almacenamiento y distribución. Y es de gran importancia la velocidad de suministro de hidrocarburos a estos centros de trabajo.

Al principio, la planeación económica de una nueva línea de conducción de hidrocarburos era simple. El tubo en uno de sus pocos tamaños estandarizados era ordenado para una rápida construcción. Y comúnmente la sección del tubo era seleccionada imprecisamente, debido a que las cantidades de hidrocarburos producidos eran pobremente definidas.

Una gran parte de los sistemas de conducción por ducto fueron construidos en la década de los 50's, y aun algunos están en uso. Estos simples sistemas de conducción, ayudaron a abastecer las abundantes necesidades de combustibles y lubricantes para que el país continuara sobre ruedas. Estos fueron los precursores de los sistemas que actualmente operan y para los que se planea diseñar en un futuro.

### **1.6.1 Justificación Económica.**

La necesidad de un nuevo sistema de conducción por ducto o la rehabilitación de uno existente, surge debido a que los centros de producción de hidrocarburos pueden suministrar una mayor cantidad que la que se puede transportar, o los gastos de transportación por otro medio son

<sup>14</sup> Punto 6 de NOR-07.3.13

<sup>15</sup> Como lo marca el inciso 6 de NOR-07.3.13

excesivos. Y en la mayor parte de los casos, el sistema de ductos es construido para solucionar estos problemas haciendo un estudio de los beneficios económicos que presentan. Muchas veces la justificación económica puede llevar a la construcción de un largo y costoso sistema de ducto, para alcanzar un remoto mercado, cuyas demandas de hidrocarburos son abastecidas insatisfactoriamente. Un mercado cercano no siempre es el más ventajoso desde el punto de vista económico. Por ejemplo, un área altamente poblada y consecuentemente con una gran demanda de combustibles, puede estar separada de los principales centros productores de hidrocarburos por montañas, desiertos o grandes distancias. Y en tales casos las refinerías pueden absorber las grandes tarifas necesarias para soportar las líneas de ductos que son costosas de construir, mantener y operar. Otras áreas de consumo cercanas a los nuevos mercados se pueden abastecer oportunamente. En este ejemplo resulto un estudio económico de la necesidad de transportar más eficientemente los hidrocarburos.

En resumen, un nuevo sistema de ductos se necesita para suministrar nuevos mercados o reemplazar uno o más sistemas existentes. Algunos de los viejos sistemas no pueden modernizarse para mejorar la seguridad, precio y control; que uno nuevo puede proporcionar. La conversión de un sistema existente para otros usos o su disposición para otros fines también es parte del estudio económico en tales casos.

### 1.6.2 Tamaño de la Línea de Conducción.

Una vez que la necesidad de una línea de conducción es reconocida, es importante determinar el tamaño máximo de la línea de conducción que puede ser justificada. El tamaño máximo es ventajoso porque el costo de la construcción se incrementa linealmente con el diámetro de la tubería, mientras que la capacidad se incrementa exponencialmente (ver ecuación 1.1). El costo mínimo de envío, resulta del incremento del tamaño del tubo y la capacidad de conducción, esto es deseable para obtener buenos resultados cuando se conduce una cantidad máxima posible de combustibles.

$$P = \frac{Q^{1.748} \nu^{0.252} GE}{156.4d^{4.748}} \quad 1.1$$

$P$  = Perdidas por presión *psi / milla*.

$Q$  = Gasto *Barriles / Dia*.

$\nu$  = Viscosidad cinemática Centistokes.

$GE$  = Gravedad específica.

$d$  = Diámetro interno *in*.

La relación tamaño-costo del tubo puede expresarse con las siguientes formulas (1.2); así, entre más se incrementa el diámetro de la tubería, el costo se incrementa aproximadamente lineal:

$$C = KD \quad 1.2$$

Donde:

$C$  = Costo.

$K$  = Costo unitario por tubo.

$D$  = Diámetro del tubo.

Cuando:

$$K = \frac{156.4P}{Q^{1.748} \nu^{0.252} GE} \quad 1.3$$

Así:

$$Q = DK^{2.716} \quad 1.4$$

El costo por derecho de vía, por trabajo, así como las condiciones climáticas se deben considerar; porque también afectan el precio de la línea de conducción. Para una ruta dada, el costo, como ya se mencionó se incrementa linealmente con el diámetro y espesor del tubo.

### 1.6.3 Rentabilidad.

Cuando el costo de construcción ha sido estimado y el capital requerido determinado, el ingreso necesitado para hacer el riesgo rentable puede ser calculado. Las ganancias se derivan por las tarifas de movimientos de productos.

Usualmente hay más de un criterio para medir la rentabilidad, pero, el que se expone es uno de los más considerados:

El periodo de recuperación de un proyecto, es el tiempo requerido para que la inversión genere un monto en efectivo igual al costo original.

El periodo de recuperación, es calculado en base al dinero en efectivo generado después de prever o descontar el impuesto generado por las ganancias y por la depreciación del dinero.

Para proyectos con una generación anual constante de efectivo, el periodo de recuperación se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Recuperación en Años} = \text{Inversión Original} / \text{Ganancias en efectivo Anual} \quad 1.5$$

La tasa de rendimiento y el valor presente generado, son métodos para evaluar la rentabilidad de un proyecto relacionándose entre sí, toman en cuenta el valor presente del dinero.

El valor presente de la ganancia es una excelente medida de rentabilidad, y que frecuentemente se usa en conjunto con la tasa de recuperación, el valor presente de la ganancia es igual al valor presente de la inversión sustrayendo el valor presente del efectivo generado por el proyecto.

### 1.6.4 Selección de Ruta como un Factor de Costo.

La selección de una ruta para una línea de conducción de hidrocarburos, es el punto más importante en la planeación. Ocasionalmente es viable seguir una ruta original (una línea que es prácticamente recta entre los destinos de la línea de conducción). Los factores que la desvían de una línea recta, pueden ser por las características geológicas del terreno; como una montaña, donde el costo de construcción es alto, además, la energía requerida para bombear el hidrocarburo. Esto puede hacer que rodear la montaña sea más económico. Altos costos y dificultad para obtener los derechos de vía, pueden desestabilizar el costo para una alternativa de ruta larga, o si se desea enviar a locaciones intermedias. La ecología se debe tomar en cuenta ya que influye directamente en el diseño del derecho de vía de la línea de conducción.



## 1.7 Identificación y Planteamiento del Problema.

### 1.7.1 Ubicación Geográfica.

La localización del proyecto esta distribuido entre los puntos geográficos de Cd. Madero Tamaulipas y San Luis Potosí, S.L.P.( figura 1.9), sustentado en las estrategias de Pemex – Refinación que son: el crecimiento ordenado de la Red Nacional de Ductos y la de eficientar la distribución y conducción de los productos destilados, en forma más confiable, segura y económica.

#### Aspectos Geográficos de Tamaulipas.

El estado de Tamaulipas representa el 4.1% de la superficie del País, colinda al norte con el estado de Nuevo León y Estados Unidos de América; al este con Estados Unidos de América y el Golfo de México; al sur con el Golfo de México y los estados de Veracruz y San Luis Potosí; al oeste con los estados de y San Luis Potosí, Nuevo León. Tamaulipas comprende terrenos que pertenecen a tres de las grandes regiones naturales o provincias fisiográficas, que conforman el territorio mexicano la zona montañosa del suroeste de la entidad,



Figura 1.9 Ubicación de los puntos geográficos

que forma parte de la sierra Madre Oriental; las extensas áreas de las llanuras costeras, lomeríos y valles así como las sierras de San Carlos y Tamaulipas que abarcan la mayoría de los terrenos tamaulipecos, que corresponden a la llanura costera del Golfo Norte y la zona noreste, en la que predominan lomeríos suaves, alternados con llanuras de Norte América cuya mayor parte se encuentra en los Estados Unidos.

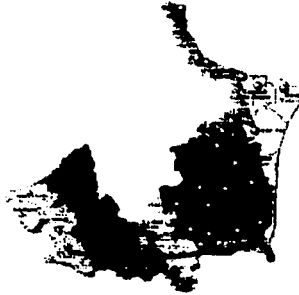
#### Aspectos Geográficos de San Luis Potosí.

El estado de San Luis Potosí colinda al norte con Zacatecas, Nuevo León y Tamaulipas; al este con Tamaulipas y Veracruz; al sur con Hidalgo, Querétaro de Arteaga y Guanajuato; al oeste con Zacatecas. Las provincias fisiográficas Correspondientes al estado son: La llanura costera del golfo norte, la mesa del centro y la sierra madre oriental. Los climas dominantes en el extremo norte de la provincia son secos, cálidos y semicálidos. Conforme se avanza hacia el sur pasan de semicálidos a subhúmedos y progresivamente a los cálidos húmedos del sur, la vegetación sigue este patrón climatológico.

### 1.7.2 Ruta Propuesta.

En la figura 1.10 se plantea la ruta tentativa del derecho de vía del poliducto, que pasara en Tamaulipas por la llanura costera tamaulipeca llanuras y lomeríos y una pequeña parte por la sierra plegada. En el estado de San Luis Potosí atravesara por las llanuras y lomeríos, el Carso huasteco, las sierras y llanuras occidentales; y las sierras y llanuras del norte de Guanajuato

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 1.7.3 Planteamiento del problema.

Con la finalidad de desarrollar los procedimientos de diseño del ducto, que conducirá el volumen demandado por San Luis Potosí, Cd. Valles, Matehuala y áreas de influencia, que serán abastecidas por la refinería Francisco I. Madero. Se exponen las condiciones en las cuales recorrerá el ducto el derecho de vía.

- Los hidrocarburos que se conducirán son: Gasolina Pemex Magna, Gasolina Pemex Premium y Diesel.

Figura 1.10 Ruta tentativa de Cd. Madero-San Luis Potosí.

- La distancia total tentativa en la que se tenderá el ducto con derecho de vía será de 355 Km, iniciando su recorrido en la refinería Francisco I. Madero, atravesando las llanuras costeras, dirigiéndose hacia llanuras y lomeríos, cruzando una pequeña parte por la sierra plegada y tomando rumbo hacia el estado de San Luis Potosí, donde atravesará por las llanuras y lomeríos, el Carso huasteco, las sierras y llanuras occidentales y las sierras y llanuras del norte de Guanajuato.
- El ducto se elevará de una altura de 7 m sobre el nivel del mar en la refinería Francisco I. Madero en Cd. Madero Tamaulipas y llegará hasta 1900 m Sobre el nivel del mar en la TAD de San Luis Potosí, S.L.P. El perfil del terreno que ilustra el comportamiento de la elevación de la superficie del terreno sobre el nivel del mar a lo largo de la trayectoria del derecho de vía lo podemos observar en la figura 4.3.
- En el capítulo 4 podremos observar el recorrido del derecho de vía del poliducto.

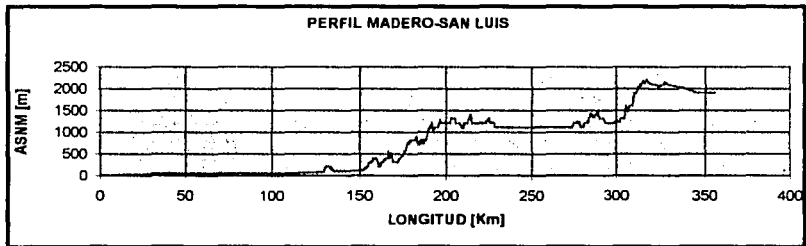


figura 1.11 Perfil de elevación de tierras de Cd. Madero a San Luis Potosí.

- Las estadísticas de los volúmenes de hidrocarburos que se conducirán por año, se localizan en las figuras 4.1 y 4.3 (teniendo como máximo caudal 50MBD para el año 2021). De las cuales obtendremos los gastos para los cálculos correspondientes al diseño de la tubería.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

# C A P Í T U L O 2

## Conceptos Fundamentales en la Conducción de Hidrocarburos Líquidos.

### 2.1 Introducción.

Los fundamentos que gobiernan el flujo de los líquidos en las tuberías han sido estudiados por siglos, la mayor parte de este tiempo el agua ha sido el más estudiado. Hasta éste último siglo, y debido a su importancia económica que representa, el petróleo y sus derivados han tenido un intensivo estudio en su comportamiento de flujo por tuberías.

La mayor parte de los principios del comportamiento del agua a través de tuberías han sido utilizados y adecuados según las necesidades de solución en problemas pertenecientes al flujo de petróleo crudo y sus derivados. Esto es debido a que las propiedades del agua con el petróleo y sus derivados difieren muy poco, pero las necesidades de conducción en la industria petrolera son diferentes a las del abastecimiento de agua.

Los principios están basados en la aplicación de las leyes naturales que gobiernan el flujo de fluidos y las características de los efectos y propiedades de los líquidos en movimiento. Por otra parte las características y propiedades de las tuberías afectan el flujo del líquido a través del tubo y se debe considerar la interrelación de las mismas en el estudio de estos principios.

### 2.2 Propiedades de los Líquidos.

#### 2.2.1 Fluido Newtoniano.

Es el fluido en el cual existe una relación lineal entre la tensión y la velocidad de corte, su viscosidad generalmente no es función de la presión. Muchos fluidos comunes tales como el aire y otros gases, el agua y la mayoría de soluciones simples son Newtonianos, así como la mayoría de productos derivados del petróleo<sup>1</sup>. Las soluciones que están compuestas en su estructura molecular por cadenas largas de polímeros así como lodos y suspensiones generalmente no son Newtonianos.

#### 2.2.2 Fluidez.

Indica la propiedad del líquido a deformarse bajo la acción de fuerzas por pequeñas que estas sean, tales como cuando se le sujeta a una fuerza natural como la gravedad, o cuando se le impone una fuerza de presión por un medio mecánico (bomba). En los líquidos, las moléculas que los componen están en rápido movimiento entre sí, debido a este movimiento los líquidos no tienen una forma definida y adoptan la forma del recipiente que los contenga. Esta es la propiedad de fluidez que hace posible su conducción. Y se considera a su recíproco la viscosidad.

#### 2.2.3 Temperatura.

La temperatura se puede definir como la actividad molecular interna de un líquido que genera una cantidad de calor medida en una escala graduada de un termómetro.

---

<sup>1</sup> Pág. 14 Fundamentos de mecánica de fluidos segunda edición.  
P. Gerhart, R. Gross y J. Hochstein. Ed. Iberoamericana.

Se pueden expresar diversos valores numéricos de la temperatura con respecto a varias escalas. Algunas son absolutas (donde la temperatura se expresa como un valor relativo a la menor temperatura posible, el cero absoluto), y algunas escalas no lo son (las temperaturas se expresan en relación con un valor de referencia arbitrario). Las escalas no absolutas más comunes de temperatura son Fahrenheit y la de Celsius.

Las escalas absolutas correspondientes (iguales excepto por el nivel de referencia) son respectivamente la Rankine y la Kelvin.

Las relaciones entre las escalas de temperaturas son las siguientes:

$T(\text{Rankine}) = T(\text{Fahrenheit}) + 459.67$	2.1
$T(\text{Kelvin}) = T(\text{Celsius}) + 273.15$	2.2
$T(\text{Rankine}) = 1.80 T(\text{Kelvin})$	2.3
$T(\text{Celsius}) = 5/9(T \text{ Fahrenheit} - 32)$	2.4
$T(\text{Fahrenheit}) = 9/5 T \text{ Celsius} + 32$	2.5

La variación de la temperatura en forma de calor afecta todas las propiedades del líquido.

### 2.2.4 Viscosidad.

Es la propiedad del líquido de oponerse al desplazamiento o al resbalamiento de sus capas. La viscosidad es la propiedad inversa de la fluidez; los líquidos con mayor viscosidad (glicerina, aceites lubricantes y otros) son menos fluidos y viceversa.

Al fluir el líquido viscoso a lo largo de una pared sólida, la corriente es frenada por la viscosidad figura 2.1. La velocidad de traslación de las capas "v" disminuye a medida que se reduce la distancia hasta la pared "y", llegando a ser "v = 0", cuando "y = 0", mientras que entre las capas tiene lugar un deslizamiento que va acompañado por el surgimiento de "tensiones de rozamiento" (tensiones tangenciales).

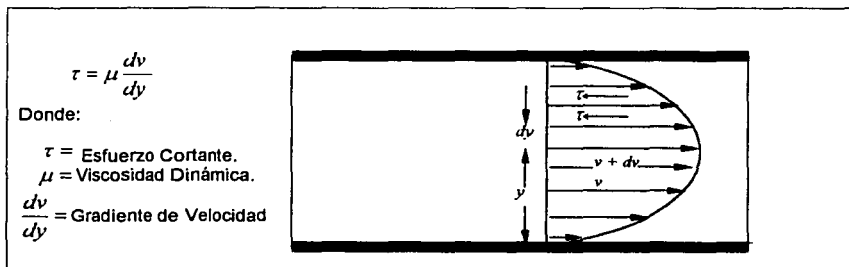


figura: 2.1 Perfil de velocidades durante el flujo de líquido a lo largo de las paredes de un tubo.

Hay dos bases de unidades de viscosidad: Viscosidad dinámica ( $\mu$ ) medida en términos de fuerza x tiempo / superficie, y viscosidad cinemática ( $\nu$ ) medida en términos de superficie / tiempo.

La viscosidad cinemática ( $\nu$ ) de un fluido es obtenida por la relación de la viscosidad absoluta entre la densidad del fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad 2.6$$

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Las unidades, usualmente se expresan en términos que más sean convenientes, las unidades más usuales son: *Stoke (St) m<sup>2</sup> s*, *centistoke (cSt)*:

$$1 m^2 s = 10^6 cSt$$

$$1 cSt = 10^{-6} m^2 s$$

La viscosidad varía muchísimo según la naturaleza del líquido, siendo completamente independiente de la densidad relativa del mismo y dependiente de la temperatura disminuyendo con el incremento de ésta. En los líquidos una molécula está mucho más próxima a la otra, puesto que en ellos la viscosidad se debe a las fuerzas de cohesión molecular, con el aumento de la temperatura estas fuerzas disminuyen, por lo cual la viscosidad disminuye. La viscosidad puede verse afectada también por la presión, aunque en la mayor parte de las aplicaciones prácticas puede despreciarse su efecto. Es un parámetro muy importante para determinar las pérdidas por rozamiento del líquido a través del sistema y afecta el diseño y construcción de la bomba.

## 2.2.5 Densidad ( $\rho$ ).

Se define a la densidad, como la relación del peso del producto por la unidad de volumen<sup>3</sup>

### 2.2.5.1 Peso Especifico ( $\gamma$ ).

Peso específico de una sustancia, es el peso por unidad de volumen y depende de la aceleración de la gravedad (2.7).

$$\gamma = \rho g$$

$$2.7$$

Puesto que depende de la gravedad, toma diferentes valores dependiendo la localidad.

El peso específico es una medida relativa de la densidad, como la presión tiene un efecto insignificante sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que debe ser tomada en cuenta.

### 2.2.5.2 Densidad Referida.

Es la densidad estimada de un líquido a una presión y temperatura predefinida; ó sea, este valor de la densidad tiene un valor para ciertas condiciones particulares de presión y temperatura dadas, ejemplo:

Densidad del agua a \*20°C y 0.023368. *Bar abs.* es de: 998.2  $Kg m^3$

### 2.2.5.3 Densidad Relativa o Gravedad Especifica (GE).

Es la densidad de un líquido a una temperatura predefinida dividida por la densidad del agua a la misma temperatura predefinida. La gravedad específica no tiene dimensiones.

<sup>2</sup> El peso específico y la densidad relativa están directamente relacionados con la densidad, si ésta permanece constante aquellos también lo harán.

<sup>3</sup> El peso específico y la densidad se utilizan como sinónimos. Así, en la práctica de muchos países se denomina densidad de un líquido a su peso específico, o peso por unidad de volumen, en unidades de kilogramo por metro cúbico ( $Kg / m^3$ ).

**Gravedad específica:**

$$GE = \frac{\rho_L}{\rho_{Agua}} \quad 2.8$$

$GE$  = Gravedad Especifica.

$\rho_L$  = densidad del líquido.

$\rho_{Agua}$  = densidad del agua.

También puede expresarse con la relación del peso específico de una sustancia a su correspondiente del agua:

$$GE = \frac{\gamma_L}{\gamma_{Agua}} \quad 2.9$$

$GE$  = Gravedad Especifica.

$\gamma_L$  = Peso específico del líquido.

$\gamma_{Agua}$  = Peso específico del agua.

**2.2.5.4 Gravedad Especifica en Línea (GI).**

Es la gravedad específica del líquido a su presión y temperatura de flujo en el conducto.

**2.2.5.5 Los Grados API.**

Son una escala expandida para medir la gravedad específica. La conversión entre la gravedad específica a  $60/60^\circ\text{F}$  (GE) y grado API puede ser realizada con la siguiente ecuación:

$$^\circ\text{API} = \frac{141.5}{GE} - 131.5 \quad 2.10$$

**El Volumen Especifico ( $V_s$ ).**

El volumen específico de una sustancia; es el recíproco de la densidad " $\rho$ ", es decir, el volumen ocupado por la unidad de masa del fluido.

$$V_s = \frac{1}{\rho} \quad 2.11$$

**2.2.6 Vaporización.**

La vaporización es propia a todo líquido (cambio del estado líquido al gaseoso), pero su intensidad es diferente para diversos líquidos y depende de las condiciones en las cuales se encuentre el líquido. Uno de los índices que caracterizan la evaporación del líquido es la temperatura de

<sup>4</sup> Se usa un hidrómetro para medir directamente la densidad relativa de un líquido, normalmente se utilizan dos escalas hidrométricas:

- La escala API se utiliza para productos derivados del petróleo.
- Las escalas Baumé, que a su vez usan dos tipos: uno para líquidos más densos que el agua y otro para líquidos más ligeros que el agua.

<sup>5</sup> La densidad relativa de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura, con respecto al agua a una temperatura normalizada. A menudo estas temperaturas son las mismas y se suele utilizar  $60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}$  o  $15.6^\circ\text{C}/15.6^\circ\text{C}$ .

ebullición, a la presión atmosférica normal (Pero se puede modificar el punto de ebullición variando la presión que se ejerce al líquido). Cuanto más alta es la temperatura de ebullición, tanto menor es la evaporación del líquido. Su valor se puede encontrar en tablas de los manuales para los diferentes líquidos.

### 2.2.8 Modulo de Bulk ( $k$ ).

Un líquido se puede considerar, en general, como incompresible, pero en situaciones en que se tengan cambios de presión bruscos o muy grandes, su compresibilidad es importante.

La compresibilidad de los líquidos es importante cuando se tienen cambios de temperatura. La compresibilidad de un líquido se expresa mediante el modulo de elasticidad volumétrica.

Si la presión de un volumen unitario de líquido se incrementa en  $dp$ , el volumen cambiara en

$-dv$ ; el cociente  $-\frac{dp}{dv}$  se llama modulo de elasticidad volumétrica " $k$ ". Entonces, para cualquier volumen  $v$  de líquido, se tiene:

$$k = -\frac{dp}{dv} \quad 2.12$$

puesto que  $dv/v$  es adimensional, " $k$ " tiene las mismas unidades de  $P$ . Para el agua a temperaturas y presiones ordinarias,  $k = 300,000 \text{ psi} = 2,068 \text{ MN m}^2$ .

Es el coeficiente de compresibilidad de los líquidos, es medido en unidades de presión  $\text{psi}$ . Generalmente es ignorado para cálculos en estado-estacionario, pero es muy importante para cálculos de transitorios.

### 2.2.9 Compresibilidad.

Si los líquidos se manipulan a una presión que rebase los  $1000 \text{ psi}$  ( $70 \text{ atm.}$ ) deben tenerse en cuenta los efectos de la compresibilidad.

La compresibilidad de un líquido es el reciproco de su módulo de elasticidad volumétrico " $k$ ", es decir:

$$\beta = \frac{1}{k} \quad 2.13$$

$\beta$  = Compresibilidad.

$k$  = Coeficiente de compresibilidad.

El valor de " $k$ " no es constante sino que varía con la presión. Para la práctica en general es suficiente un valor medio o típico. Entonces la variación de la presión y las de volumen vienen relacionadas por la siguiente formula:

$$\Delta P = kx \Delta v (\%) \quad 2.14$$

En la que  $\Delta P$  es la variación de la presión asociada a una variación de volumen de  $\Delta V$  por ciento.

## 2.3 PRESIÓN.

### 2.3.1 Definición de la Presión (P).

Es la fuerza ejercida por unidad de área, sus unidades comunes son  $kg/cm^2$  o  $psi$ , usualmente escrita:

$$P = \gamma h.$$

2.15

$\gamma$  = Peso específico del fluido

$h$  = Altura

Conversiones:

$$ft = 2.31 psi / G$$

$$m = 10kg / cm^2 / G$$

### 2.3.2 Presión Estática.

Las moléculas de un líquido se encuentran en movimiento con dirección arbitraria, cada una es afectada por la fuerza gravitacional y tiende a desplazarse hacia el centro de la tierra. Cuando este movimiento descendente es impedido por un recipiente, la fuerza provoca que las moléculas se empujen unas con otras en todas direcciones y contra la pared del contenedor. Este empuje es llamado presión y en cualquier punto es proporcional a la distancia vertical bajo la superficie del líquido. El tamaño y forma del recipiente no altera esta presión (figura 2.2).

Los líquidos considerados en la figura 2.2, están estáticos en un recipiente abierto, ó sea no se mueven como masa. De acuerdo a lo anterior, la presión es llamada estática o altura estática, para indicar que el líquido esta en reposo.

Para los diferentes tipos de líquidos la altura estática es proporcional a sus propiedades. Es conveniente indicar el peso del líquido comparado con el peso del agua, la comparación o gravedad específica puede ser usada para calcular la altura estática a cualquier profundidad del líquido.

La unidad de presión más común para registrarla son las libras por pulgada cuadrada " $psi$ "; esta unidad se visualiza en un tubo vertical de una sección transversal uniforme de una pulgada cuadrada, llenado con agua a una altura de 2.31 pies o 27.7 pulgadas con una gravedad específica de 1.0. Para esta cantidad de agua su peso sería de una libra, ósea, la presión estática en el fondo del tubo sería de una libra por pulgada cuadrada.

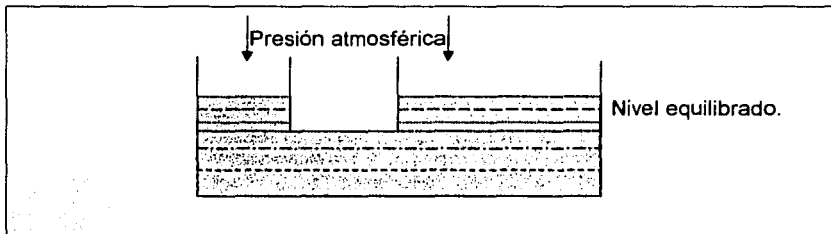


figura: 2.2 Las superficies de los líquidos contenidos en un recipiente abierto e interconectado, están sujetas a la misma presión y con libertad de flujo entre ambos compartimientos, la gravedad influye para que ambas superficies de los líquidos estén en el mismo nivel.



### 2.3.2.1 Columna de Líquido.

Una columna de agua u otro líquido en un tubo vertical desarrolla una cierta presión (fuerza por unidad de área) sobre la superficie horizontal en el fondo del tubo.

Esta presión puede expresarse en kilogramos por centímetro cuadrado  $\text{kgf/cm}^2$ , o como el número de metros del líquido que ejerce una presión igual sobre la misma superficie. La altura de la columna del líquido que produce la presión en cuestión se conoce como columna sobre la superficie. Nótese que el peso del líquido que actúa sobre la superficie es lo que produce la presión.

Considérese una columna vertical de agua fría (0 a 27°C) aproximadamente, con una altura de 10 metros. Un medidor de presión conectado en la parte inferior de la columna, mostrará una presión de 1  $\text{kgf/cm}^2$ , en la base. Así, columna y presión son términos intercambiables, siempre y cuando se expresen en sus unidades correctas. Para convertir una a la otra, úsese la fórmula:

$$\text{Columna líquida, metros} = [10 (\text{presión } \text{kg/cm}^2)] / \text{densidad} \quad 2.16$$

### 2.3.2.2 Columna Estática.

Se entiende por columna estática ( $h$ ), a la distancia vertical desde la superficie libre hasta el punto bajo observación. Su medición es dada en unidades de longitud "m, ft". Por ejemplo, una presión de una atmósfera es equivalente a la presión en la base de una columna de mercurio de 760mm de longitud o de una columna de agua de 10 metros.

En las aplicaciones de bombas, generalmente se le llama a la altura de la columna del líquido que actúa sobre la succión o descarga de la bomba, columna estática en la entrada o salida, y se expresa como un cierto número de metros de líquido. La columna estática es la diferencia de elevación y puede calcularse para una variedad de condiciones que se encuentren en una instalación de bombeo.

### 2.3.3 La Medición de la Presión.

En la práctica, la presión se mide siempre por medio de la determinación de una diferencia de presión. Si la diferencia es la existente entre la presión del fluido en estudio y el vacío, entonces se conoce el resultado de presión absoluta del fluido. Si la presión del fluido se encuentra por debajo de la atmosférica, se le denomina de vacío o de succión (ver figura 2.3); la presión absoluta siempre es positiva, pero las presiones manométricas son positivas si son mayores que la atmosférica y negativa si son menores a la atmosférica.

Por otro lado las propiedades de los líquidos se afectan por la presión la presión absoluta de un líquido puede ser importante cuando ésta se encuentra en el punto de vaporización.

#### 2.3.3.1 Presión Atmosférica.

La gravedad provoca que las moléculas de los fluidos de la atmósfera se precipiten hacia el centro de la tierra. Esta precipitación origina una presión. La presión estática es originada por el peso de la atmósfera, a este peso se le denomina presión atmosférica. Al nivel del mar y a una temperatura de 32°F su valor será de 14.7 *psi*.

<sup>6</sup> El término alto vacío se refiere a un valor bajo de la presión absoluta.

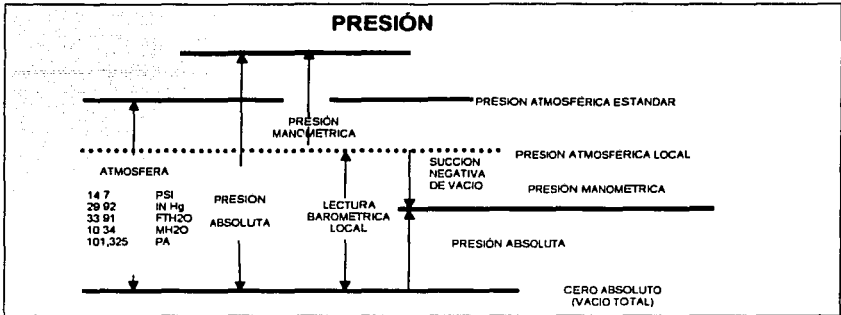


figura: 2.3 Representación gráfica de la presión manométrica, absoluta y de vacío.

### 2.3.3.2 Presión Manométrica y Absoluta.

La presión manométrica se mide con relación a la presión local. La presión que se mide (o que se define) en relación con una presión cero se denomina presión absoluta. La presión manométrica y absoluta se relacionan con la siguiente fórmula:

$$\text{Presión absoluta} = \text{presión manométrica} + \text{presión atmosférica alrededor del manómetro} \quad 2.17$$

Las presiones menores que la presión atmosférica local a veces reciben el nombre de presiones de vacío. Una presión de vacío se expresa como un número positivo, por lo que:

$$\text{Presión de vacío} = \text{presión atmosférica} - \text{presión absoluta} = - \text{presión manométrica} \quad 2.18$$

### 2.3.4 Presión de Vapor.

Todos los líquidos tienen una tendencia a vaporizarse, esto es, al pasar de la fase líquida a la fase gaseosa. Esta vaporización ocurre porque continuamente se proyectan moléculas a través de la superficie libre del líquido, y se pierden del cuerpo mismo, como consecuencia de sus vibraciones térmicas naturales. Las moléculas expulsadas, por ser gaseosas, ejercen entonces su propia presión parcial, que se conoce como la presión de vapor "Pv" del líquido. Debido al aumento de actividad molecular por el aumento de temperatura, la presión de vapor aumenta al aumentar la temperatura del líquido.

La ebullición (formación de burbujas de vapor a través de la masa de fluido) ocurrirá (cualquiera que sea la temperatura) cuando la presión absoluta exterior impuesta sobre el líquido sea igual o menor que la presión de vapor del líquido. Esto significa que el punto de ebullición de un líquido, depende tanto de la presión impuesta sobre él como de su temperatura.

La baja presión de vapor del mercurio aunada a su alta densidad, hace que este líquido sea muy adecuado para usarse en barómetros y en otros dispositivos para la medición de presión. Los líquidos más volátiles, que se vaporizan más fácilmente, poseen las presiones de vapor más altas.

Si se coloca un líquido en un recipiente sellado, con un espacio vacío arriba de la superficie del líquido, la vaporización continuará hasta que el vapor ejerza su presión de vapor, Pv, en el espacio antes vacío. En esta etapa el número de moléculas que escapa del líquido iguala exactamente al número de las que retoman al mismo. No obstante, si el espacio es demasiado grande, no se

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

alcanza esta condición de equilibrio y el líquido continúa vaporizando o evaporándose hasta que desaparece como tal, y sólo queda vapor a una presión menor o igual a  $P_v$ .

Los líquidos, tienen una presión de vapor correspondiente que debe considerarse cuando se calcula un sistema de bombeo. La reducción de la presión en el tubo de succión de una bomba más abajo de la presión de vapor del líquido, puede causar vaporización, es decir, formación de vapor del líquido. Puesto que una bomba para líquidos de diseño ordinario no puede bombear únicamente vapor, el flujo del líquido a la bomba se interrumpe y se dice que la unidad se encuentra "en vapor". El método más comúnmente usado para evitar esta condición es el dar suficiente columna a la succión de la bomba para que la presión en el tubo de succión sea mayor que la presión de vapor líquido que se maneja.

La presión de vapor es un factor importante en las condiciones de succión de las bombas que manejan líquidos de todos los tipos. En cualquier sistema de bombeo, la presión en cualquier punto nunca debe reducirse más allá de la presión de vapor correspondiente a la temperatura del líquido, porque el líquido formará vapor que puede, parcial o totalmente hacer que cese el flujo del líquido en la bomba.

Otro ejemplo que ilustra el porque se debe evitar reducir la presión de vapor de un líquido es:

Durante el flujo de un líquido a través de un estrechamiento local del tubo surge el aumento de la velocidad y la caída de presión. Si la presión absoluta alcanza un valor igual a la presión de vapor saturado de este líquido a una temperatura dada, en este lugar del flujo comienza la formación intensiva de vapor y el desprendimiento de gases, es decir, la ebullición local del líquido. En la parte donde el flujo se ensancha, la velocidad disminuye, pero la presión aumenta, y la ebullición cesa, el vapor desprendido se condensa parcial o totalmente.

Esta ebullición local del líquido, condicionada por la caída de presión local en el flujo con la subsiguiente condensación de los vapores en los lugares de presión elevada, se denomina cavitación.

## 2.4 Características del Ecurrimiento.

### 2.4.1 Número de Reynolds ( $R_e$ ).

El régimen de flujo en tuberías, es decir, si es laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad y la viscosidad del fluido y de la velocidad del flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables, es conocido como el Número de Reynolds.

La longitud ( $l$ ) y la velocidad ( $V$ ) que aparecen en el número, son cantidades que se seleccionan como representativas. Es natural que la longitud y velocidad seleccionadas para el propósito, afecten el valor numérico de  $Re$ , pero no afectan su significado fundamental. En muchas aplicaciones se han normalizado por convención la longitud y la velocidad que deben considerarse, por ejemplo, para el flujo dentro de un tubo de sección circular, la medición de la longitud representativa es el diámetro y la velocidad representativa es la velocidad promedio.

El número Reynolds es, un factor adimensional utilizado para determinar el régimen de flujo, la ecuación para tubos tiene la forma siguiente:

$$R_e = \frac{Vd}{\nu} \quad 2.19$$

Donde:

$$V = \text{velocidad de flujo } ft/s .$$

$$d = \text{Diámetro interno del ducto } ft .$$

$$\nu = \text{Viscosidad cinemática } ft^2/s .$$

Debido a que:

$$V = Q/A) \quad 2.20$$

Donde:

A = área transversal del ducto, entonces:

$$R_e = \frac{2,214Q}{d\nu} \quad 2.21$$

Donde:

$$Q = \text{flujo BPH.}$$

$$d = \text{Diámetro interno del ducto pulgadas}$$

$$\nu = \text{Viscosidad cinemática.}$$

La clasificación ( figura 2.4 ) del régimen de flujo de acuerdo al número de Reynolds es:

Valor	Régimen de flujo.
$R_e < 2,000$	Laminar
$2,000 < R_e < 4,000$	Crítico
$R_e > 4,000$	Turbulento

figura: 2.4 Clasificación del régimen de flujo de acuerdo al número de Reynolds.

### 2.4.1.1 Régimen de Flujo.

#### A. Régimen de flujo Laminar.

Es caracterizado por partículas del fluido desplazándose en una fase lineal y existe a bajas velocidades de flujo, de acuerdo a esto, las partículas de fluido se mueven por completo según líneas rectas, aun cuando la velocidad con la que las partículas se mueven a lo largo de una línea no sea necesariamente la misma que a lo largo de otra línea. Ya que por lo anterior se puede considerar que el fluido se mueve en capas, o en laminas paralelas al eje del tubo, esta clase de flujo por lo general se denomina flujo laminar (figura 2.5).

#### B. Régimen de flujo de transición.

Si las láminas continúan moviéndose en línea recta hasta que se alcanza una velocidad en donde las laminas comienzan a ondularse y se rompen en forma brusca y difusa, según la figura 2.6. Esto ocurre en la velocidad crítica.

#### C. Régimen de flujo Turbulento.

Es caracterizado por el movimiento irregular y aleatorio de las partículas del fluido generalmente dentro del 80% de la parte media del corte transversal del ducto en la dirección del flujo (figura 2.7).

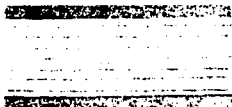


figura: 2.5 Flujo laminar.  
En la figura se muestra como las partículas del fluido se mueven en línea recta.

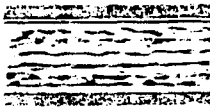


Figura: 2.6 Flujo transición.  
En la figura se observa como comienzan a ondularse y romper las moléculas.

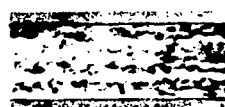


figura: 2.7 Flujo turbulento.  
Se observa el movimiento irregular y aleatorio de las moléculas.

figuras: 2.5, 2.6 y 2.7 Respectivamente, Representan esquemáticamente las formas de los regímenes del fluido.

## 2.5 Características de Ductos.

La tubería destinada al transporte de hidrocarburos líquidos en su fase líquida, debe ser de acero<sup>7</sup>, las clases de tubo las podemos observar en la figura 2.11.

Y se debe considerar las siguientes características para su selección:

Diámetro exterior ( D ), Espesor ( t ), Diámetro interior ( d ), Rugosidad (  $\epsilon$  ), Esfuerzo de trabajo permisible ( S ).

### 2.5.1 Diámetro Exterior (D).

El diámetro nominal del tubo, es por lo regular una nomenclatura que nos sirve para identificar comercialmente el tamaño del tubo del tubo. Y el diámetro exterior, es la medida real de la sección transversal del tubo, en la figura 2.8 se muestra la relación entre diámetro nominal y exterior.

Diámetro nominal in.	Diámetro exterior in.
4	4.500
6	6.625
8	8.625
10	10.750
12	12.750
14 a 48	Igual al diámetro nominal

figura: 2.8 Relación de diámetros nominales y exteriores.

### 2.5.2 Espesor (t).

Se refiere al grosor de la pared del ducto en "in." Ósea la diferencia entre el radio externo y el radio interno (figura 2.9).

<sup>7</sup> Norma CID-NOR-07.3.13, inciso 6.5

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

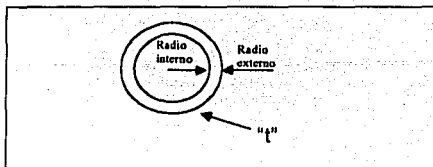


figura: 2.9 En la figura se ilustra como se obtiene el espesor "t".

### 2.5.3 Diámetro Interior (d).

El diámetro interior es la longitud de la sección transversal interna del tubo, ósea, la distancia entre paredes internas del tubo; y su formula para obtenerlo es:

$$d = D - 2t \quad \text{in} \quad 2.22$$

### 2.5.4 Determinación del Diámetro del Tubo.

Para determinar el diámetro de la tubería que conducirá los hidrocarburos líquidos del proyecto, nos basaremos en las formulas ya definidas<sup>8</sup>, en el cual se establece un rango de velocidades del fluido dentro de la tubería, que es de 2 a 4 ft/s para las líneas de bombeo.

$$d = \frac{0.286Q}{V} \quad 2.23$$

Con:

$Q$  = Gasto BPH<sup>9</sup>.

$V$  = Velocidades ft/s de las estaciones.

$d$  = Diámetro in.

Otra forma de obtención del diámetro, es utilizando la ecuación de continuidad (ver 2.6.1).

De la ecuación de continuidad despejamos el área y del área se despeja el diámetro.

$$d = \frac{4Q}{V\pi} \quad 2.24$$

### 2.5.5 Esfuerzo de Trabajo Permissible ( S ).

De acuerdo a la norma de seguridad de Petróleos Mexicanos NO-07-3-13 Requisitos mínimos de seguridad para el diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección de tuberías de transporte, es el valor del esfuerzo a la tensión más grande a que puede someterse una tubería de transporte, considerando su resistencia, la eficiencia de la soldadura y las tolerancias de especificación, sin que sufra deformaciones permanentes, dada por la siguiente ecuación:

<sup>8</sup> Que obtuvimos en el manual de ingeniería de diseño de tuberías de la universidad de Texas.

<sup>9</sup> Barriles Por Hora.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

$$S = 0.72 \text{ ER } \textit{psi} .$$

2.25

Donde:

E = eficiencia de junta soldada (Ver figura 2.11).

R = resistencia mínima especificada a la cedencia *psi* (figura 2.12).

### 2.5.6 Rugosidad ( $\epsilon$ ).

Este parámetro nos indica la condición en que se encuentran las paredes interiores del conducto, indica la medida de las protuberancias internas, sus unidades son: *in.* Y sus valores dependen de las condiciones del ducto, si es nuevo o antiguo. A continuación en la figura 2.10 se ilustran sus valores.

Rugosidad ( $\epsilon$ )	
Ducto nuevo	0.0018 <i>in.</i>
Ducto normal	0.0020 <i>in.</i>
Ducto antiguo	0.0022 <i>in.</i>

figura: 2.10 En la tabla se dan los valores de la rugosidad según las condiciones del ducto.

Factor de Eficiencia de Junta Soldada Longitudinal "E"		
Numero de Especificación.	Clase de tubería.	Factor "E"
ASTM A 53	Sin costura	1.00
	Soldada por resistencia eléctrica	1.00
ASTM A 106	Soldado a tope en horno soldadura continua	0.60
	Sin costura	1.00
ASTM A 134	Soldado por fusión de arco eléctrico	0.80
	Soldado por resistencia eléctrica	1.00
ASTM A 135	Soldado por fusión eléctrica	0.80
ASTM A 139	Tubo de acero soldado en espiral	0.80
ASTM A 211	Sin costura	1.00
ASTM A 333	Soldado por resistencia eléctrica	1.00
ASTM A 381	Soldado por arco sumergido doble	1.00
ASTM A 671	Soldado por fusión eléctrica	0.80
	Clase 13, 23, 33, 43, 53	1.00
ASTM A 672	clase 12, 22, 32, 42, 52	0.80
	Soldado por fusión eléctrica	1.00
API 5L*	Clase 13, 23, 33, 43, 53	0.80
	clase 12, 22, 32, 42, 52	1.00
API 5L*	sin costura	1.00
	Soldado por resistencia eléctrica	1.00
API 5L*	Soldado por centelleo (flash)	1.00
	Soldado por arco sumergido	1.00
API 5L*	Soldado a tope en horno	0.60

figura: 2.11 Eficiencia de junta soldada.

\*Esta especificación cubre también las API 5LX, 5LS, 5LV

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 2.5.7 Localización.

<sup>10</sup>Se refiere a la clase del terreno o área por donde pase una tubería de transporte de hidrocarburo.

Para el caso de líquidos, el criterio para determinar la clasificación de localizaciones esta dada en la sección 6.4 de la norma de seguridad de Petróleos Mexicanos NO-07-3-13.

### 2.5.8 Modulo de Young ( *E* ).

Es el módulo de la elasticidad del material del ducto, medida en unidades de presión *psi* . Se utiliza en análisis transitorios.

### 2.5.9 Máxima Presión de Operación Permitida ( *MAOP* ).

La máxima presión interna a la que es permitida la operación de un ducto, determina y evalúa los parámetros de diseño del tubo, se calcula con la formula de Barlow:

$$MAOP = \frac{2xSxfdt}{D} \quad psi \quad 2.26$$

Donde: *S* = Esfuerzo de trabajo Máximo permisible *psi* .

*fd* = factor de diseño, será: 1.0 para tipo de localización 1 y 2; y 0.833 para clases de localización 3 Y 4.

*t* = Espesor de la pared del ducto *in*.

*D* = Diámetro exterior del ducto *in*.

**Resistencia Mínima Especificada a la Cedencia para Tubería de Acero Comúnmente Utilizada en Sistemas de Ductos.**

Especificación	Grado	Tipo (t)	RMEC (lb/Pulg <sup>2</sup> )
API 5L	A25	BW, ERW,S	25,000
API 5L	A	ERW, S, DSA	30,000
API 5L	B	ERW, S, DSA	25,000
API 5L	X42	ERW, S, DSA	42,000
API 5L	X46	ERW, S, DSA	46,000
API 5L	X52	ERW, S, DSA	52,000
API 5L	X56	ERW, S, DSA	56,000
API 5L	X60	ERW, S, DSA	66,000
API 5L	X65	ERW, S, DSA	65,000
API 5L	X70	ERW, S, DSA	70,000
API 5L	X80	ERW, S, DSA	80,000
API 5L	X80	ERW, S, DSA	80,000

figura: 2.12 R = Resistencia Mínima Especificada a la Cedencia.

#### Abreviaturas:

BW Soldado a tope en horno, ERW Soldado por resistencia eléctrica,

S, Sin costura, FW Soldado por centelleo (Flash), EFW Soldado por fusión eléctrica,

DSA Soldado por arco sumergible doble.

<sup>10</sup> Este punto se trata más fondo en el capítulo 4, en el apartado 4.1

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 2.5.10 Silletas.

Ordinariamente las tuberías de acero empleadas son apoyadas sobre silletas. Para determinar el espacio máximo entre silletas de una tubería de acero, ésta se supone como una viga continua y un cantilever formado por el extremo de la tubería que se conecta a una junta de dilatación. De una manera Aproximada, el tramo de tubería entre dos apoyos se puede considerar como una viga simplemente apoyada como se muestra en figura 2.13.

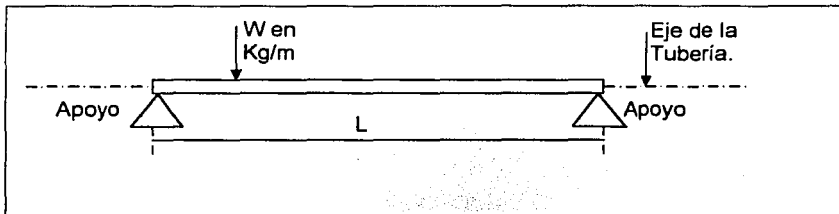


figura 2.13 Relación de silletas dispuestas en un tramo de tubería con una viga simplemente apoyada.

El momento flexionante vale:

$$M = wL^2/8 = wLL/8 = WL/8, \text{ siendo } W = wL$$

Por otro lado

$$M = fs \cdot S = WL/8$$

Por lo tanto

$$L = 8fsS/W$$

2.27

Representando:

L = Longitud de la tubería entre silletas, en m.

S = Módulo de la sección de la tubería, en  $cm^3$ .

$$S = [\pi (D^4 - d^4)] / 32D.$$

2.28

D = Diámetro exterior.

d = Diámetro interior.

W = Carga total en la tubería igual a  $wL$ , en kg.

W = Carga unitaria considerada (kg/m). Las cargas por valuar son:

Peso propio de la tubería en kg/m y Peso del combustible dentro de la tubería en kg/m.

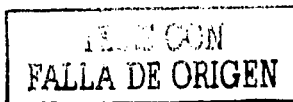
Fs = Esfuerzo a la tensión de la tubería (1265 ó 1140 kg/cm<sup>2</sup>).

Cuando por condiciones topográficas no sea posible adoptar la máxima separación entre silletas, es claro que deberán colocarse tan cercanas como sea necesario. Esto último es frecuente en cantiles y terrenos escarpados.

Las silletas pueden quedar formadas con perfiles de fierro estructural a base de ángulos, placas y soleras, o bien de concreto armado. Por facilidad de construcción se prefieren estas últimas y se calculan con la carga que les transmite la tubería. En el anexo A2-1 Se muestran los diferentes tipos de silletas.

### 2.5.11 Atraques.

Con este nombre se designa a ciertos apoyos de concreto que se emplean en las líneas de conducción a presión y su localización en un sistema hidráulico depende de las necesidades del proyecto: bifurcaciones, válvulas, codos, etc.



Desde el punto de vista hidráulico, el problema se resuelve determinando la resultante de los empujes hidrostático y dinámico que, actuando en las paredes de las tuberías, se transmiten al atraque.

En el cambio de dirección que se presenta en la figura 2.14, se han indicado dos secciones de análisis: I y II. La sección I está sujeta a una presión interna del combustible sobre las paredes del tubo P1 y una velocidad de flujo V1, siendo S1 el área de la sección transversal I. Análogamente,

Para la sección II tenemos:  
P2, V2 y S2

Las fuerzas n1 y n2 forman con los ejes x, y y z los siguientes ángulos:

EJE	n1	n2
X	A1	A2
Y	B1	B2
Z	C1	C2

Debido al cambio de dirección de la velocidad, se origina una fuerza dinámica que obra sobre la curva, y cuya magnitud por la ley del impulso es:

$$Ed = \frac{\gamma Q}{g} \Delta V$$

Siendo:  $\Delta V = V1 - V2$ ; además,  $\gamma$  es el peso volumétrico del combustible,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $Ed$  es el empuje dinámico.

La resultante del sistema de fuerzas viene dada por:

$$F = Fx^2 + Fy^2 + Fz^2$$

En donde  $Fx$ ,  $Fy$  y  $Fz$  incluyen los empujes hidrostático y dinámico que obran sobre las paredes de la tubería, a saber:

$$Fx = \frac{\gamma}{g} Q (V1 \cos A1 - V2 \cos A2) + (P1S1 \cos A1 - P2S2 \cos A2) \quad 2.29$$

$$Fy = \frac{\gamma}{g} Q (V2 \cos B1 - V2 \cos B2) + (P1S1 \cos B1 - P2S2 \cos B2) \quad 2.30$$

$$Fz = \frac{\gamma}{g} Q (V1 \cos C1 - V2 \cos C2) + (P1S1 \cos C1 - P2S2 \cos C2) + P \quad 2.31$$

Donde el primer sumando es el empuje dinámico y el segundo es el empuje hidrostático.

Para un cambio de dirección sobre el plano, a  $90^\circ$  y sin cambio de la sección transversal (figura 2.15) se tiene misma área y misma velocidad en cada sección.

$$S1 = S2 = S \quad \text{y} \quad V1 = V2 = V$$

Y los ángulos que forman las fuerzas n1 y n2 con los ejes x, y y z son:



figura 2.14 Cambio de dirección.  
figura 2.15 Cambio de dirección a  $90^\circ$  y sin cambio de sección transversal.

Eje	Ángulos
X	A1 = 0 A2 = 90°
Y	B1 = 90° B2 = 0
Z	C1 = 90° C2 = 90°

Se considera también que la pérdida local es cero, así que:  $P1 = P2 = P$

Al sustituir estos resultados en las ecuaciones de las componentes de F, se tiene:

$$F_x = \frac{\gamma}{g} QV + PS \quad 2.32$$

$$F_y = \frac{\gamma}{g} QV - PS \quad 2.33$$

$F_z$  = Peso de la tubería más el combustible en la sección del ataque, como esta fuerza es benéfica para el ataque, generalmente se desprecia. La resultante de estas fuerzas es horizontal y hacia fuera de la curva. Esta resultante debe ser contrarrestada por el peso del ataque. Se tiene:

$$F = F_x^2 + F_y^2$$

$$F = \left(\frac{\gamma}{g} QV + PS\right)^2 + \left(-\frac{\gamma}{g} QV - PS\right)^2 \quad 2.34$$

$$F = 2 \left(\frac{\gamma}{g} QV + PS\right) \quad 2.35$$

El valor más crítico de F, es cuando se presente la sobrepresión por golpe de ariete. Llamando  $P_n$  a la presión normal y  $P_{ga}$  a la presión debida al golpe de ariete, se tiene:  $P = P_n + P_{ga}$

Cuando tenemos el caso de un cambio de dirección en el plano horizontal y a cualquier ángulo, como se presenta en la figura 2.16, las componentes de la resultante F son:

$$F_x = F_1 = \frac{\gamma}{g} Q (V - V \cos E) + (PS - PS \cos E) \quad 2.36$$

$$F_y = F_2 = \frac{\gamma}{g} Q (V \cos E - V) + (PS \cos E - PS) \quad 2.37$$

Esto se debe a que los ángulos con respecto a x, y y z son:

FUERZA F1 F2

Eje Ángulos

X A1 = 0 A2 = E

Y B1 = E B2 = 0

Z C1 = 90° C2 = 90°

$$\text{Simplificando } F_1 = \frac{\gamma}{g} Q [V(1 - \cos E)] + PS (1 - \cos E)$$

$$F_2 = \frac{\gamma}{g} Q [-V(1 - \cos E)] - PS (1 - \cos E)$$

En fin:

$$F = F_1 + F_2 \quad F = 2 \left(\frac{\gamma}{g} QV + PS\right) \sin \frac{E}{2} = 2S \left(\frac{\gamma \sqrt{2}}{g} + P\right) \sin \frac{E}{2} \quad 2.38$$

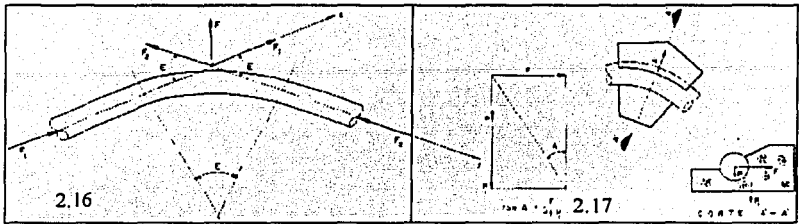


figura 2.16 Cambio de dirección y cualquier ángulo.  
 figura 2.17 Ilustración del peso del atraque de concreto y un tramo de la tubería llena de combustible.

En la figura 2.17 P1 es el peso del atraque de concreto. En concreto ciclópeo  $\gamma_c = 2400 \text{ kg/cm}^3$ . P es el peso de la sección de tubería llena de combustible, de tal forma que debe cumplirse la siguiente inecuación:

$$P + P1 \geq \frac{F}{\tan A_{\mu}}, \text{ donde } A_{\mu} > A \text{ para que no haya deslizamiento.}$$

Siendo  $A_{\mu}$  el ángulo de fricción entre el material de atraque y el terreno. Para este caso  $A_{\mu} = 30^\circ$ . Generalmente se emplea un factor de seguridad de 1.2 en el diseño de los atraques.

## 2.6 Ecuaciones Fundamentales.

### 2.6.1 Ecuación de Continuidad.

La combinación de la ley de la conservación de la masa con el teorema de transporte produce una de las ecuaciones más útiles de la mecánica de fluidos: la ecuación de continuidad.

Todos los análisis de flujo la emplean de alguna manera.

Si la velocidad es uniforme y perpendicular al área la ecuación se expresa:

$$Q = V \times A \quad \text{ft}^3/\text{s} \quad 2.39$$

Donde:

Q = caudal  $\text{ft}^3/\text{s}$

V = Velocidad del Líquido  $\text{ft}^2/\text{s}$ .

A = Área del tubo  $\text{ft}^2$ .

El principio de conservación de la materia establece que:

La totalidad de masa que en la unidad de tiempo entra a un volumen especificado dentro del flujo, una parte queda almacenada dentro del mismo y el resto sale del volumen.

### 2.6.2 Ecuaciones de Energía.

La ecuación de la energía aplicada al flujo de un líquido describe la relación de las diferentes energías íntimas de presión, de velocidad y de posición. Mediante la aplicación del concepto de conservación de la energía, tomada de la primera ley de la termodinámica que menciona: "La

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

energía no se crea ni se destruye, solo se transforma". Esto es, para cualquier sistema de masa (conjunto identificado e incambiable de materia), el calor neto suministrado al sistema es igual al aumento de energía del sistema, más toda la energía que deja el sistema al realizarse trabajo.

### 2.6.2.1 Ecuación de Bernoulli.

La ecuación de Bernoulli es fundamental en el movimiento de los líquidos, relaciona entre sí la presión en el líquido, la velocidad de su movimiento y la altura a la que se halla el mismo, esta resulta de analizar la corriente estable del líquido, solo bajo la acción de la fuerza de masa y de gravedad.

La ecuación de Bernoulli, esta enunciada para dos secciones cualesquiera de filetes componentes del flujo y expresa para el flujo real la ecuación del balance de energía ya que tiene en cuenta las pérdidas debidas a la distribución irregular de la velocidad y la viscosidad, es decir, que la energía específica del líquido viscoso en movimiento (energía total), no es constante, sino que se agota gradualmente para vencer la resistencia y, por consiguiente, disminuye a lo largo del flujo.

A continuación se muestra y describe la ecuación. Y en la figura 2.18 podemos observar la descripción gráfica.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + \text{Pérdidas.} \quad 2.40$$

Donde:

$Z$  =Es la altura de posición o energía específica de posición (geométrica), ya que el líquido, estando a la altura  $Z$ , dispone de una energía de posición.

$\frac{P}{\gamma}$  =Es la altura de presión o energía específica de presión (piezométrica), del líquido en movimiento, ya que este bajo la presión "P", dispone de la capacidad de elevarse a la altura  $P/\gamma$ , y adquirir de este modo una energía de posición.

$\frac{V^2}{2g}$  = Es la altura dinámica o energía específica cinética (dinámica) del líquido. Debido a la distribución irregular de la velocidad, durante el análisis es necesario utilizar la velocidad media de la sección.

$\text{Pérdidas}(\sum hf)$  = Es el termino que representa la sumatoria de las pérdidas de la energía específica (de altura de presión), que se conoce como pérdidas hidráulicas y que dependen de la forma, dimensiones y rugosidad del conducto, de la velocidad de corriente y de la viscosidad del líquido, pero no dependen del valor absoluto de la presión en el líquido. La energía que pierde el líquido en el sector dado de la corriente, como es natural, no desaparece, sino que se transforma en energía térmica (no aprovechable para el sistema), que produce cierto aumento de la temperatura del líquido.

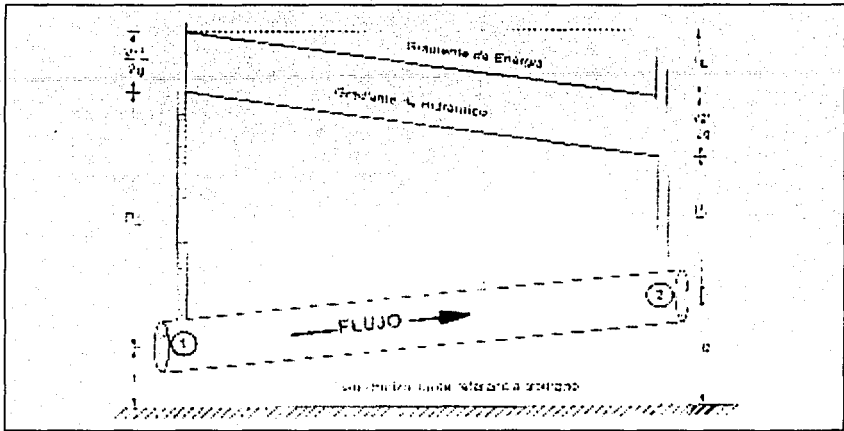


figura: 2.18 Representación gráfica de la ecuación de Bernoulli .

### 2.6.2.2 Pérdidas por fricción ( $h_f$ ).

La ecuación general para determinar las pérdidas de presión debido a la fricción, conocida como la ecuación de Darcy y expresada en pies de líquido, es:

$$h_f = \frac{fL V^2}{d 2g} \quad \text{ft} \quad 2.41$$

Donde:

- $h_f$  = Pérdida de columna debido a la fricción *ft* .
- $f$  = Factor de fricción. Adimensional
- $L$  = Longitud de ducto. *ft* .
- $V$  = Velocidad de flujo *ft / s* .
- $g$  = Constante de aceleración gravitacional *ft / s<sup>2</sup>* .

Esta ecuación puede ser escrita para convertir los términos a unidades de Ingeniería más conveniente:

$$h_f = \frac{0.0026458 f x Q^2 x GE}{d} \quad \text{kg / cm}^2 / \text{km} \quad 2.42$$

Donde:

- $Q$  = Flujo *BPD* .
- $GE$  = Gravedad específica a temperatura de flujo.
- $d$  = Diámetro interior *in*.
- $f$  = Factor de fricción.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

### 2.6.2.1 Factor de Fricción ( $f$ ).

En la industria petrolera han sido desarrolladas varias ecuaciones para simplificar la ecuación de Colebrook. En la Subgerencia de Control de Operaciones de la Gerencia de Transportación por Ducto, se han analizado y experimentado con diversas ecuaciones para determinar el factor de fricción, los resultados más convincentes se han obtenido con las siguientes condiciones y ecuaciones:

$$\text{Si } GE > 0.8 \implies f = 0.331 / \text{Re} E^{0.252} \quad 2.43$$

$$\text{Si } GE < 0.8 \implies f = \text{factor de Swame - Jain}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \log \left( \frac{\varepsilon}{d} + \frac{21.25}{\text{Re}^{0.9}} \right) \quad 2.44$$

Despejando el factor de fricción de 2.44 tenemos:

$$f = \left( \frac{1}{1.14 - 2 \log \left( \frac{\varepsilon}{d} + \frac{21.25}{\text{Re}^{0.9}} \right)} \right)^2 \quad 2.45$$

Este factor es determinado en forma experimental y no tiene dimensiones. El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ( $\text{Re} < 2000$ ) es función del número de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ( $\text{Re} < 4000$ ) es también función del tipo de pared de tubería.

La región que se conoce como la "zona crítica" que aparece entre los números Reynolds de 2000 a 4000. En esta región el flujo puede ser tanto laminar como turbulento. El factor de fricción en esta región es indeterminado.

Para números de Reynolds superiores a 4000, las condiciones de flujo vuelven a ser más estables y pueden establecerse factores de rozamiento definitivos. Esto es importante porque permite al ingeniero determinar las características del flujo de cualquier fluido que se mueva por una tubería, suponiendo conocidas la viscosidad y la densidad en las condiciones de flujo, se pueden utilizar algunas formulas empíricas para el flujo de agua, petróleo y otros líquidos, teniendo en cuenta las restricciones citadas.

La solución grafica de este factor de fricción  $f$ , esta dada por el diagrama de Moody. En este, el factor de fricción  $f$  se grafica con base a la rugosidad<sup>11</sup> relativa y el numero de Reynolds. El valor de  $f$  se determina por la proyección horizontal de la intersección de la curva  $\varepsilon/d$  según el número de Reynolds calculado en la escala vertical a la izquierda del cuadro de la figura 2.19.

Debe tenerse en cuenta que estos valores solo se aplican cuando las tuberías están nuevas y limpias.

<sup>11</sup> Más información: pagina 311 de Mecánica de Fluidos de Streeter/Wylie ed. Mc Graw Hill sexta ed.

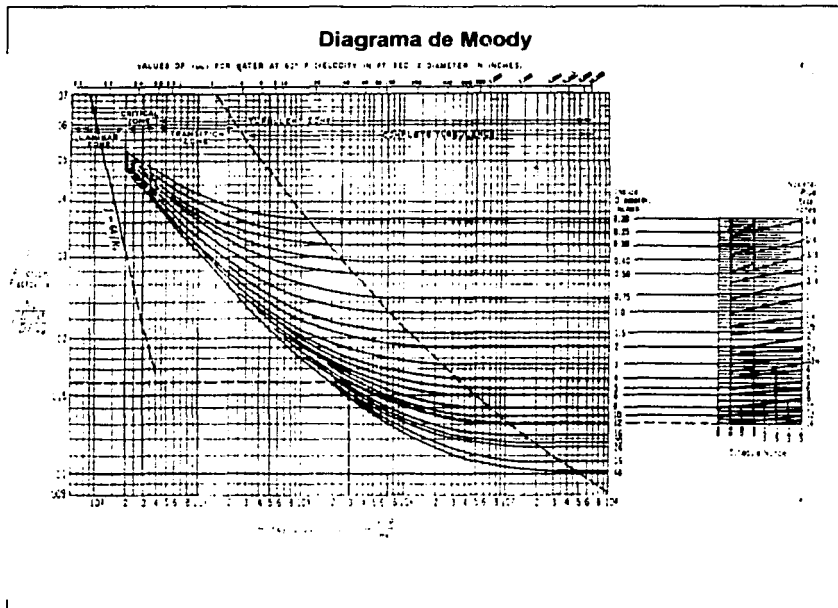


figura: 2.19 Diagrama de Moody.

## 2.6.2.3 Gradiente Hidráulico.

### 2.6.2.3.1<sup>12</sup> Presión Dinámica.

La presión dinámica en un tubo, puede resultar de la conversión de la presión estática (figura. 2.20), o puede originarse debido a la energía proporcionada por una bomba. En el caso de los líquidos conducidos en tuberías, la gravedad y la fricción varían el movimiento uniforme del líquido; la gravedad tiende a incrementar o disminuir el rango de movimiento. Mientras que la fricción es una fuerza negativa que se opone a la presión dinámica, ocasionando una pérdida de energía a medida que el líquido se desplaza por el tubo.

En la figura 2.21 se ilustra la pérdida de presión dinámica a medida que el líquido recorre la tubería. El rango de este cambio de presión se le denomina Gradiente Hidráulico.

Para condiciones homogéneas de viscosidad y gravedad específica del líquido que fluye en un tubo de sección transversal y rugosidad constantes, las pérdidas son uniformes; como se muestra en la figura 2.21

<sup>12</sup> También se le nombra altura dinámica o carga dinámica y conocida en inglés como: Head.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



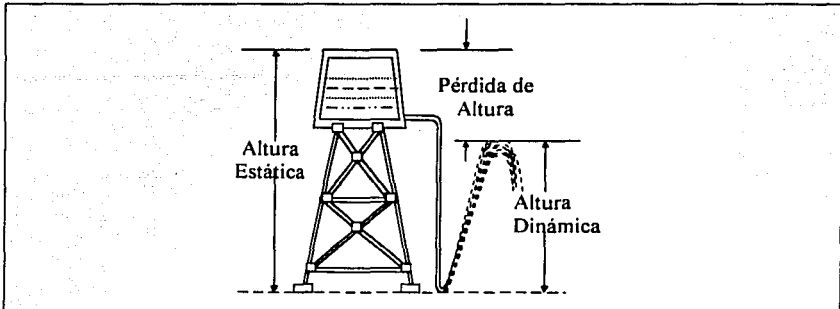


figura: 2.20 Un ejemplo de cómo la energía potencial, o carga estática, de un líquido almacenado en un tanque elevado es convertida en carga dinámica, la pérdida de carga es debido a la fricción en el tubo y en el aire después de que el líquido deja el tubo.

Esta uniformidad permite el dibujo de líneas de gradiente con solo dos valores de presión dinámica conocidos o supuestos.

El gradiente es medido en unidades de presión o pérdidas de altura por unidad de longitud de tubo.

En el caso del petróleo crudo las unidades usuales son libras por pulgada cuadrada  $psi$  por milla de tubo. En la figura 2.22 se muestra la relación de entre altura estática, el gradiente hidráulico y los efectos que se originan cuando es conducido un cierto volumen de líquido.

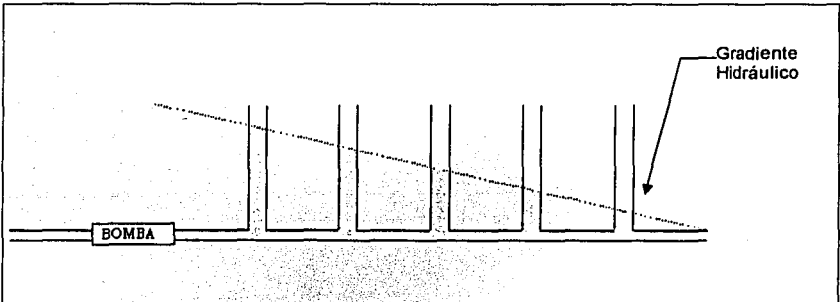


figura: 2.21. En este dibujo se ilustra el gradiente hidráulico. La altura dinámica proporcionada por la presión de bomba tiene un continuo decremento debido a la fricción en los tubos. La pérdida en la altura dinámica se incrementará con el rango de fluido que recorra el tubo.

TESTS CON  
FALLA DE ORIGEN

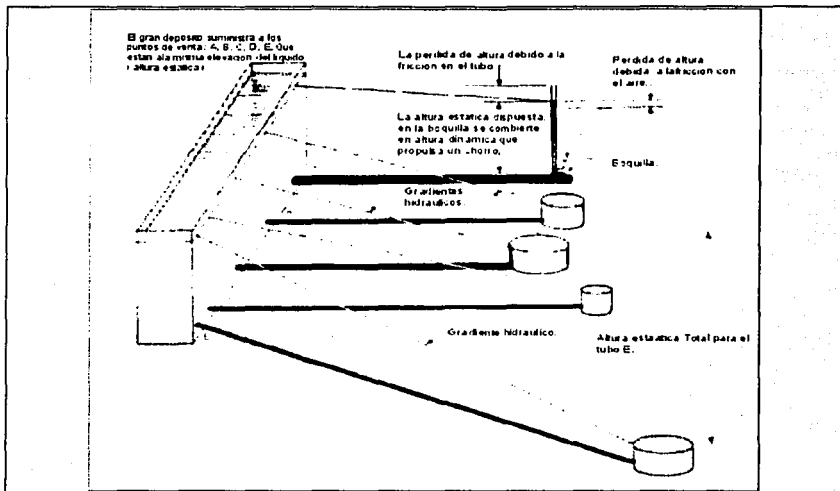


figura: 2.22 Muestra la relación entre las alturas estáticas y los gradientes hidráulicos y sus efectos en los volúmenes de líquido que fluyen.

De la figura 2.22 se observa:

El tubo "A" es largo y la boquilla restringe el volumen de flujo, así la presión liberada es menor que la altura estática dispuesta en la boquilla. El gradiente Hidráulico comparativamente es horizontal.

El tubo "B" mas pequeño que el tubo "A" y toda la altura estática es usada para originar un flujo en el tubo. Su gradiente hidráulico es más inclinado que el de "A".

El tubo "C" Tiene la misma longitud que "A" pero es mas largo que "B". La misma altura estática produce un alto rango de flujo que en el tubo "B" y con la misma inclinación del gradiente hidráulico resulta en un gran volumen de flujo en el mismo periodo de tiempo.

El tubo "D" del mismo diámetro que el "B" pero más largo. Su gradiente hidráulico es más horizontal que "B", esto indica un rango menor de flujo.

El tubo "E" Mismo diámetro que "B" pero mucho más largo y la altura hidráulica es mucho más grande porque el tubo "E" tiene una inclinación mucho mayor desde el deposito, su gradiente hidráulico es mucho más inclinado que "A", "B", "C", "D". Así que el mayor volumen de flujo ocurre a pesar del incremento de la longitud del tubo.

### 2.6.2.3.2 Gradiente Hidráulico.

El gradiente hidráulico es la representación gráfica de la energía total en un ducto en cualquier momento del tiempo, generalmente es graficado versus el perfil de elevaciones y esta basado en la ecuación de Bernoulli.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

El gradiente Hidráulico establece la presión (o columna) en cualquier punto del ducto con cualquier condición de presiones en los extremos del ducto (figura 2.23). La presión en cualquier punto puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$P_x = P_d - P_f + P_s \quad 2.46$$

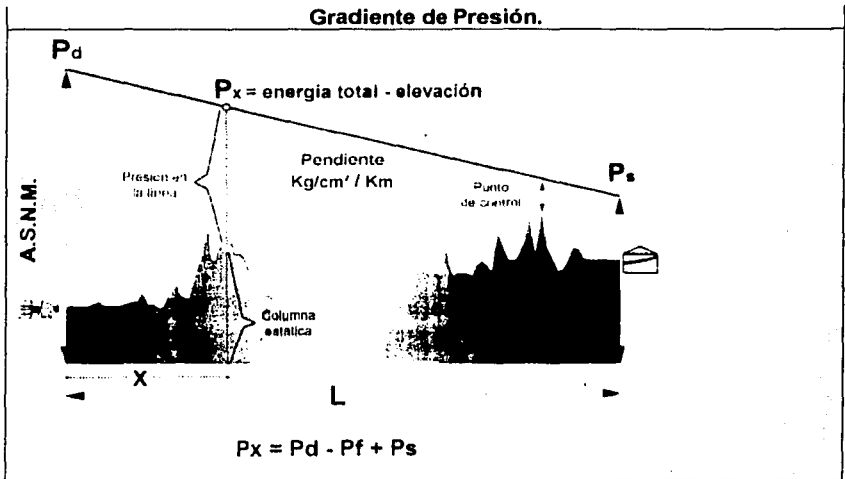


figura: 2.23 Gradiente hidráulico en perfil de elevaciones.

De la ecuación (2.37)  $P_x = P_d - P_f + P_s$  Tenemos que:

$$P_f = hf \text{ (pérdidas por fricción)}$$

$P_d = hd$  (altura dinámica). Para conocer esta última variable es necesario calcularla por medio de unas <sup>13</sup>ecuaciones empíricas (2.47, 2.48, 2.49):

$$P_d = Ge \left( \frac{H_2 - H_1}{10} \right) + Pf(L_2 - L_1) + P_b \quad 2.47$$

$$P_d = Ge \left( \frac{H_2 - H_1}{10} \right) + Pf(L_2 - L_1) + P_a \quad 2.48$$

$$P_b = Ge \left( \frac{H_1 - H_2}{10} \right) + Pf(L_2 - L_3) + P_a \quad 2.49$$

<sup>13</sup> Formulas obtenidas del manual del curso " Pipeline Hydraulic". Petroleum Extensión Service. University of Texas at Austin.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Donde:

$P_d$  = Altura dinámica  $ft$  de líquido,  $psi$  o  $Kg/cm^2$ .

$P_a$  =<sup>14</sup>Presión de descarga requerida. Altura dinámica  $ft$  de líquido,  $psi$  o  $Kg/cm^2$ .

$G_e$  = Gravedad específica del líquido, Adimensional.

$H_2$  = Altura final  $ft$ .

$H_1$  = Altura inicial  $ft$ .

$P_f$  = Perdidas por Fricción.  $PSI / milla$  o  $kg/cm^2 / km$ .

$L_2$  = Longitud Final. Milla o Kilómetro.

$L_1$  = Longitud Inicial. Milla o Kilómetro.

### 2.6.2.3.3 Punto de Control.

La localización del punto de control a lo largo del conducto es importante, debido a que es el lugar donde la energía requerida para bombear hasta este es más grande, que la energía requerida para bombear hasta el final del ducto; a un flujo en particular ver figura 2.23.

Es importante localizar este tipo de puntos y determinar su valor (altura); ya que son lugares, por lo regular más elevados que el destino, y por lo tanto se requiere una mayor presión para pasar el líquido conducido por este lugar en comparación con la presión de entrega del hidrocarburo (figura 2.23). Si se tratara de pasar el hidrocarburo por este punto de control a la presión de entrega (descarga) ósea a una presión por debajo de la requerida para salvar el punto de control; al llegar a este lugar el líquido conducido, experimentaría una caída de presión y como resultado el líquido alcanzaría su presión de vapor o un valor por debajo de esta, originando un cambio de fase en el líquido, que se convertiría en vapor; esto ocasiona problemas en la conducción ya que sería puro vapor el que se tratara de bombear, y también, se originaría el efecto de cavitación.

## 2.7 Fenómenos Transitorios.

La hidráulica en sus inicios como ciencia a fines del siglo pasado, contaba con un gran empirismo en torno a la aplicación de problemas de ingeniería. Sin embargo, debido a la evolución que ha tenido la hidráulica en el presente siglo, se han desarrollado estudios y experimentos.

De los temas desarrollados y unos de los más importantes, que afectan y que se debe tomar en cuenta en el diseño de sistemas de conducción, son los fenómenos de transición de los cuales los más comunes son: Cavitación y Golpe de Ariete.

### 2.7.1 Cavitación.

En la técnica son innumerables los problemas hidrodinámicos relacionados con la cavitación, hasta en la circulación sanguínea se puede producir la cavitación, la cual puede conducir a enfermedades del corazón y de las arterias.

La cavitación es un fenómeno producido por un descenso de la presión en algún punto o zona de la corriente de un líquido, por debajo de un cierto valor mínimo admisible. Este fenómeno se puede describir de la siguiente manera:

<sup>14</sup> Por lo general, es una presión con rango de valores entre 4 y 8  $Kg/cm^2$ .

Cuando la corriente en un punto de la bomba alcanza una presión inferior a la presión de saturación de vapor, el líquido se evapora y se origina en el interior del líquido "cavidades" de vapor. Estas cavidades o burbujas de vapor arrastradas por la corriente llegan a zonas en donde hay presiones muy elevadas, y allí se produce una condensación violenta del vapor (las burbujas explotan). Esta condensación del vapor a su vez produce una elevación local de la presión, en consecuencia en el interior del fluido existen zonas en que hay un gradiente fuerte de presiones que acelera las burbujas y producen un impacto en el contorno.

Antiguamente se pensaba que la cavitación era una corrosión química producida por la liberación del aire y el oxígeno disuelto en el líquido a bajas presiones, actualmente se sabe que la cavitación es producida principalmente por la acción mecánica de impactos rápidos, a manera de explosiones de las partículas del líquido, aunque no se elimina la posibilidad de una acción química corrosiva, cuya naturaleza no se ha demostrado por completo.

Estos impactos son periódicos, es decir, se produce un fenómeno vibratorio que aumenta la erosión del material por fatiga.

### La cavitación:

- En las bombas produce dos efectos perjudiciales, los cuales son: Disminución del rendimiento y la erosión.
- En la tubería o el sistema: Daña los conductos para el escurrimiento y produce ruido y vibraciones molestas.

#### 2.7.1.1 Coeficiente de Cavitación.

Los ensayos de cavitación tanto de las bombas como de las turbinas hidráulicas se llevan a cabo en modelos a escala reducida.

La semejanza dinámica en estos ensayos queda garantizada si se hacen el modelo y el prototipo igual en coeficiente de cavitación, o coeficiente de Thoma, que se define así:

$$\sigma = \frac{\Delta h}{H} \quad 2.50$$

Donde:

H = Carga total.

$\Delta h$  = Caída de altura de presión en el interior de la bomba y cuyo valor al igualarse con la MPS requerida dará lugar a que se inicie la cavitación.

$\sigma$  = Coeficiente de Cavitación.

Se ha comprobado experimentalmente que  $\Delta h$  en las bombas geoméricamente semejantes es proporcional a H, lo cual equivale a decir que el coeficiente  $\sigma$  es el mismo para toda la serie de bombas geoméricamente semejantes entre sí.

El  $\Delta h$  depende de la forma geométrica de la bomba, sobre todo de la forma de la boca de entrada del impulsor y de la curva del ábabe.

Para conocer o poder determinar la altura HS es preciso conocer  $\Delta h$ . El valor de  $\Delta h$ , o equivalentemente el valor de  $\sigma$ , suele ser suministrado por el constructor de la bomba, que a su vez lo ha obtenido experimentalmente mediante un ensayo de cavitación.

Por otra parte, Stepanoff sugiere el empleo de la siguiente fórmula para una estimación aproximada de  $\sigma$ :

Por otra parte, Stepanoff sugiere el empleo de la siguiente fórmula para una estimación aproximada de  $\sigma$ :

$$\sigma = 2.14 \times 10^{-4} \eta_s^{4/3} \quad 2.51$$

Donde  $\eta_s$  es el número específico de revoluciones, que viene dado por la ecuación:

$$\eta_s = 3.65 \frac{nQ^{1/2}}{H^{3/4}} \quad 2.52$$

Donde  $n$ ,  $Q$ , y  $H$  son las características nominales de la bomba (o características para la máxima eficiencia) expresado en rpm, metros cúbicos sobre segundo y metros, respectivamente.

### 2.7.2 Golpe de Ariete.

Para la protección del equipo de bombeo y de la tubería de conducción, se deben considerar los efectos producidos por el fenómeno denominado golpe de ariete.

Se denomina Golpe de Ariete a la variación de presión en una tubería, por encima o por debajo de la presión normal de operación, ocasionada por rápidas fluctuaciones en el gasto, producidas por la abertura o cierre repentino de una válvula o por el paro o arranque de las bombas, ya sea en condiciones de operación normales o por una interrupción de la energía eléctrica, cuando ésta se utiliza en los motores que impulsan a las bombas.

Al cerrar la admisión de combustible con la válvula P de la figura 2.24, se origina un golpe de ariete positivo, como indica la línea piezométrica AB. Al cesar el movimiento de cierre termina la sobrepresión positiva AB y oscila hasta adquirir una posición negativa AC con respecto a la línea de carga estática, aproximadamente a igual distancia por debajo de la que ésta AB. Y entre estas dos líneas va oscilando la presión disminuyendo de intensidad hasta que la oscilación queda amortiguada por el rozamiento, remolinos y cambios de dirección de los filetes líquidos.

Cuando se abre la admisión, se crea el golpe de ariete negativo que indica la línea piezométrica de la figura 2.25 Después que cesa el movimiento de apertura, la presión negativa GF, oscila hasta la positiva GH, elevándose ésta por encima de la línea de carga estática, a menos distancia que la GF queda de ésta.

La línea de conducción debe proyectarse para resistir en cada punto a una presión interna correspondiente a la máxima que produce el golpe de ariete positivo AB (figura 2.24). Además, la presión negativa AC (figura 2.24) o GF (figura 2.25) no debe quedar nunca por debajo, en ningún punto, de la arista superior del tubo; pues si se produjese en el punto k, que está más expuesto, un vacío parcial, habría peligro de aplastamiento si la tubería no tiene resistencia para soportar la presión exterior atmosférica.

Existen métodos analíticos y gráficos para el cálculo de la sobrepresión por "golpe de ariete". Para el cálculo de sobrepresión por golpe de ariete, se ha adoptado la fórmula de Lorenzo Allievi que se describe a continuación. Con esta fórmula se obtiene el valor máximo que puede adquirir esta sobrepresión, ya que fue deducida considerando las condiciones más críticas para el cierre de una válvula, esto es, aceptando que la máxima sobrepresión se verifica al instante de la primera fase del fenómeno y que el tiempo de cierre es:

$$T = \frac{2L}{a} \quad \text{Tiempo de cierre} \quad 2.53$$

TESIS CON  
FOLIA DE ORIGEN

La fórmula es:

$$hi = \frac{145V}{1 + \left( \frac{E_a D}{E_s e} \right)}$$

2.54

Para:  $T = \frac{2L}{a}$

Representando:

$hi$  = sobrepresión de inercia por golpe de ariete en m.

$V$  = velocidad del combustible en la tubería en m/s.

$E_a$  = módulo de elasticidad del combustible, en kg/cm<sup>2</sup>.

$D$  = diámetro interior de la tubería en cm.

$e$  = espesor de la tubería en cm.

$E_s$  = módulo de elasticidad del material de la tubería en kg/cm<sup>2</sup>.

$L$  = longitud de la tubería en m.

$a$  = celeridad de la onda de presión en m/s.

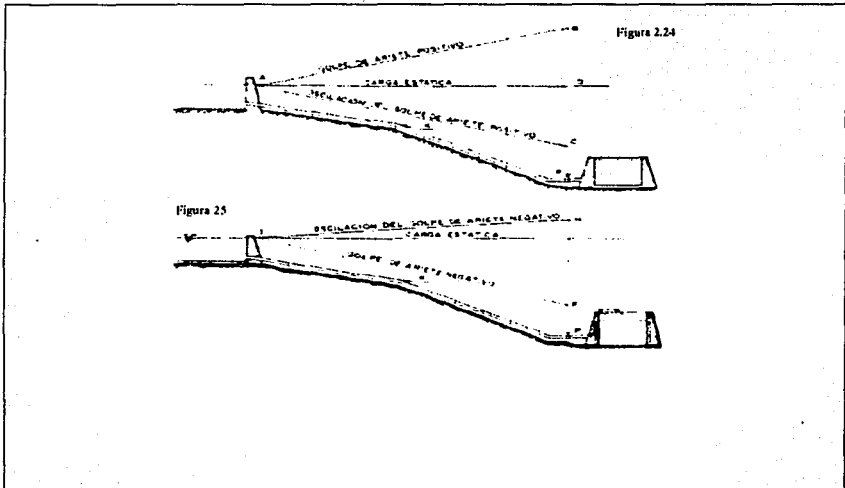


figura : 2.24 Oscilación de la línea piezométrica de una tubería en un golpe de ariete.

figura: 2.25 Oscilación de la línea piezométrica de una tubería en un golpe de ariete negativo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 2.8 Cálculo del Gasto (Consumo).

Al diseñar un sistema de conducción, nos basamos en una estimación de consumo futuro de las TADs para las que estamos planteando el diseño. A este consumo corresponderá al que se tendrá al último día del periodo de diseño que se fija.

Es indudable que de la mayor o menor aproximación que se logre en la predicción del consumo dependerá que la obra cumpla con su cometido futuro, y que efectivamente al reducirse el grado de incertidumbre en el diseño este pueda ser más económico.

Es importante tomar determinadas precauciones y tener en cuenta los factores limitantes para hacer una buena predicción. Por ejemplo, debe hacerse una estimación de la capacidad disponible de la TAD para saber si una predicción determinada resulta o no razonable. Así, hay lugares que ya están saturados y tienen poco espacio o capacidad de almacenaje y por consiguiente no se puede suponer que tengan crecimiento futuro a la hora de estudiar su capacidad disponible.

La base para estimar las tendencias de consumo futuras de las TADs es su pasado desarrollo, y la fuente de información más importante sobre el mismo en PEMEX, son los censos levantados cada año. Los datos de los censos de consumo pueden adaptarse a un modelo matemático, como son el aritmético, geométrico, parabólico, etc.

### 2.8.1 Modelo Aritmético.

El modelo aritmético tiene como característica un incremento de consumo constante para incrementos de tiempo iguales y, en consecuencia la velocidad de crecimiento, ósea, el incremento del consumo y el periodo de tiempo es una constante; expresado en una ecuación se tiene:

$$\frac{dP}{dt} = K_a \quad 2.55$$

o bien:

$$dP = K_a dt \quad 2.56$$

Donde:

$P$  = Consumo

$t$  = Tiempo

$K_a$  = Constante que significa el incremento de consumo en la unidad de tiempo (año, decenio, etc.)

Integrando 2.56:

$$\int_1^2 dP = K_a \int_1^2 dt \quad 2.57$$

se obtiene:

$$P_2 - P_1 = K_a(t_2 - t_1) \quad 2.58$$

De 2.58 se obtiene:

$$K_a = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad 2.59$$



Para un momento  $T$  cualquiera se tiene la ecuación lineal:

$$P = P_2 + K_a(T - t_2) \quad 2.60$$

Donde el índice "2" se considera para los datos iniciales ( $P_2$ , población inicial en el tiempo  $t_2$ )

### 2.8.2 Modelo Geométrico.

El modelo geométrico de crecimiento de consumo se caracteriza por tener una velocidad de crecimiento directamente proporcional al valor del consumo en cada instante de tiempo, o sea:

$$\frac{dP}{dt} = K_a P \quad 2.61$$

$$\frac{dP}{P} = K_a dt \quad 2.62$$

donde:

$K_a$  = Es la velocidad de crecimiento cuando el consumo  $P$  es la unidad.

Integrando 2.62:

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{dP}{P} = K_a \int_{t_1}^{t_2} dt \quad 2.63$$

se obtiene:

$$\text{Ln}P_2 - \text{Ln}P_1 = K_a(t_2 - t_1) \quad 2.64$$

Y de la 2.64

$$K_a = \frac{\text{Ln}P_2 - \text{Ln}P_1}{t_2 - t_1} \quad 2.65$$

Para un momento  $T$  cualquiera se tiene:

$$\text{Ln}P = \text{Ln}P_2 + K_a(T - t_2) \quad 2.66$$

Cuando se supone un crecimiento en progresión geométrica, los valores que se obtienen para el consumo futuro son mayores que los que se obtendrían si se supone un crecimiento en progresión aritmética.

La expresión 2.66 puede escribirse:

$$\text{Ln}P = \text{Ln}P_0 + K_a t \quad 2.67$$

Donde  $P_0$  es el consumo  $t = 0$ . Tomando antilogaritmos a 2.70 se obtiene:

$$P = P_0 e^{K_a t} \quad 2.68$$

La ecuación 2.68 es la conocida como la de capitalización con interés compuesto, es decir, el interés periódico se capitaliza aumentando el capital interior y usualmente  $e^{K_a}$  se representa como  $(1+i)$ , donde  $i$  es la tasa de interés y la expresión de  $P$  quedará:

$$P = P_0(1+i)^t \quad 2.69$$

Ambas expresiones: 2.68 y 2.69 corresponden al modelo geométrico de crecimiento. Aunque comúnmente se ha aceptado el referirse a la expresión 2.69 como método de interés compuesto.

### 2.8.3 Modelo Geométrico Decreciente.

Cuando la población tiende a un valor máximo denominado "de saturación", es conveniente estimar el consumo futuro con los parámetros de la ley de crecimiento que puede considerarse geoméricamente decreciente.

La población puede llegar a ese valor máximo de saturación, a causa de limitaciones de sus recursos económicos, naturales, o del área urbanizable, por ejemplo. La velocidad de crecimiento sería directamente proporcional al consumo faltante de saturación, es decir:

$$\frac{dP}{dt} = K_D(L - P) \quad 2.70$$

donde  $L$  es el consumo máximo o de saturación. La función de consumo se obtiene integrando la expresión 2.70:

$$\int_1^2 \frac{dP}{L - P} = K_D \int_1^2 dt \quad 2.71$$

$$- \ln(L - P)_1^2 = K_D(t_2 - t_1) \quad 2.72$$

$$- \ln \frac{L - P_2}{L - P_1} = K_D(t_2 - t_1) \quad 2.73$$

de donde:

$$K_D = \frac{- \ln \frac{L - P_2}{L - P_1}}{t_2 - t_1} \quad 2.74$$

Para un consumo  $P$  a un tiempo futuro  $T$ , tomando como datos iniciales  $P_2$  al tiempo  $t_2$ , se tiene:

$$- \ln \frac{L - P}{L - P_2} = K_D(T - t_2) \quad 2.75$$

o bien:

$$\ln \frac{L - P}{L - P_2} = -K_D(T - t_2) \quad 2.76$$

Despejando  $P$ , se tiene:

$$\frac{L - P}{L - P_2} = e^{-K_D(T-t_2)}$$

$$L - P = (L - P_2)e^{-K_D(T-t_2)}$$

$$-P = -L + (L - P_2)e^{-K_D(T-t_2)}$$

$$P = L - (L - P_2)e^{-K_D(T-t_2)} \quad 2.77$$

Restando  $P_2$  a ambos lados de la igualdad:

$$P - P_2 = (L - P_2) - (L - P_2)e^{-K_D(T-t_2)} \quad 2.78$$

Asociando:

$$P - P_2 = (L - P_2)(1 - e^{-K_D(T-t_2)}) \quad 2.79$$

### 2.8.4 Método de los Incrementos Diferenciales.

Este método consiste en considerar que la segunda diferencia entre los datos de consumo es constante, lo cual equivale a ajustar los datos a los de una parábola de segundo grado. Se requiere que los datos sean equidistantes para la aplicación del método.

Modelo de la parábola cúbica.

Este método considera que la curva de crecimiento se aproxima a la de una parábola cúbica del tipo:

$$P = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad 2.80$$

En donde  $x$  = año.

Para aplicar este método se requiere contar con al menos cuatro datos.

Método de extensión de la curva de ojo.

Este método consiste en graficar los datos de población en papel milimétrico. Se forma un par de ejes coordenados, el de las ordenadas para los datos del combustible y el de las abscisas para las fechas a que corresponden dichos datos. Una vez que se tienen los puntos localizados, se unen por medio de una línea que será la curva representativa del combustible. Esta curva se prolonga siendo la tendencia anterior, hasta el tiempo futuro deseado, encontrando así la población en el eje de las ordenadas.

### 2.8.5 Predicción con Series Cronológicas.

En los cálculos realizados anteriormente utilizamos sólo dos datos para los métodos aritmético y geométrico. En el método de las predicciones con series cronológicas se utiliza toda la información disponible que se considera representativa y adecuada (información seleccionada). La tendencia

de una serie cronológica puede ser descrita por una recta si en cada intervalo de tiempo la serie aumenta o disminuye en una cantidad constante.

### 2.8.6 Método de los mínimos cuadrados.

Una relación lineal entre dos variables queda representada por una línea recta cuya ecuación general es  $Y = a + bx$ . El método de los mínimos cuadrados es el procedimiento matemático utilizado para determinar los valores numéricos de las constantes " $a$ " y " $b$ " en la ecuación. El método utiliza el conjunto de observaciones que en este caso son años y número de consumo. " $x$ " = años; " $Y$ " = consumo. Cuando la serie de datos no se ajusta a una recta, por quedar los puntos muy dispersos en el plano, podemos intentar el ajuste a una curva logarítmica o exponencial. En forma similar al método anterior la ecuación está representada por:

$$\log Y = a + bx \qquad 2.81$$

Donde las constantes de regresión  $a$  y  $b$  se calculan por el método de mínimos cuadrados. En este método el consumo debe estar en forma logarítmica. Resolviendo el sistema de ecuaciones se encontraran los resultados de  $a$  y  $b$  y de ahí se sacará su antilogaritmo el cual nos permitirá calcular el consumo ( $Y$ ).

F a l t a

P á g i n a

54

## C A P Í T U L O 3

### Bombas, Tuberías y Válvulas para Hidrocarburos Líquidos.

#### 3.1 Bombas Rotodinámicas.

##### 3.1.1 Definición.

Bomba es una máquina que absorbe energía eléctrica, la transforma en energía mecánica y restituye al líquido que lo atraviesa energía hidráulica.

Las bombas se emplean para impulsar toda clase de líquidos (agua, aceites de lubricación, combustibles, ácidos, líquidos alimenticios: cerveza, leche, etcétera; estas últimas constituyen el grupo importante de las bombas sanitarias). También se emplean las bombas para bombeo de líquidos espesos, con sólidos en suspensión como pasta de papel, melazas, fangos, desperdicios, etcétera.

Las bombas se clasifican según el Institute of Hydraulic en:

1. Bombas roto dinámica. Conocidas también como turbo máquinas ya que son siempre de movimiento rotativo y la dinámica de la corriente juega un papel esencial en la transmisión de energía. Su funcionamiento se basa en la ecuación de Euler; y su órgano transmisor de energía se llama impulsor.

2. Bombas de desplazamiento positivo. A este grupo pertenecen no sólo las bombas alternativas, sino las rotativas llamadas roto estáticas porque son rotativas, pero en ellas la dinámica de la corriente no juega un papel esencial en la transmisión de la energía. Su funcionamiento se basa en el principio de desplazamiento positivo.

##### 3.1.2 Clasificación.

Estas se pueden clasificar:

Según la dirección del flujo: en flujo radial, axial y radioaxial (mixto).

Según la posición del eje: en eje horizontal, vertical e inclinado.

Según la presión generada: de baja, mediana y alta presión.

Según el número de succiones en la bomba: de simple aspiración o de un flujo y de doble aspiración o de dos flujos.

Según el número de impulsores: de un escalonamiento o de varios escalonamientos (etapas).

Según el número específico de revoluciones: los impulsores se representan en una familia geoméricamente semejante, según la ecuación (3.1):

$$n_s = nP^{1/2}H^{-5/4}$$

3.1

$n_s$  = Número específico de revoluciones (no es adimensional).

$n$  = Es el número de revoluciones por minuto (rpm).

$P$  = Es la potencia en cv.

$H$  = Es la altura en m.

### 3.1.3 Elementos Constitutivos.

Entre los elementos principales que conforman una bomba, se enumeran los elementos siguientes:

1. Impulsor, que gira solidario con el eje de la máquina y consta de un cierto número de álabes que imparten energía al flujo en forma de energía cinética y energía de presión.

El impulsor reviste formas muy variadas y aún caprichosas, cuando la aplicación particular lo requiere. Los impulsores se clasifican en cuatro tipos según la forma de sujeción de los álabes.

Estos cuatro pueden ser del tipo:

Abierto de doble aspiración sin cara anterior ni posterior(A): Los álabes se fijan en el núcleo o cubo del impulsor.

Semlabierto de simple aspiración (B): Sin la cara anterior, los álabes se fijan sólo en la cara posterior.

Cerrado de simple aspiración (C).

Cerrado de doble aspiración (D).

Si la bomba tiene varios pasos, entonces el caudal recogido a la salida de un impulsor se dirige al siguiente y se conoce como impulsores en serie.

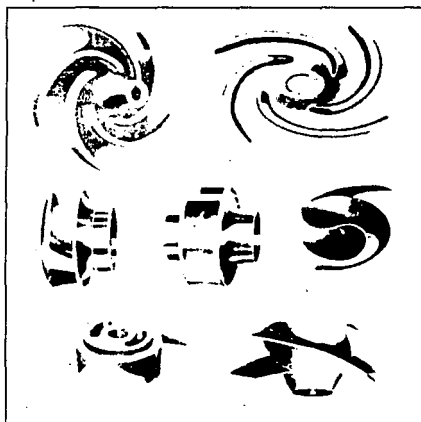


figura 3.1 Impulsores típicos

El impulsor de la bomba va cambiando insensiblemente de forma para adaptarse a las diferentes condiciones de servicio.

2. Corona directriz o corona de alabes fijos, que recoge líquido del impulsor y transforma la energía cinética comunicada por el impulsor en energía de presión, ya que la sección de paso aumenta en esta corona en la dirección del flujo. Esta corona directriz no existe en todas las bombas; porque encarece su construcción; aunque hace a la bomba más eficiente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

3. Caja espiral , que transforma también energía dinámica en energía de presión, y recoge además con pérdidas mínimas de energía el fluido que sale del impulsor, conduciéndolo hasta la tubería de salida o tubería de impulsión.

4. Tubo difusor troncocónico, que realiza una tercera etapa de difusión, o sea, de transformación de energía dinámica en energía de presión.

### 3.1.4 Pérdidas, Potencias y Rendimiento.

#### 3.1.4.1 Pérdidas.

Todas las pérdidas en la bomba (entre las secciones de entrada y salida) se pueden clasificar en tres grupos:

- Pérdidas hidráulicas.
- Pérdidas volumétricas.
- Pérdidas mecánicas.

#### 3.1.4.2 Pérdidas Hidráulicas.

Las pérdidas hidráulicas disminuyen la energía específica aprovechable que la bomba comunica al fluido y consiguientemente de la altura útil. Son de dos clases, pérdidas de superficie y pérdidas de forma: las pérdidas de superficie se producen por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba (impulsores, corona directriz...) o de las partículas del fluido entre sí; las pérdidas de forma se producen por el desprendimiento de la capa límite en los cambios de dirección y en toda forma difícil al flujo, en particular a la entrada de los impulsores si la tangente del álabe no coincide con la dirección de la velocidad relativa a la entrada o a la salida de los impulsores si la tangente del álabe de la corona directriz no coincide exactamente con la velocidad absoluta a la salida. Las pérdidas hidráulicas se originan, en:

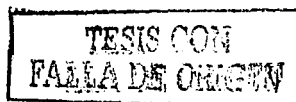
- ⇒ Entre el punto E y la entrada del impulsor.
- ⇒ En el impulsor.
- ⇒ En la corona directriz, si existe.
- ⇒ En la caja espiral.
- ⇒ Desde la salida de la caja hasta la salida de la bomba, o punto S.

#### 3.1.4.3 Pérdidas Volumétricas.

Estas pérdidas, que se denominan también pérdidas intersticiales, son pérdida de caudal y se divide en dos clases: pérdidas exteriores (qe) y pérdidas interiores (qi).

Las pérdidas volumétricas exteriores (qe): constituyen una salpicadura de fluido al exterior, que se escapa por juego entre la carcasa y el eje de la bomba, que la atraviesa. Para reducirlas se utiliza la caja de empaquetadura, que se llena de estopa o material de cierre, provista de su correspondiente tapa o prensaestopas con pernos, que permiten comprimiendo el prensaestopas contra el eje de la máquina mejorar el cierre. Esta presión, sin embargo, no puede ser excesiva para no aumentar las pérdidas mecánicas. Como material de cierre se utiliza mucho el amianto grafitado.

Las pérdidas volumétricas interiores, (qi): son las más importantes y reduce mucho el rendimiento volumétrico de algunas bombas; aunque (qe) se haya reducido prácticamente a CERO por un material de alta calidad. La explicación de esta pérdida es la siguiente: a la salida del impulsor de una bomba o de un ventilador hay más presión que a la entrada. Luego parte del fluido en vez de





seguir a la caja espiral retrocederá, por el conducto que forma el juego del impulsor con la carcasa, a la entrada del impulsor, para volver a ser impulsado por la bomba. Este caudal, llamado caudal de cortocircuito, absorbe energía del impulsor.

### 3.1.4.4 Pérdidas Mecánicas.

Este tipo de pérdidas son debidas al rozamiento de las partes mecánicas de la bomba como en el:

- Prensaestopas

- eje con los cojinetes.

- Rozamiento de disco. Se deben al rozamiento de la pared exterior del impulsor con la atmósfera del fluido que le rodea. Es decir, el impulsor de una bomba en esquema, es un disco o mejor una caja en cuyo interior circula el fluido; pero en el exterior, o sea en el juego entre el impulsor y la carcasa, inevitablemente penetra también el fluido: el disco no gira, pues, en el vacío, sino en una atmósfera viscosa donde se produzca un rozamiento que incluimos en las pérdidas mecánicas y se denominan pérdidas por rozamiento de disco.

### 3.1.5 Potencia y Rendimiento.

En las potencias se utiliza la nomenclatura siguiente:

$P_a$  es la potencia de accionamiento = potencia absorbida = potencia al freno = potencia del eje. Los cuatro nombres se utilizan en la práctica. Así, en un grupo de moto-bombas (motor eléctrico - bomba)  $P_a$  no es la potencia absorbida de la red, sino la potencia libre en el eje (potencia absorbida de la red multiplicada por el rendimiento de motor eléctrico).

$P_i$  es la potencia interna: potencia suministrada al impulsor, igual a la potencia de accionamiento menos las pérdidas mecánicas.

$P$  es la potencia útil: el incremento de potencia que experimenta el fluido en la bomba.

Aquí mismo se representan además los equivalentes en potencia de las pérdidas siguientes:

⇒  $P_h^f$  son las pérdidas hidráulicas;  $P_{h1}^f$  son las pérdidas por rozamiento de superficie;  $P_{h2}^f$  son las pérdidas por rozamiento de forma.

⇒  $P_v^f$  son las pérdidas volumétricas;  $P_{v1}^f$  son las pérdidas por caudal al exterior;  $P_{v2}^f$  son las pérdidas por cortocircuito.

⇒  $P_m^f$  son las pérdidas mecánicas;  $P_{m1}^f$  son las pérdidas por rozamiento en el prensaestopas;  $P_{m2}^f$  son las pérdidas por rozamiento en los cojinetes y accionamiento de auxiliares;  $P_{m3}^f$  son las pérdidas por rozamiento de disco.

#### 3.1.5.1 Potencia de Accionamiento, $P_a$ .

Es la potencia en el eje de la bomba o potencia mecánica que la bomba absorbe. Esta potencia según la mecánica tiene la siguiente expresión:

$$P_a = M\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot nM$$

O también

$$P_a = 0.1047 \text{ nM} \quad 3.3$$

Esta expresión es muy útil en los ensayos de bombas realizados en los bancos de prueba, donde se mide  $n$  con un cuentarrevoluciones y  $M$  con un torciómetro o midiendo el par de reacción con un motor de accionamiento básculante.

### 3.1.5.2 Potencia Interna, $P_i$ .

Es la potencia total transmitida al fluido, o sea la potencia de accionamiento, descontando las pérdidas mecánicas;

$$P_i = P_a - P_{mr} \quad 3.4$$

### 3.1.5.3 Potencia Útil, $P$ .

Es la potencia de accionamiento descontando todas las pérdidas de la bomba o equivalentemente la potencia interna descontando todas y sólo las pérdidas internas (hidráulicas y volumétricas). Luego:

$$\begin{aligned} P &= P_a - P_{mr} - P_{vr} - P_{hr} \\ &= P_i - P_{vr} - P_{hr} \end{aligned} \quad 3.5$$

La potencia útil por otra parte será la invertida en impulsar el caudal útil  $Q$  a la altura útil  $H$ . Luego

$$P = Q\rho Gh \quad 3.6$$

## 3.1.6 Rendimiento.

### 3.1.6.1 Rendimiento Hidráulico $\eta_h$ .

Tiene en cuenta sólo las pérdidas de altura total,  $H_{r-int}$  en la bomba. Como,  $H = H_u - H_{r-int}$ , el valor de  $\eta_h$  es:

$$\eta_h = \frac{H_i}{H_u} \quad 3.7$$

### 3.1.6.2 Rendimiento Volumétrico, $\eta_v$ .

Se tienen en cuenta todas y sólo las pérdidas volumétricas, y su valor es:

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + q_e + q_i} \quad 3.8$$

Donde:  $Q$  es el caudal útil o caudal efectivo impulsado por la bomba;  $(Q + q_e + q_i)$  es el caudal teórico o caudal bombeado por el impulsor.

### 3.1.6.3 Rendimiento Interno, $\eta_i$ .

Tiene en cuenta todas y sólo las pérdidas internas, o sea las hidráulicas y volumétricas y engloba ambos rendimientos hidráulico y volumétrico.

$$\eta_i = \eta_h \cdot \eta_v$$

3.9

### 3.1.6.4 Rendimiento Mecánico, $\eta_m$ .

Se tienen en cuenta todas y sólo las pérdidas mecánicas, y su valor es:

$$\eta_m = \frac{P_i}{P_a}$$

3.10

### 3.1.6.5 Rendimiento Total $\eta_{tot}$ .

Tiene en cuenta todas las pérdidas en la bomba y su valor es:

$$\eta_{tot} = \eta_i \cdot \eta_m = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m$$

3.11

## 3.1.7 Terminología.

### 3.1.7.1 Columna o Carga Total de Bombeo.

En un sistema de bombeo, se le da el nombre de columna o carga total, a la suma de las energías contra las que debe operar una bomba para mover determinada cantidad de líquido de un punto a otro. De acuerdo con lo anterior, la carga total (H) para una bomba centrífuga horizontal, es igual a la diferencia entre la carga de descarga (HD) y la carga de succión (HS) es decir:

En la figura 3.2 se presentan dos casos típicos de instalación de bombas centrífugas horizontales; difieren entre sí, por lo consiguiente: en el caso A) la bomba se localiza en un nivel superior al de la superficie libre del agua en la succión, actuando únicamente la presión atmosférica, tanto en la succión como en la descarga.

En el caso B) la bomba se encuentra a un nivel inferior al del agua en la succión, y además se supone que, en la succión o en la descarga o bien en ambos, actúa una presión  $P_s$  y  $P_d$  respectivamente, que es diferente a la atmosférica.

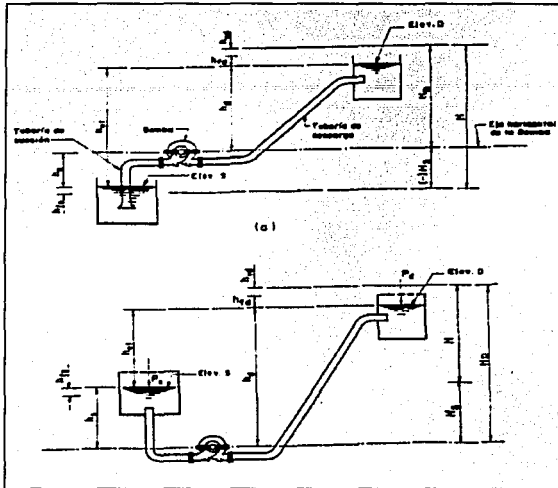


figura 3.2 Instalaciones típicas de bombas centrífugas horizontales.

Para determinar el valor de la columna en el caso A), tenemos que la carga de succión es una carga negativa, por lo que, la columna valdrá numéricamente, la suma de HD y HS, es decir:

$$HS = -hs - hfs \quad (a)$$

$$-HS = hs + hfs$$

$$HD = hd + hfd + hvd \quad (b)$$

Sustituyendo (a) y (b) en (1), tenemos que el valor de la carga total es:

$$H = hd + hfd + hvd + hs + hfs$$

O también

$$H = het + hfd + hvd + hfs$$

donde:

$$het = hd + hs = \text{Elev. D} - \text{Elev. S}$$

Para el caso b), se tiene que el valor de la columna es:

$$HS = hs - hfs \quad (a')$$

$$HD = hd + hfd + hvd \quad (b')$$

Sustituyendo (a') y (b') en (1), tenemos que el valor total de la carga es:

$$H = hd + hfd + hvd - hs + hfs$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

O también

$$H = h_{et} + h_{fd} + h_{vd} + h_{fs}$$

Donde:

$$h_{et} = h_d - h_s = \text{Elev. D} - \text{Elev. S}$$

Si se considera que se tienen las presiones ( $P_s$ ) y ( $P_d$ ) difieren a la atmosférica, el valor de la carga será:

$$H_S = h_s - h_{fs} + P_s$$

$$H_D = h_d + h_{fd} + h_{vd} + P_d$$

$$H = h_d + h_{fd} + h_{vd} + P_d - h_s + h_{fs} - P_s$$

$$H = h_d + h_{fd} + h_{vd} - h_s + h_{fs} + P_d - P_s$$

Considerando que,  $h_d - h_s = h_{et}$ , se tiene que:

$$H = h_{et} + h_{fd} + h_{vd} + h_{fs} + (P_d - P_s)$$

En todas las expresiones anteriores, los términos representan lo siguiente:

**H (Carga total).**- Es la suma de las energías que se tienen en el sistema cuando se trabaja la bomba a determinada capacidad. Se expresa en metros de columna de agua absolutos o manométricos.

**HS (Elevación de succión o carga de succión).**- Se le da el primer nombre cuando la bomba se localiza arriba del nivel del agua en la succión (caso A), y el segundo, cuando la elevación de ese nivel es superior al sitio de la bomba (caso B). Su valor es igual a la carga estática de succión, menos todas las pérdidas de energía que se tengan en la succión más alguna otra presión (diferente a la atmosférica) que se tenga en ese sitio, convertida naturalmente en metros de columna de agua.

**hs (Elevación estática de succión o carga estática de succión).**- Recibe uno u otro nombre según que la bomba se encuentre arriba o abajo del nivel de la superficie libre del agua en la succión. Su valor es igual a la diferencia de elevaciones entre el eje horizontal de la bomba y la superficie del líquido en el suministro. En el caso A, por ejemplo, se tiene un valor negativo pero se suma algebraicamente en el cálculo de la columna.

**hfs (Carga de fricción en la succión).**- Es la carga equivalente en metros, que se necesita para vencer todas las pérdidas de energía debidas al flujo en la tubería de succión.

Las pérdidas son principalmente:

**Pérdidas por entrada.**- Su magnitud dependerá del diseño del extremo de la tubería en la entrada del líquido.

**Pérdidas por accesorios.**- Es debida a codos, válvulas, etc. que se tengan en la succión. Se acostumbra incluir estas pérdidas en el cálculo de la fricción, para lo que se expresa en longitud equivalente a la tubería que se use.

**HD (Carga de descarga).**- Es la suma de las cargas estática ( $h_d$ ), de fricción ( $h_{fd}$ ) y de velocidad ( $h_{vd}$ ) en la línea de descarga. Ocasionalmente se considera la presión  $P_d$  diferente a la atmosférica que se pudiera tener en el sitio de descarga. Normalmente, tanto la carga (HD) como la de succión (HS) se expresan con relación al eje horizontal de la bomba, sin embargo, puede tomarse como referencia otra elevación haciendo la aclaración correspondiente.

En la figura 3.3 se tienen 3 casos más de descarga. En el sistema (a), la carga estática (hd) de descarga, es mayor que como se define generalmente, en el sistema (b), se muestra un caso típico de descarga con sifón y en el sistema (c), la carga se suma con signo negativo ya que actúa a favor del escurrimiento.

La descarga con sifón se usa con el objeto de reducir la columna o carga total de la bomba durante la operación, aprovechando la forma de trabajo de este dispositivo, se consigue por lo tanto, reducir la potencia y probablemente un equipo de menor capacidad.

hd (Carga estática de descarga).- Es la diferencia de elevación entre la superficie libre del agua en la descarga y el eje horizontal de la bomba.

Esta medida vertical se define así, porque generalmente la terminal de la tubería de descarga se ahoga con el objeto de disipar la energía de velocidad o evitar la entrada de aire en ella, pero como en el caso de la figura 3.3 (a), la carga real es la distancia hd o sea se debe considerar la elevación del eje horizontal de la tubería antes del codo.

het (Carga estática total).- En general, es la diferencia de la elevación de descarga y la elevación de la superficie libre del líquido en la succión.

En el caso de la figura 3.2 A), será igual a la suma aritmética de la elevación de succión (hs) y la carga estática de descarga (hd). Cuando el nivel de succión es superior al del eje horizontal de la bomba, caso 3.2 B), su valor estará dado por la diferencia entre la carga estática de descarga y la carga estática de succión.

hfd (Carga de fricción en la descarga).- Esta incluye todas las pérdidas de energía que se tienen a partir de la boquilla de la bomba y en la tubería de descarga. Estas pérdidas son debidas a la fricción a lo largo de dicha tubería, a cambios de dirección y a todos los accesorios que se tengan en la misma.

hvd (Carga de velocidad en la descarga).- Se puede definir como la altura a la cual una cantidad de líquido debe caer para adquirir una cierta velocidad. Su valor se calcula con la siguiente expresión:

$$hvd = \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

hvd = Carga de velocidad en m.

v = Velocidad del agua en la tubería de descarga en m/seg.

g = Aceleración de la gravedad, 9.81 m/seg<sup>2</sup>.

Esta carga equivale a la energía cinética que se tiene en un sistema de bombeo. Por lo tanto, para conocer el valor de la columna total (suma de energías cinética y potencial) a la lectura manométrica en un aparato instalado en cualquier punto de una tubería en funcionamiento, deberá sumársele la carga de velocidad ya que un manómetro sólo registra lo relativo a la energía potencial. En general, el valor de la carga de velocidad en la descarga, es relativamente pequeño y considerarlo en la determinación de la columna total no afecta sensiblemente el valor final, en la practica se ha observado que en instalaciones con columnas grandes, su valor no es necesario tomarlo en cuenta, pero cuando se tienen columnas relativamente pequeñas siempre se debe tomar en cuenta.

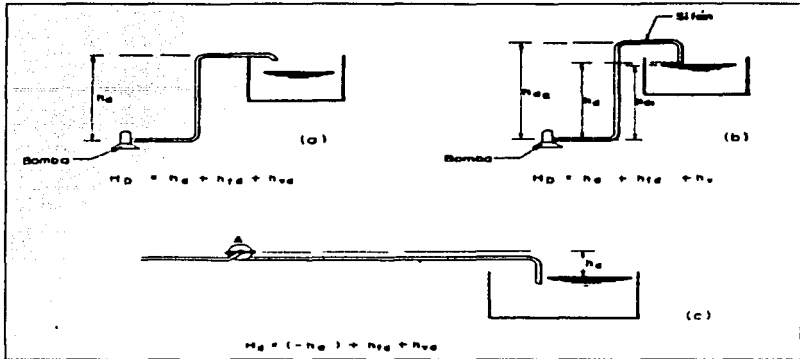


figura 3.3 Descargas típicas.

### 3.1.7.2 Carga Neta de Succión Positiva (CNSP o NPSH).

Esta carga se define como la expresión disponible o requerida para establecer un flujo a través del elemento de succión al ojo del impulsor o carcasa de una bomba, cuyo valor no deberá reducirse al correspondiente a la presión de vapor del líquido manejado. Se expresa en metros de columna del líquido bombeado equivalente a una expresión en  $\text{kg/cm}^2$ .

En la práctica se ha observado que una determinación incorrecta de la CNSP puede ocasionar fundamentalmente problemas de cavitación, disminución de la eficiencia del equipo y por los mismos problemas de operación de un sistema de bombeo.

Los fabricantes de bombas usualmente emplean las siglas del nombre en inglés de este concepto, ósea NPSH (Net Positive Succión Head), por lo que es conveniente tener presente también estas siglas para evitar confusiones.

Dentro de este concepto hay dos términos que son de suma importancia para su cálculo correcto, estos son, la CNSP requerida y la CNSP disponible. La CNSP requerida es la diferencia mínima de presión entre la carga de succión y la presión de vapor del líquido manejado, que necesita una bomba para operar a determinada capacidad. En el caso del presente trabajo, la presión del vapor corresponderá al combustible.

El valor de la CNSP disponible depende del diseño de cada bomba, siendo diferente para cada tipo y modelo, pero principalmente, es función de la capacidad de trabajo y de las velocidades del combustible en la succión y en los impulsores, por lo tanto los siguientes factores influyen para valuar su magnitud: forma y área de los conductos de succión, diámetro del ojo del impulsor, forma y número de álabes, espacio entre ellos, velocidad específica de la bomba y otras características propias de fabricación, como la flecha y cubo del impulsor.

El valor de la CNSP es un dato que proporciona al fabricante, pues es una característica propia de cada modelo de bomba, se puede encontrar en catálogos editados por los distribuidores de bombas. Esta carga generalmente la refieren al eje horizontal de la bomba o del impulsor.

La CNSP disponible es la diferencia entre la presión absoluta que se tiene en una instalación y la presión de vapor del líquido. De acuerdo con la definición anterior, la CNSP disponible dependerá fundamentalmente del lugar en el que se lleve a cabo el bombeo y de la presión de vapor del

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

líquido a la temperatura dominante en ese lugar, así como de las condiciones físicas de la instalación; considerando lo último, es posible, si se desea alterar su valor (lo cual no se puede hacer con la CNSP requerida) dadas unas características, variando algún elemento de esas condiciones.

Para cualquier condición de trabajo, la CNSP disponible, en cualquier instalación, deberá ser como mínimo igual al valor de la CNSP requerida por la bomba de que se trate; pero se recomienda que ese valor mínimo sea un poco mayor, por lo que se puede expresar de la siguiente manera:

CNSP disponible > CNSP requerida

(CNSP) d > (CNSP) r

### 3.1.7.3 CNSP Disponible en Casos Típicos.

A continuación se dan las expresiones matemáticas para el cálculo de la CNSP disponible, de acuerdo con los esquemas de bombeo indicados en la figura 3.4. En todas las expresiones los términos se expresan en metros y significan lo siguiente:

(CNSP) d = Carga neta de succión positiva disponible.

Pab = Presión absoluta.

Pv = Presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo.

Hab = Carga equivalente a la presión absoluta.

Hb = Carga correspondiente a la presión atmosférica.

HS = Carga de succión.

hs = Carga estática de succión.

hfs = Carga de fricción en la succión.

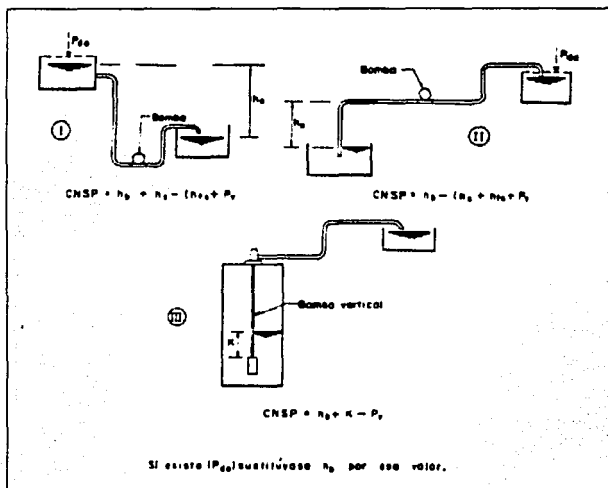


figura 3.4 CNSP disponible en casos típicos.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



### 3.1.8 Uso De Curvas.

Para seleccionar una curva apropiadamente para una aplicación dada, debe usarse por lo menos un punto de la curva del sistema de columna. Para algunas aplicaciones, pueden ser dos o más puntos para obtener la disposición más económica.

En la práctica, cada aplicación debe comprobarse para determinar la magnitud de las diversas pérdidas hidráulicas. Una vez que se conoce la magnitud, puede tomarse una decisión en cuanto a que pérdidas pueden despreciarse en los cálculos de la columna del sistema.

### 3.1.9 Curva Característica de la Bomba.

Una bomba centrífuga que se opera a velocidad constante puede suministrar cualquier capacidad de cero a un máximo, dependiendo de la columna, diseño y succión. Las curvas características (figura 3.5) muestran la relación existente entre columna de bomba, capacidad, potencia y eficiencia para un diámetro de impulsor específico y para un tamaño determinado de carcasa. Es habitual dibujar la columna, potencia y eficiencia en función de la capacidad a velocidad constante, como en la figura 3.5. Pero en casos especiales es posible señalar en las gráficas tres variables cualesquiera contra una cuarta.

La curva de capacidad de columna, conocida como HQ (figura 3.5), muestra la relación entre la capacidad de columna total, y puede ser creciente, decreciente, con gran inclinación o casi horizontal, dependiendo del tipo de impulsor usado y de su diseño. En A en la figura 3.5 la columna desarrollada por la bomba es de 43.80 m de líquido, capacidad de 67 lps a 36.50 m de columna B la capacidad de la bomba sube a 93.80 lps.

Aun cuando las bombas centrífugas pueden seleccionarse y generalmente se seleccionan en tablas de clasificación (Tabla 3-1, formada por la elección de ciertos puntos de las curvas características), las curvas de comportamiento dan una imagen mucho más clara de las características de la unidad a una velocidad dada. Las curvas de eficiencia generalmente se eliminan de una gráfica de características compuestas (figura 3.7) debido a que es difícil el trazarias. Sin embargo, para objetivos de selección fácil, tales gráficas proporcionan los datos normalmente requeridos: capacidad, columna, tamaño de la bomba y HP del motor. Una vez que se ha elegido el tamaño de la bomba, puede usarse como referencia una curva como la mostrada en la figura 3.6 para el diámetro del impulsor, eficiencia y otros detalles.

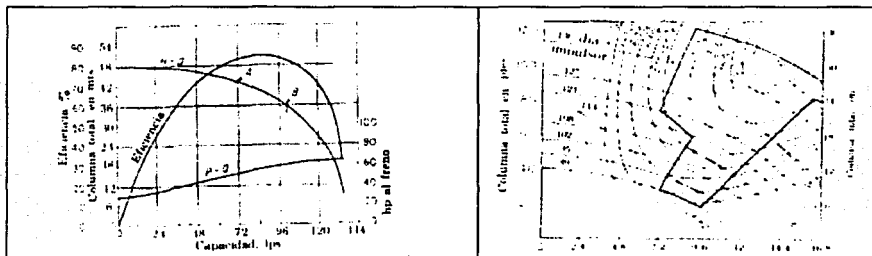


figura 3.5 Curvas características típicas para una bomba centrífuga.

figura 3.6 Características de una bomba para diferentes diámetros del impulsor dentro de la misma cubierta

TOUR CON  
FALLA DE ORIGEN

**Tabla 3-1 Tabla Típica de Características de Bombas Centrifugas\***

Tamaño (lps)	Columna total, en metros				
	3	4.5	6	7.5	9
<b>2C:</b>					
6.3	.....	.....	1000-0.8	1060-1.0	1150-1.2
9.4	.....	.....	1070-1.2	1150-1.5	1240-1.7
12.6	.....	.....	.....	1290-2.1	1360-2.4
<b>3CS:</b>					
9.4	750-0.53	850-0.78	950-1	130-1.2	110-1.5
12.6	.....	950-1.1	1010-1.4	1100-1.7	1170-2
15.8	.....	.....	1170-1.9	1190-2.3	1260-2.6
18.9	.....	.....	.....	.....	1400-3.5
<b>3CL:</b>					
12.6	690-0.63	800-0.95	910-1.3	1010-1.6	1110-2.05
18.9	870-1.2	950-1.6	100-1.9	110-2.4	1170-2.8
25.2	.....	.....	1200-3.1	1230-3.7	1290-4.1
31.5	.....	.....	.....	.....	1490-5.8
<b>4C:</b>					
25.2	750-1.3	850-1.8	940-2.4	1040-3	1120-3.7
37.8	.....	.....	1080-4	1170-4.6	1210-5.5
50.5	.....	.....	.....	.....	140-8.4
<b>11/4D:</b>					
1.6	.....	617-0.21	707-0.03	778-0.40	845-0.51
3.15	.....	680-0.37	760-0.49	865-0.63	900-0.76
4.73	.....	.....	856-0.78	916-0.94	980-1.1
6.3	.....	.....	.....	.....	.....
7.9	.....	.....	.....	.....	.....
9.4	.....	.....	.....	.....	.....
<b>2DL:</b>					
9.4	.....	820-0.93	850-1.1	930-1.35	990-1.6
12.6	.....	.....	970-1.8	1040-2.1	1080-2.3
15.8	.....	.....	.....	.....	.....
18.9	.....	.....	.....	.....	.....

Ejemplo: 1080-4 indica que la velocidad de la bomba es 1080 rpm potencia requerida para operar la bomba es de 4 hp.

\*Condensado de datos de Goulds Pumps, Inc.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

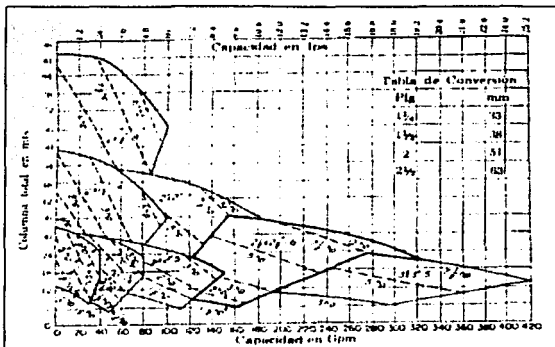


figura 3.7 Gráfica de características compuestas para una bomba centrífuga típica.

Las gráficas de las condiciones en un sistema de bombeo existente o propuesto, pueden ser auxiliares importantes en el análisis del sistema.

### 3.1.10 Curvas del Sistema.

La curva del sistema (figura 3.11) se obtiene combinando la columna de fricción del sistema con la columna estática del mismo y las diferencias de presiones que puedan existir en él.

Una curva de columna de fricción, es una curva de la relación entre el flujo, del tamaño y la fricción en los tubos, longitud, número y tipo de los accesorios, velocidad del flujo del líquido y naturaleza de éste. La figura 3.8a muestra los elementos que intervienen en un sistema de bombeo típico, para un sistema dado. Puesto que la columna de fricción varía aproximadamente en forma proporcional al cuadrado del flujo, la curva es generalmente parabólica. La columna estática es la diferencia en elevación entre los niveles líquidos de la succión y la descarga.

Una gráfica de columna – capacidad (figura 3.9) lleva el nombre de curva de fricción del sistema.

Tal curva pasa para siempre por el origen de la gráfica debido a que, cuando no hay columna desarrollada por la bomba, no hay flujo en el sistema de tubería.

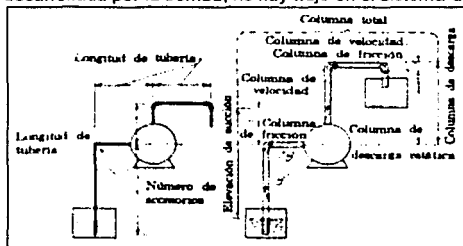


figura 3.8 Factores que intervienen en la columna total de una bomba.

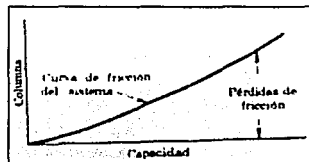


figura 3.9 Curva de fricción del sistema típico.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Cuando una bomba sufre desgaste se tendrá con toda seguridad una pérdida tanto en capacidad como en eficiencia. La cantidad de pérdida para un desgaste determinado, sin embargo, depende mucho de la forma de la curva de columna del sistema. Para una bomba centrífuga, la pérdida de capacidad es mayor para un desgaste determinado si la curva de columna del sistema es aplanada, comparada con una curva muy inclinada.

### 3.1.11 Operación en Paralelo o en Serie.

Cualquier tipo de conexión o cualquier clase de bomba puede presentar problemas. Frecuentemente, cuando la demanda es excesivamente variable, pueden operarse dos o más bombas en serie o en paralelo para satisfacer la demanda alta, usando una bomba para las demandas bajas. Para especificar correctamente las bombas y juzgar su comportamiento bajo varias condiciones, debe usarse la curva de columna del sistema en unión de las curvas de comportamiento de las bombas compuestas.

Para bombas en serie el comportamiento se obtiene agregando las columnas a la misma capacidad. Cuando las bombas operan en paralelo el comportamiento se obtiene agregando las capacidades para la misma columna. El superponer la curva de la columna del sistema sobre la de comportamiento de la bomba indica claramente los gastos que pueden esperarse y las columnas a que operará cada bomba.

Cuando los requerimientos de bombeo son variables es mejor instalar varias bombas pequeñas en paralelo, en vez de usar una sola más grande. Cuando cae la demanda, una o más bombas pequeñas pueden ser cerradas, de esta forma permite que el resto opere cerca del pico de eficiencia. De forma similar las bombas múltiples en serie pueden ser usadas cuando el líquido deba ser liberado a altas cabezas.

Las unidades para operar satisfactoriamente en paralelo, deben estar trabajando sobre la porción de la curva característica la cual arroja un incremento de capacidad en orden para asegurar una distribución del flujo equilibrado.

Considere la acción de dos bombas operando en paralelo. La curva del sistema carga-capacidad A-B, inicia con una H estática cuando el flujo es cero y se eleva parabólicamente con el incremento del flujo. La curva C-D representa la curva característica de la bomba A operando sola; la curva similar de la bomba B es representada por E-F. La bomba B no comenzará a entregar hasta que la presión de descarga de la bomba A caiga por debajo del cierre total de la cabeza de B (punto E). La entrega combinada para una carga dada es igual a la suma de las capacidades individuales de las dos bombas a esa carga. Para una combinada entrega de carga, la capacidad es dividida entre las bombas. La curva característica combinada es la sumatoria (QA +QB).

Si dos bombas están en serie, la carga combinada para cualquier flujo es igual a la suma de sus cargas individuales.

### 3.1.12 Punto de Operación.

Superponiendo la curva HQ de la bomba sobre la curva de columna del sistema, se obtiene el punto para el cual una bomba particular opera en el sistema para el cual se ha trazado la curva.

Así, en la figura. 3.10, el punto A muestra una condición columna - capacidad para la bomba cuya curva HQ se ha trazado.

El cambio de la resistencia para un sistema dado de tubería por medio de cierre parcial de una válvula o cualquier otra alteración, cambia la inclinación de la curva de columna del sistema. Así, en la figura 3.10, el cierre parcial de una válvula en la línea de descarga, produce la curva artificial

TRABAJANDO  
FALLA DE ORIGEN

de columna del sistema que se muestra, cambiando el punto de operación a una columna más elevada pero con menor capacidad. La abertura de la válvula tiene el efecto opuesto.

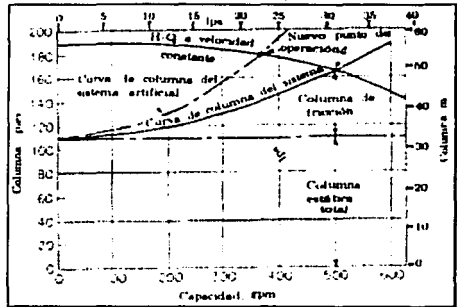


figura 3.10. Curva de columna del sistema superpuesta sobre la curva de capacidad de columna de la bomba.

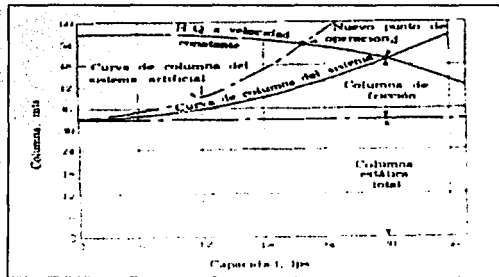


figura 3.11. La curva de la columna del sistema es muy útil para estudiar una red determinada.

### 3.1.13 Punto de Corte.

Una característica de las bombas centrífugas de baja velocidad específica es una curva relativamente plana HQ en capacidad cercana al corte. Ocasionalmente es necesario elegir una bomba de este tipo debido a que la aplicación puede necesitar una bomba de alta columna y bajo gasto. (Ordinariamente, las bombas son capaces físicamente de operar continuamente cerca de su punto de corte). En este caso, la curva del sistema debe ciertamente examinarse antes de que la bomba sea especificada debido a que es posible que una bomba rotatoria o reciprocante pueda ser la mejor elección desde el punto de vista de confianza de operación.

La figura 3.12 muestra que una curva de columna del sistema, aplanada y baja en combinación con una curva de bomba aplanada, puede producir dificultades de operación si la bomba se encuentra ligeramente fuera de su columna - capacidad o si la curva de columna del sistema se calcula ligeramente abajo.

Con una curva de columna de sistema inclinada, no es de esperarse que se presenten dificultades de operación.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

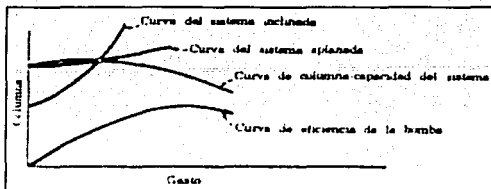


figura 3.12. Bomba de baja velocidad específica cerca del corte.

### 3.1.14 Cambios de Columna.

La demanda de un sistema puede variar como resultado de cambios en los niveles de succión o de descarga o de un incremento de fricción en la tubería por aumento de la rugosidad de los tubos.

### 3.1.15 Especificaciones de la Columna de la Bomba.

Aun cuando la columna total de una bomba puede calcularse con gran exactitud, es necesario ejecutar las especificaciones cuidadosamente conforme a las condiciones exactas que existen en la instalación para evitar errores costosos en la selección de la bomba. Quizás la causa más común de tales errores es la acumulación de factores de seguridad que se aplican antes de llegar al punto de operación final de la bomba. Factores de seguridad en exceso o demasiado liberales pueden producir una bomba de capacidad mayor que la realmente necesaria, lo cual conduce a un exceso con el consumo de potencia y posiblemente mayor costo de mantenimiento.

## 3.2 Tuberías.

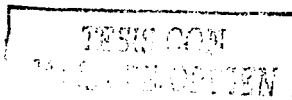
El combustible se transporta desde las refineras a la comunidad en conductos cerrados, suministrándose la energía necesaria por gravedad o a bombeo.

Las obras destinadas al transporte de combustible reciben el nombre de "Líneas de conducción".

Las tuberías se instalan sobre la superficie, enterradas o combinando estas dos maneras. Esto dependerá de la topografía, clase de tubería y geología del terreno, por ejemplo, en un terreno rocoso es probable que convenga llevarla superficialmente. En el tipo de instalación que se adopte, también se deben considerar otros factores relacionados con la protección de la línea y así, una tubería que está propensa al deterioro o mal trato de personas y animales es preferible enterrarla, especialmente cuando es de asbesto - cemento. Cualquiera que sea la forma de instalación, se deberán evitar en lo posible los quiebres, tanto horizontales como verticales, con el objeto de eliminar codos y otras piezas especiales necesarias para dar los cambios de dirección. Estos quiebres aumentan las pérdidas de carga, el costo de la instalación y en ocasiones puede propiciar el confinamiento del aire mezclado con el combustible.

Se acostumbra clasificar a las tuberías por la forma de instalarlas en visibles y enterradas; dependiendo de si llevan juntas de dilatación o no, se clasifican en abiertas y cerradas. En general, cuando se utilizan tuberías de acero se prefieren las ocultas y cerradas.

No es por demás recordar que para la instalación de tuberías se consulten los catálogos e instructivos formados por los fabricantes, con el fin de eliminar la posibilidad de alguna falla durante la operación del sistema, causada por una instalación inadecuada. Es conveniente hacer un plano de la instalación de la línea de conducción, que indique claramente la ubicación de las válvulas de protección (Check, Alivio, Eliminadoras de aire, etc.) y control, así como codos, atraques o machones, silletas y juntas de dilatación.



Es importante tener ciertos conocimientos sobre los materiales de uso frecuente en las líneas de conducción, pero incluso también de los más antiguos, porque algunos de los que se usan poco en la actualidad aún se encuentran en servicio.

De los pozos, refinerías y plantas de tratamiento se obtienen diversos productos que se transportan por ductos o tuberías a las terminales de almacenamiento y distribución, o de una planta a otra.

### **3.2.1 Tuberías Usadas en Sistemas de Abastecimiento de Combustibles.**

Una tubería se define como el conjunto formado por el tubo y su sistema de unión, y pueden ser tanto subterráneas como superficiales.

Normalmente los tendidos son subterráneos, señalándose la línea de tendido con unos letreros amarillos que indican la zona de precaución, en la cual no debe haber excavación ni ningún tipo de instalaciones.

Son las arterias ocultas en la tierra por donde circulan los millones de litros de hidrocarburos en todas sus modalidades: crudos, gases, refinados y petroquímicos, unos para su transformación, otros listos para su consumo.

Para la fabricación de los tubos, se han utilizado diversos materiales, entre los cuales podemos mencionar la arcilla vitrificada, madera, plomo, cobre, fierro fundido, acero y concreto.

A través del tiempo algunos de estos materiales han sido abandonados y en la actualidad los tubos más utilizados para la industria petrolera son los fabricados a base de acero.

Para este caso se recomienda la tubería de acero, debido al líquido que se va a conducir, ya que son líquidos volátiles, y el tubo de acero es el que da una mayor seguridad para su manejo y una mejor eficiencia en su uso.

El objetivo es transportar por ductos, Hidrocarburos producidos por Pemex Exploración y Producción, hacia las plantas de proceso. Así como los productos de Pemex Refinación a los centros de consumo del país, para su comercialización, y con esto también dar una mayor eficiencia y seguridad en el transporte y manejo de combustibles y por consiguiente una reducción de costos para Pemex.

### **3.2.2 Tubería de Acero.**

En 1943, la Compañía Tubacero de Monterrey, N.L., inicio la fabricación de tubos de acero formados por medio de rolandoras y soldadura manual. Posteriormente fue sustituido este método utilizando prensa hidráulica y soldadura por arco sumergido. Actualmente se utilizan en México dos métodos de fabricación: el proceso de soldadura (tubacero, S.A.) y el proceso sin costura (TAMSA). La materia prima es el acero en placa o rollo, para el primero y lingotes y placas para el segundo.

Los tubos de acero se fabrican con diámetros desde 4.5 pulgadas (114.3 mm) hasta 48 pulgadas (1219 mm). Su producción está sujeta a un estricto control de calidad que toma en cuenta las normas DGN - B - 179 - 1978, e internacionales como las del American Petroleum Institute (API), máxima autoridad en el ramo.

Las tuberías de acero son recomendables para líneas de conducción cuando se tienen altas presiones de trabajo. Su utilización obliga a revestirlas contra la corrosión interior y exteriormente.

Son muy durables, resistentes, flexibles y adaptables a las distintas condiciones de instalación que se tenga.

Para asegurar su resistencia a los diversos agentes que pueden causar su deterioro, los ductos se revisten con alquitrán de hulla, fibra de vidrio y felpa de asbesto. Con ello se evita la corrosión.

En conducciones y redes de distribución de pequeñas localidades, principalmente rurales, se han utilizado en algunos casos tuberías de acero galvanizado. Estos conductos se fabrican en diámetros de 10, 13, 19, 25, 32, 38, 50, 64, 76 y 102 mm con longitud del tubo de 6.40 m.

### **3.2.3 Observaciones y Recomendaciones para la Selección de Tubería.**

1. - Para la conducción y distribución de gastos pequeños y cuando el diámetro sea igual o menor de 150 mm, son recomendables las tuberías de policloruro de vinilo (PVC).
2. - Cuando se requieren diámetros superiores a 150 mm, para presiones menores de 14 kg/cm<sup>2</sup>, son recomendables las tuberías de asbesto – cemento.
3. - Cuando en líneas de conducción se requieren diámetros superiores a 600 mm y presiones mayores de 10 kg/cm<sup>2</sup>, el proyectista debe elegir entre tuberías de asbesto – cemento, concreto presforzado y acero.
4. - Para conducciones con presiones de trabajo superiores a 14 kg/cm<sup>2</sup> se hará el estudio económico entre tuberías de acero y concreto presforzado.
5. - Para tomas domiciliarias se recomiendan tuberías de polietileno de alta densidad y, para el cuadro, tubo de acero galvanizado en diámetros de 13 y 19 mm.

Los factores principales que los proyectistas deben tener en cuenta para la selección de tuberías (en el caso de transportación de combustibles), son:

- a) Calidad y cantidad de combustible por conducir.
- b) Características topográficas de la conducción y calidad del terreno.
- c) Costos de suministro e instalación.

### **3.2.4 Piezas Especiales y Dispositivos de Control de Flujo.**

Las tuberías de conducción están compuestas: (1) por tramos rectos y curvos para ajustarse a los accidentes topográficos, (2) por cambios que se presentan en la geometría de la sección, y (3) por distintos dispositivos para el control del flujo en la tubería o para asegurar que el funcionamiento de la línea de conducción sea eficiente.

#### **a) Piezas Especiales.**

Las conexiones de la tubería en las intersecciones, cambios de dirección, variación de diámetros, accesos, válvulas, etc., se denominan comúnmente como "piezas especiales" y se fabrican del mismo material de la tubería (acero). Las piezas especiales de acero son las más empleadas en estas tuberías. Estas piezas se conectan entre sí o a las válvulas por medio de bridas y tornillos y con un empaque de sellamiento intermedio, que puede ser de plomo, hule o plástico.



## b) Dispositivos de Control y Protección en la Línea de Conducción.

En las líneas de conducción siempre es necesario el empleo de ciertos elementos cuyo objeto es, proteger a las tuberías y, si lo hay, al equipo de bombeo en general, principalmente del fenómeno llamado golpe de ariete; otros elementos controlan la descarga de la línea de conducción.

A continuación se comentara la función de los elementos de control y protección que se usan con más frecuencia, para lo cual se considera como vía de ejemplo la figura 3.13 que muestra una instalación de 3 bombas conectadas para operar en paralelo, a una línea de conducción.

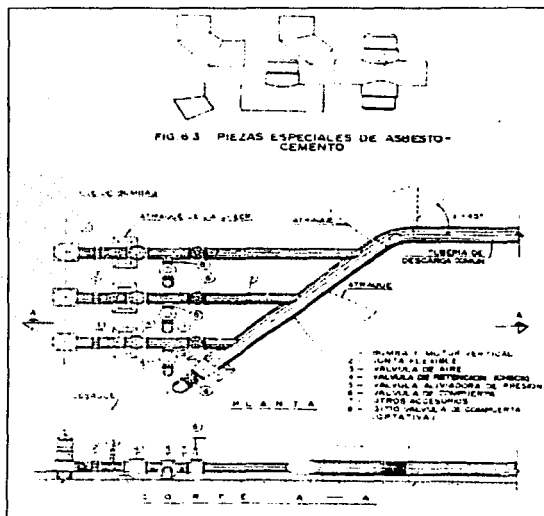


figura 3.13 Conexión de tres bombas para trabajar en paralelo, mostrando los elementos, de control y protección.

### 3.2.5 Tipo de Válvula.

El tipo de válvula dependerá de la función que debe efectuar, ya sea de cierre (bloqueo), estrangulación o desvío, es para impedir el flujo inverso o quizá una combinación de todo esto.

Estas funciones se deben determinar después de un estudio cuidadoso de las necesidades de la unidad y del sistema para los cuales se destina la válvula.

Y dado que existen diversos tipos de válvulas disponibles para cada función, también es necesario determinar las condiciones del servicio en que se emplearán las válvulas. Por lo que es de importancia primordial conocer las características químicas y físicas de los fluidos que se manejan. Las funciones de las válvulas, más que cualquier otra cosa son las que limitan la elección. En resumen, se debe prestar atención a que estas se clasifican en cuatro categorías (en las cuales se describen parte de sus características principales y los usos más comunes de estas) y al tipo de servicio:

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

**1. Servicio de corte y paso:**

- Válvulas de compuerta: Resistencia mínima al fluido de la tubería. Se utiliza totalmente abierta o cerrada. Accionamiento poco frecuente.
- Válvulas de macho: Cierre hermético. Deben estar abiertas o cerradas del todo.
- Válvulas de bola: No hay obstrucción al flujo. Se utilizan para líquidos viscosos y pastas aguadas. Cierre positivo. Se utiliza totalmente abierta o cerrada.

**2. Servicio de estrangulación:**

- Válvulas de Globo.
- Válvulas de mariposa: Su uso principal es para cierre y estrangulación de grandes volúmenes de gases y líquidos a baja presión. Su diseño de disco abierto, rectilíneo, evita cualquier acumulación de sólidos; la caída de presión es muy pequeña.
- Válvulas de diafragma.
- Válvulas de compresión.

**3. Prevención de flujo inverso.**

- Válvulas de retención (check).

**4. Diversos:****Tipo de servicio**

- Líquidos.
- Gases.
- Líquidos con gases.
- Líquidos con sólidos.
- Gases con sólidos
- Vapores generados instantáneamente por la reducción en la presión del sistema.
- Con corrosión o sin corrosión.
- Con erosión o sin erosión.

Una vez determinada la función y el tipo de servicio, se puede seleccionar el tipo de válvula según su uso y construcción con el uso de la lista para clasificación de válvulas antes descritas.

En esa lista, las funciones generales de la válvula son sólo guías del uso más adecuado o más común de determinado tipo de construcción. A menudo hay más de un tipo de construcción apto para una función específica.

En la industria petrolera se emplean válvulas para combustibles, desde Gasolina hasta Diesel.

En general, las características más importantes a considerar son: viscosidad, corrosividad y abrasividad; sin embargo, también se deben tener en cuenta los parámetros del proceso, es decir, cualesquiera condiciones anormales, predecibles, a corto plazo. Hay que reconocer otras circunstancias especiales, como el manejo de más de un fluido con la misma válvula o las posibles altas presiones que puedan ocurrir por un fluido atrapado en el cuerpo de la válvula al cerrarla y que se vaporiza al ser calentado.

La caída de presión en las válvulas puede explicar una parte considerable de las pérdidas totales por fricción en un sistema. La mejor selección de válvulas es la que producirá mínima caída de presión y satisfará otros requisitos. En la actualidad, el alto costo de los energéticos ha dado más importancia a minimizar la caída de presión que hace muchos años.

Las condiciones de operación, o sea, la presión y temperatura coincidentes a que debe trabajar la válvula, a menudo limitan la selección. Quizá se deban excluir las válvulas que tienen sellos de material sintético o materiales de construcción no metálicos, debido a las altas temperaturas del proceso. A la inversa, las bajas temperaturas de operación limitan la elección de válvulas a las fabricadas con aleaciones.

Los materiales de construcción deben ser compatibles con los demás factores que intervienen en la selección. Los cuerpos, revestimientos y guarniciones de válvulas están disponibles en una amplia variedad de materiales para prestar casi cualquier servicio. Con frecuencia, es necesario tener en cuenta el material del cuerpo por separado de las guarniciones (es decir, las partes internas que tienen contacto con el líquido) a fin de optimizar el diseño de la válvula desde un punto de vista económico.

Las válvulas hechas en su totalidad con resinas termoplásticas y las válvulas metálicas con las piezas, que tienen contacto con el fluido, revestidas con plástico se han vuelto muy comunes en servicios corrosivos.

El hierro dúctil, por comparación con el hierro gris, soporta presiones y temperaturas más altas y tiene excelente resistencia a los choques. Dado que el hierro dúctil es menos costoso y tiene mayor resistencia a la corrosión que algunos aceros, ha servido para sustituir éste en muchos casos.

A veces, los materiales de construcción tienen estrecha relación con ciertos tamaños. Las válvulas para agua, aceite o petróleo, gas, aire, etc., se suelen fabricar con latón o bronce en los tamaños pequeños, mientras que en tamaños de 4 in y mayores, se suelen utilizar cuerpos de hierro y de acero.

### 3.2.6 Válvulas Eliminadoras de Aire.

Algunas se instalan con el objeto de expulsar el aire retenido en la succión cuando la bomba no trabaja. Esta expulsión se efectúa luego de iniciarse la operación de la bomba; se ubican generalmente a continuación de la junta flexible. Uno de los tipos más usados es el que muestra la figura 3.14 (1) a la cual puede acoplarse una válvula Check con el objeto de amortiguar el golpe del combustible para prolongar su vida útil y evitar ruidos desagradables. La instalación de esta Check es sumamente recomendable.

También se instalan válvulas eliminadoras de aire a lo largo de la línea de conducción, pues el aire en las tuberías supone una condición altamente perjudicial y potencialmente peligrosa cualquiera que sea el material que constituye al tubo. Al acumularse en el interior de una conducción, tiende a ocupar los puntos topográficos altos del perfil de la línea y si no se extrae, produce una estrangulación de la sección que puede llegar a interrumpir el flujo de combustible. El mayor peligro, sin embargo, está en la posible compresión de este aire y su expulsión súbita así como en una interrupción repentina del flujo que puede multiplicar enormemente la presión de la bolsa de aire acumulado en la tubería traduciéndose en una verdadera explosión con proyección de fragmentos.

Cuando una línea de conducción no está llena de combustible, es decir "purgada", los inconvenientes descritos se repiten en cada punto alto del perfil de la línea; sus efectos se suman y el rendimiento de la conducción disminuye en forma progresiva. Algunas veces esta disminución se atribuye equivocadamente a las bombas, siendo que con sólo purgar la línea en forma correcta, ésta recuperara su capacidad normal de escumimiento.

Por las razones expuestas anteriormente, todos los puntos altos deben estar provistos de válvulas que permitan evacuar el aire automáticamente a medida que se acumula; estas "válvulas

eliminadoras de aire" se instalarán después de las subidas (figura 3.15) y antes de las bajadas bruscas (figura 3.16). La figura 3.17 muestra el corte de una válvula de este tipo.

En las figuras 3.15 y 3.16 se observa que en los puntos bajos de la línea se coloca una pieza especial que permite el vaciado de la tubería, eliminándose al mismo tiempo los sedimentos que se acumulan en esos sitios cuando el combustible no esta en movimiento y que pueden llegar a obstruir el flujo.

El diámetro de la válvula de expulsión de aire, como también se les llama, se puede seleccionar de acuerdo al diámetro de la tubería y gasto que conducirá la línea, por medio de las reglas empíricas de la tabla 3.2.

**TABLA 3.2.**

Diámetro de la Tubería	Gastos en L/S	Diámetro de la Válvula
1/2" a 4"	0 a 12.6	1/2"
6" a 10"	12.7 a 50.4	1"
12" a 18"	50.5 a 201.6	2"
20" a 24"	201.7 a 472.5	3"
26" a 30"	472.6 a 819.0	6" a 8"

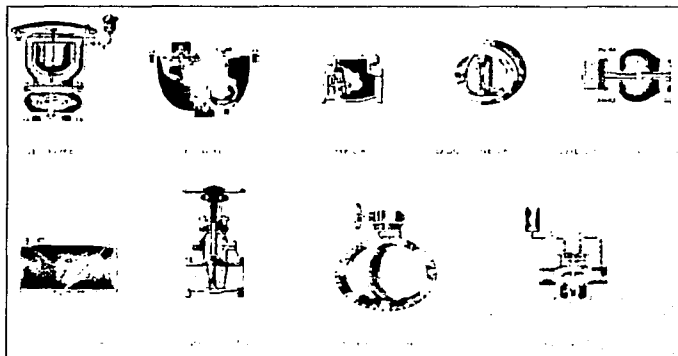


figura 3.14 Válvulas.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Existen varios tipos en el mercado, y algunos de ellos se pueden observar en la figura 3.14, (3), (4), (5) y (6). La primera representa la válvula Check tradicional y comúnmente empleada llamada de columpio; una ampliación de ésta se muestra en la figura 3.18.

La segunda (figura 3.14 (4)) se denomina Duo - Check y consta esencialmente de dos medias lunas conectadas a un eje vertical, que se abren según el sentido del escurrimiento. Esta válvula en comparación con la tradicional es más liviana, de menor tamaño y, consecuentemente, de menor costo; sin embargo, las pérdidas de carga son mayores que en la tradicional.

La tercera (figura 3.14 (5)) tiene la característica de efectuar un cierre más o menos lento, con lo cual se consigue prolongar la vida de la válvula y casi eliminar el ruido que producen los otros tipos; suele llamársele Check silenciosa.

La selección del tipo de Check para una determinada instalación dependerá del diámetro de la válvula a emplear, de las presiones a que operará y de su costo en el mercado. En varios proyectos, el tiempo de entrega que ofrecen sus fabricantes puede ser determinante para el tipo elegido.

La figura 3.14 (6) muestra la sección según el eje longitudinal de la tubería, de la válvula llamada Roto - Check, cuya operación es semejante a la de columpio. Por su diseño y procedimiento de construcción (se fabrica por mitades y se une con pernos) compite en costo con la válvula Check tradicional y es especial para cuando se requieran diámetros grandes. Tiene la ventaja de efectuar un cierre lento y hermético.

### **3.2.8 Válvulas de Mariposa**

Las válvulas de mariposa, como la mostrada en la figura 3.14 (8) puede sustituir a la de compuerta cuando se requieren diámetros grandes y para presiones bajas en la línea; tienen la ventaja de ser más ligeras, son de menor tamaño y más baratas. Estas válvulas se operan por medio de una flecha que acciona un disco haciéndolo girar centrado en el cuerpo de la válvula; la operación puede ser manual, semiautomática o automática, mediante dispositivos neumáticos, hidráulicos o eléctricos. El diseño hidrodinámico de esta válvula permite emplearla como reguladora de gasto y en ciertos casos para estrangular la descarga de una bomba.

### **3.2.9 Válvulas de Globo.**

Son voluminosas y presentan una alta resistencia al paso del combustible, por lo que se emplean, generalmente, solo en tuberías de pequeños diámetros. Constan de un disco horizontal accionado por un vástago para cerrar o abrir un orificio por el que pasa el combustible; este mecanismo se encuentra dentro de una caja de hierro fundido con extremos de brida para los diámetros grandes y de rosca para los pequeños.

### **3.2.10 Válvulas de Compuerta.**

La válvula de compuerta se emplea con el objeto de aislar en un momento dado algún elemento o sección del sistema para poder efectuar una reparación, inspección o dar mantenimiento, sin que se interrumpa totalmente el servicio.

En una instalación como la de la figura 3.13, esta válvula se instala en la descarga de cada bomba, después de la válvula de alivio; sin embargo, pudieran ser necesarias otras en otro sitio o disminuir el número de ellas, según el proyecto.

La válvula de compuerta señalada con el número (6) de la figura 3.13, ubicada en el extremo inicial de la línea de conducción, se instala con el fin de vaciar la tubería de tiempo en tiempo, lo que permite efectuarle una especie de lavado, ya que así se extraen las arenas y lodos que se

ESTA TESIS NO SALE  
DES LA BIBLIOTECA



abiertas del todo. Hay que cambiar con frecuencia las empaquetaduras porque son de vueltas múltiples y puede haber desgaste serio en el vástago. Otro factor que influye en los altos costos de mantenimiento es el reacondicionamiento periódico de los asientos.

Hay disponibles algunos diseños modificados para eliminar algunas de esas limitaciones. El más común es la compuerta de cuña dividida en la cual el sello es un disco dividido. El sellamiento depende de la torsión aplicada en el volante o la manija, en vez de que sea en la presión corriente arriba.

Cuando la válvula está abierta del todo, se eleva por completo la compuerta fuera del conducto del flujo, por lo cual el fluido pasa en línea recta por un conducto que suele tener el mismo diámetro que la tubería. Aunque hay variaciones, la válvula de compuerta, por lo general, produce menor caída de presión en el sistema que cualquier otro tipo de válvula.

Las características principales del servicio de las válvulas de compuerta incluyen: cierre completo sin estrangulación, operación poco frecuente y mínima resistencia a la circulación.

Los principales elementos estructurales de la válvula de compuerta, como se ilustra en la figura 3.21, son: volante, vástago, bonete, compuerta, asientos y cuerpo. Estas válvulas están disponibles con vástagos de los siguientes tipos:

- Vástago no elevable, con rosca interna, tiene ventajas cuando hay poca altura.
- Vástago elevable con rosca externa que requiere más espacio libre (y mayor altura en la instalación), pero impide que la rosca esté en contacto con los fluidos del proceso.
- Vástago elevable con rosca interna, que expone la rosca del vástago a los líquidos del proceso; por tanto, no se debe usar con líquidos corrosivos.

Están disponibles, en general, los siguientes tipos de bonetes para válvulas de compuerta:

- Bonetes con rosca interna o externa para válvulas pequeñas y servicio a baja presión.
- Bonetes con unión para válvulas pequeñas donde se necesita mantenimiento frecuente.
- Bonetes con brida y atomillados para válvulas grandes y servicio a presión y temperaturas altas.
- Bonetes con abrazadera en válvulas para presión moderada, donde se necesita limpieza frecuente.
- Bonetes sellados de presión para servicio con altas presiones y temperaturas.
- Bonetes con sello de pestaña para altas presiones y temperaturas.
- Bonetes con cierre de obturador para presión y temperatura altas.

Los siguientes elementos de control del fluido suelen estar disponibles para las válvulas de compuerta.

- Disco macizo o de una sola cuña, suele ser macizo y con asientos de válvula cónicos, para petróleo, gas, aire, pastas aguadas y líquidos pesados (figura 3.22).
- Cuñas flexibles (el disco sólo es macizo en el centro y ambas superficies de asentamiento son flexibles) para compensar la desalineación y los cambios dimensionales producidos por las temperaturas y presiones fluctuantes.
- Disco de cuña dividido (un diseño de bola y asiento en el cual dos discos espalda con espalda se pueden ajustar a ambas superficies del asiento, con lo cual cada disco se mueve con independencia para tener buen sellado) para gases no condensables, líquidos a temperaturas normales y fluidos corrosivos, todos a baja presión.
- Disco doble (discos paralelos). En estas, las dos superficies de asiento tienen movimiento relativo entre sí. Esto produce buen cierre aunque los asientos estén desalineados o tengan



ángulos diferentes. En un tipo, los discos están sujetos con una articulación esférica o rótula que les permite el movimiento cuando acoplan contra asientos cónicos. En los diseños de doble disco y asientos paralelos se utilizan expansores o cuñas para empujar a los discos contra el asiento. El desgaste del asiento es mínimo, porque el disco hace contacto con el asiento sin movimiento deslizable. Otro diseño, que tiene insertos blandos en los discos y conexiones para drenaje o respiración (venteo) en el cuerpo produce cierre hermético y permite utilizar la válvula en aplicaciones de doble cierre y purga. Sin embargo, están limitadas a temperaturas de menos de 600°F.

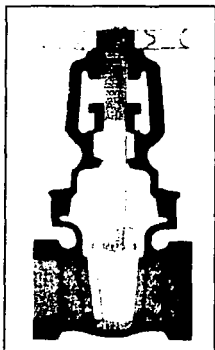


Figura 3.20. Válvula de compuerta, disco macizo, vástago y yugo externos.

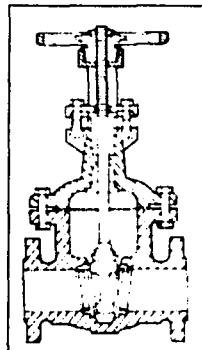


Figura 3.22. Válvula de compuerta con bonete atornillado y vástago elevable.

Los asientos de las válvulas de compuerta pueden ser integrales con el cuerpo o ser de construcción anular. Para servicio a alta temperatura, los anillos del asiento se colocan a presión en su lugar y se sueldan para sellarlos en el cuerpo de la válvula.

Las fugas por las válvulas de compuerta pueden ocurrir en ambos extremos en donde se conectan a la tubería (cuando la válvula está abierta), en la unión entre el bonete y el cuerpo, en el vástago, y corriente debajo de la compuerta cuando la válvula está cerrada. Se pueden proveer sellos para evitar las fugas al exterior o corriente abajo cuando la válvula está cerrada.

Estos sellos pueden ser de metal a metal, metal en contacto con un material elástico, o metal en contacto con un inserto elástico colocado en la cara del metal.

El prensaestopos o estopero es el método más común para sellar el vástago; tiene una brida en el collarín para oprimir la empaquetadura y evitar fugas. Además, los vástagos se pueden sellar con la inyección lateral de grasa hacia un anillo de cierre hidráulico. La empaquetadura o los sellos anulares del vástago se pueden cambiar cuando se requiera. Los materiales de sello pueden ser grafito-asbesto y asbesto (amiante) impregnado con TFE.

Ventajas: El tipo de cierre es tal que el cuerpo de la válvula de compuerta es de perfil delgado comparado con otros tipos de válvulas, lo cual produce menor masa del cuerpo y un costo más bajo, en especial en las válvulas de tamaño mayor.

Su corta dimensión entre carga y cara permite instalarla en tubos con menos espacio que casi todas las otras válvulas.

El flujo rectilíneo y la zona para flujo pleno, que es de la misma configuración que la tubería, sólo agrega una caída de presión muy pequeña en la tubería.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

No se requiere lubricante en la cara de las piezas móviles internas, con lo cual no hay riesgo de contaminar el fluido del proceso.

Desventajas: El asiento es parte integral del cuerpo y produce una cavidad que puede retener sólidos y evitar el cierre completo de la válvula. Por ello, las válvulas de compuerta que se suelen preferir para servicio limpio son indeseables para la mayor parte de las pastas fluidas.

Las fugas del fluido por el porta empaquetadura son un problema inherente en estas válvulas que las hace indeseables en servicios con materiales muy tóxicos o inflamables. El problema con la empaquetadura se hace más serio cuando aumenta la temperatura o la presión.

Estas válvulas no se pueden utilizar cuando se requiere modulación del flujo. Para el momento en que la válvula está abierta entre 5% y 10%, el flujo ya es del 85% al 95% del que hay con apertura total. La velocidad en la apertura en forma de media luna abierta 5% a 10% es muy alta y el disco no está diseñado para resistir la fuerza erosiva resultante.

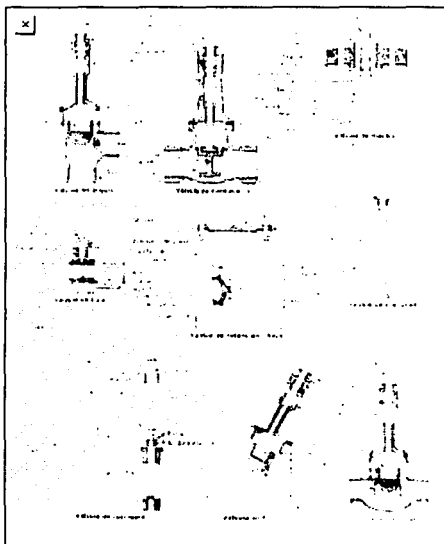


figura 3.21 a. Componentes de los diversos tipos de válvulas utilizadas en la industria de procesos químicos.

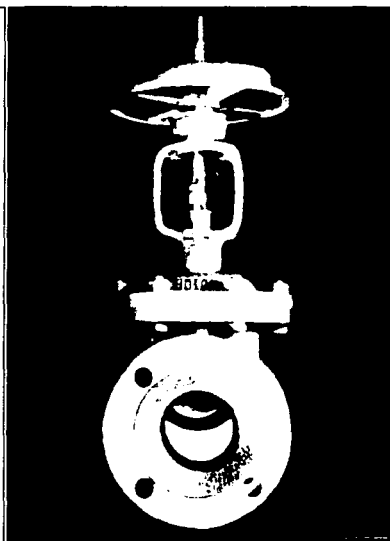
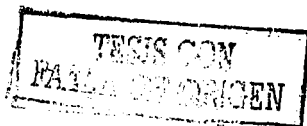


figura 3.21 b. La válvula de compuerta permite flujo rectilíneo (Vista por fuera).

### 3.2.11 Válvulas de Alivio Contra Golpe de Ariete

Las válvulas aliviadoras de presión son empleadas para proteger al equipo de bombeo, tuberías y demás elementos en la conexión, contra los cambios bruscos de presión que se producen por el arranque o paro del equipo de bombeo.



La válvula está diseñada de tal manera que puede abrirse automáticamente y descargar al exterior cuando la presión en el sistema es mayor que aquella con la que fue calibrada lográndose con ello el abatimiento de la línea piezométrica.

El cierre de esta válvula también es automático y se logra cuando la presión en la línea llega a ser menor que la de su ajuste o calibración.

De acuerdo con lo anterior, el empleo de esta válvula dependerá de la magnitud de las presiones que se tengan debidas al golpe de ariete y de la conveniencia que surja al haber hecho un estudio económico, considerando la posibilidad de emplear elementos (tuberías, válvulas, ect.) resistentes a las presiones que se van a presentar.

En general las válvulas de alivio que existen en el mercado, básicamente tienen el mismo diseño, figura 3.14 (9), y están constituidas en esencia por dos partes; una que corresponde al cuerpo de la válvula propiamente dicho, y la otra formada por los mecanismos de control. En el cuerpo de la válvula se encuentra el elemento actuador, constituido por un pistón cuya posición regula el funcionamiento de la válvula. El control de este pistón se efectúa por medio de una válvula piloto calibrada que actúa con una presión determinada y no es más que una válvula de aguja de precisión para pequeños flujos. El piloto de control de esta válvula puede ser hidráulico, eléctrico o de ambos tipos.

Las válvulas que se usan con más frecuencia son las llamadas de pistón y las de diafragma, preferentemente con ambas clases de control. Las dos funcionan satisfactoriamente, pero en ocasiones se prefiere la válvula de pistón, por que la otra requiere de un servicio de mantenimiento más frecuente, debido a que el material del que está hecho el diafragma (hule, neopreno, ect.) se deteriora dependiendo del tipo de combustible que se maneje.

Cuando se ha definido el empleo de válvulas de alivio, su diámetro se determina en función del gasto de escurrimiento en la tubería a la que se conectará, de las presiones originadas por el golpe de ariete y de las pérdidas de carga, normalmente tolerables, ocasionadas por esta válvula. Se recomienda determinar sus diámetros consultando el catálogo de los fabricantes.

Su ubicación se elige después de los elementos de control o al principio de la tubería de descarga común. En una instalación como la de la figura 3.13, en la cual se ha instalado una válvula de alivio a cada bomba, se sitúa entre la Check y la de compuerta, mediante una T de acero o fierro fundido.

El desfogue de la válvula de alivio deberá diseñarse sin posibilidad de ahogamiento y guiar la descarga hacia combustibles debajo de la fuente de abastecimiento.

### **3.3 Selección de Válvulas.**

Las válvulas constituyen del 20 al 30% del costo de la tubería de una planta de bombeo. Por tanto, la selección de estas es de suma importancia en los aspectos económicos, y de operación en la misma.

Se deben tener en cuenta muchas cosas al seleccionar una válvula. Aunque el grado de importancia asignado a cada una puede variar, se otorga la máxima prioridad, en general, a las funciones de la válvula.

Su selección incluye muchos factores tales como: el tipo de válvula, materiales de construcción, capacidades de resistir presión y temperatura, material de empaquetaduras y juntas, costo y disponibilidad.

### 3.3.1 Capacidades de Presión y Temperatura.

Una vez determinadas las presiones y temperaturas máximas de operación, se puede establecer la capacidad de presión requerida por la válvula. Comparando su selección con las listas de los fabricantes respecto a las capacidades de presión y temperatura con el fin de asegurarse que se ajustan a ella.

Como una guía para la selección del material de la válvula tomando como base la presión, en la tabla IV (anexo 3.1) se presentan las capacidades de presión de gran número de materiales disponibles para válvulas con rosca, con extremo de enchufe soldado y con bridas. Estas capacidades están basadas en las normas ANSI. Para materiales que no aparezcan en la tabla, se deben consultar las normas ANSI o la literatura del fabricante para el tipo de servicio.

### 3.3.2 Material de Empaquetaduras y Juntas.

La selección del material para empaquetaduras y juntas es tan importante como la de los materiales de la válvula para el servicio a que se destinan.

La selección de una empaquetadura inadecuada puede permitir fugas en la válvula y requerir un paro del sistema para reemplazarla. Además, si el fluido que se escapa es tóxico o inflamable, puede ocurrir una grave situación, con posibles lesiones al personal y daños a la planta.

Los riesgos y los costosos paros son inexcusables y son fáciles de evitar. Al seleccionar el material de empaquetaduras de válvulas, se debe consultar la literatura de los fabricantes de empaquetaduras y válvulas y las publicaciones técnicas, para comprobar que el material seleccionado sea compatible con los fluidos que se manejan.

Asimismo, la forma física de la empaquetadura debe ser compatible con las características mecánicas de la válvula. Ciertos materiales de empaquetadura requieren una elevada compresión, pero hay válvulas que son muy endebles o muy ásperas y no se puede aplicar una gran compresión. Además, las elevadas compresiones requeridas por ciertas válvulas pueden hacer que algunas empaquetaduras fluyan en frío. Ciertas empaquetaduras incompatibles pueden producir desgastes del vástago.

Con base a estos datos y a la experiencia en proyectos anteriores que son muy parecidos a este, se escogió la válvula de compuerta como la más indicada para este proyecto, así como se describió a fondo en los párrafos anteriores.

### 3.3.3 Mecanismos de Control de Flujo

Hay diversas razones por las que las válvulas de compuerta superan en número a las demás, pero quizá la más importante son las muchas variantes en que se fabrican para aplicaciones especializadas. Estas válvulas se pueden clasificar, en general, por el tipo de elemento de control de flujo utilizado. Una de estas clasificaciones de la Norma API 600-1973 tiene dos divisiones importantes, como se ilustra en la figura. 3.23.

La válvula de compuerta más común es la de cuña maciza, lisa con asiento inclinado. Dado que las temperaturas y presiones de operación han aumentado con el paso de los años, el desgaste de la cuña contra el asiento inclinado se ha vuelto un problema. Una solución es la cuña flexible que puede funcionar con asientos desalineados y minimiza el desgaste de las superficies de sellamiento.

Esta cuña es en forma de "H" y su configuración le da la elasticidad.

En el tipo de cuña dividida (disco doble) de bola y cuenca, los dos discos están en contacto entre sí mediante una unión de bola y cuenca. Dado que los discos pueden girar con independencia, se adaptan a los cambios en los ángulos de los asientos y tienen buen sellamiento y más duración. La válvula de cuña dividida se utiliza más en servicios corrosivos de baja presión y tiene asientos integrales.

La válvula de compuerta de disco doble tiene dos discos que están empujados contra asientos paralelos en el punto de cierre mediante un expansor mecánico. Esto produce sellado hermético sin ayuda de la presión del líquido y compensa en forma automática la desalineación angular de los asientos. Además mantiene un cierre hermético durante la contracción longitudinal del cuerpo de la válvula cuando se enfría.

En las tuberías para líquidos o gases se utiliza un tipo de válvulas de compuerta que permiten la limpieza del interior de la tubería. Por tanto, el diámetro interior de la válvula debe dejar pasar los rascadores o las esferas separadoras de los productos y debe ser igual o mayor que el de la tubería. Estas válvulas se denominan de conducto rectilíneo con orificio total (figura 3.24).

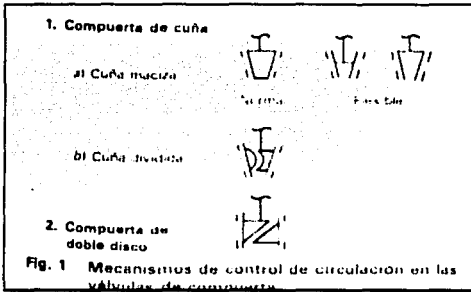


figura 3.23 Mecanismos de control de circulación en las válvulas de compuerta.

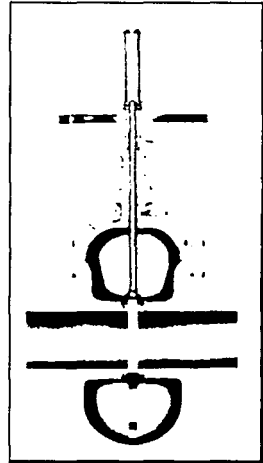


figura 3.24 Válvula de compuerta para tuberías de petróleo de circulación con ducto pleno.

### 3.2.4 Materiales de Construcción.

Una vez que se establece la función y se ha seleccionado el tipo de válvula, se deben tener en cuenta los materiales de construcción adecuados para el servicio a que se destinará la válvula, teniendo presente que todas las partes de la válvula que están en contacto con el fluido deben tener la resistencia necesaria a la corrosión.

La selección de los materiales de construcción resistentes a la corrosión, esta normada por las recomendaciones de los fabricantes para los diversos tipos de servicios. Y si esa información parece ser inadecuada, habrá que obtener datos de la corrosión mediante pruebas de laboratorio. En general, salvo que se trate de un proceso totalmente nuevo, no habrá problema para determinar los materiales de construcción con base en la información existente.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## C A P I T U L O 4

### Diseño de la línea de conducción.

#### 4.1 Flujo de Hidrocarburos en la Línea de Conducción.

El flujo de líquidos en una tubería es afectado por muchas propiedades variables tanto del líquido como de la tubería, y aun con características constantes como la rugosidad del tubo, se tienen efectos variables en el comportamiento del flujo en el tubo.

Puede ser una labor formidable determinar todas las variables y pronosticar todas sus reacciones dentro de una tubería sin construir. Afortunadamente se cuenta con un gran registro de experiencia en líneas de hidrocarburos líquidos entre otros fluidos. Datos y formulas de esta recopilación han sido analizados y puestos en practica en este apartado, todo soportado por la experiencia de la Gerencia de Transportación por Ducto de Pemex Refinación.

#### 4.2 <sup>1</sup>Localización.

El criterio que debe seguirse para determinar la clase de localización por donde pase una tubería de conducción de hidrocarburos líquidos, será el siguiente:

La unidad para la clasificación de la localización será una área unitaria de 400 x 1600 m o sea 200 m a ambos lados del eje de la tubería en un tramo de 1600 m; exceptuando lo indicado en el párrafo 6.4.4 y 6.4.6 de la norma CID-NOR-07.3.13, la clase de localización se determinara por el número de construcciones que se encuentren en el área unitaria. Para el propósito del apartado 6.4 de la norma CD-NOR-07.3.13, cada casa o sección de una construcción destinada para fines de ocupación humana o habitacionales, contara como una construcción por separado.

#### Clasificación de localizaciones:

- a) **Localización clase 1 (6.4.2<sup>1</sup>).** Es la que tiene 10 o menos construcciones en un área unitaria; o en los casos en donde la tubería se localice en la periferia de ciudades, poblados agrícolas o industriales.
- b) **Localización clase 2 (6.4.3<sup>2</sup>).** Es la que tiene más de 10 pero menos de 50 construcciones en un área unitaria de terreno.
- c) **Localización clase 3 (6.4.4<sup>2</sup>).** Es aquella área en donde se cumpla una de las siguientes condiciones:
  1. (6.4.4.a<sup>2</sup>) Cuando en un área unitaria existan 50 o más construcciones destinadas a ocupación humana o habitacional.
  2. (6.4.4.b<sup>2</sup>) Cuando exista una o más construcciones a menos de 100 m del eje de la tubería y se encuentra ocupada normalmente por 20 o más personas.
  3. (6.4.4.c<sup>2</sup>) Cuando exista un área al aire libre bien definida a menos de 100 m del eje de la tubería y esta sea ocupada por 20 o más personas durante su uso normal, como sería un campo deportivo, un parque de juegos, un teatro al aire libre u otro lugar público de reunión al aire libre.

<sup>1</sup> Se entiende por localización al lugar donde se encontrara o instalara el tubo de la línea de conducción.

<sup>2</sup> Párrafo de la norma CID-NOR-07.3.13

4. (6.4.4.d<sup>2</sup>) Cuando la tubería pase a 100 m o menos de áreas destinadas a fraccionamientos o casas comerciales, aun cuando en el momento de construirse la tubería solamente existan edificaciones en la décima parte de los lotes adyacentes al trazo.
5. (6.4.4.e<sup>2</sup>) Cuando la tubería se localice en sitios donde a 100 m o menos haya un tránsito intenso u otras instalaciones subterráneas. Considerándose como tránsito intenso un camino o carretera pavimentada con un flujo de 200 ó más vehículos en una hora pico de aforo.

**d) Localización clase 4 (6.4.5.2<sup>3</sup>)** Es aquella área unitaria donde prevalecen edificios de 4 o más niveles donde el tráfico sea pesado, o denso, considerando como tráfico intenso un camino o carretera pavimentada con un flujo de 200 o más vehículos en una hora pico de aforo; o bien existan numerosas instalaciones subterráneas.

Cuando existe un agrupamiento o conjunto de construcciones destinadas a fines de ocupación humana o habitacionales, que por su número pertenezca a una clase de localización definida de acuerdo con los incisos anteriores, los límites de localizaciones podrán ampliarse de la siguiente manera:

(6.4.6.a<sup>2</sup>) Una localización clase 4, clase 3 y clase 2, se ampliara hasta 200 m , siguiendo el eje de la tubería y contados a partir de los límites del área unitaria.

(6.4.6.b2) Las localizaciones clase 1, clase 2 y clase 3 en que se encuentre una construcción donde se reúnan muchas personas, como sucede en escuelas, hospitales , iglesias, salas de espectáculos, cuarteles, etc., se deben considerar de la clase siguiente, en orden ascendente, y ampliarse hasta 200 m en ambos sentidos de la tubería contados a partir de los límites del área unitaria.

(6.4.6.c2) Debe tomarse margen de 200 m en ambas direcciones de la tubería al determinarse los límites de un área clasificada, excepto cuando existan barreras físicas o factores de otra índole que limiten la expansión futura de las áreas pobladas, en cuyo caso los márgenes del área clasificada que deben ampliarse, quedaran delimitadas por dichas barreras, si exceder la distancia marcada.

### **4.3 Propiedades Físicas de los Hidrocarburos a Conducir**

#### **Gasolina Pemex Magna Sin Convencional.**

Destilado de petróleo, sin plomo de uso general que elabora Pemex refinación, con un índice de octano mínimo de 87(número de octano reserch + número de octano motor) / 2. Puede utilizarse en los automóviles modelo 1985 y posteriores, pero necesaria para todos los vehículos fabricados en México modelo 1991 y posteriores equipados con convertidor catalítico para reducir las emisiones contaminantes.

#### **Gasolina Pemex Premium.**

Gasolina sin plomo que elabora Pemex Refinación especialmente para motores de alta relación de compresión, que exigen un índice de octano superior al de la gasolina Magna. Su índice de octano es de 92-93.

### <sup>3</sup>Diesel Pemex Sin.

La palabra proviene del apellido del inventor de motores de ciclo Diesel. Se consume principalmente en máquinas de combustión interna de alto aprovechamiento de energía, con elevado rendimiento y eficiencia mecánica.

Su uso se orienta fundamentalmente como: Energético en el parque vehicular equipado con motores diseñados para combustible diesel, tales como camiones de carga de servicio ligero y pesado, autobuses de servicio urbano y de transporte foráneo, locomotoras, embarcaciones, maquinaria agrícola, industrial y de la construcción.

<b>*Propiedades Físicas de los Hidrocarburos a Conducir</b>			
Propiedades	Gasolina Pemex Magna Sin Convencional.	Gasolina Pemex Premium.	Diesel* Pemex Sin.
	Es un líquido color verde claro, no soluble en agua.	Líquido de color amarillo, insoluble en el agua.	Es un líquido de color amarillo claro, insoluble en el agua.
Temperatura de ebullición	(Rango) a 760 mm Hg: 27-225° C	(Rango) a 760 mm Hg: 77-225° C	(Rango) a 760 mm Hg: 216-371° C
Presión de vapor	6.5-8.5Psi	6.5-11.5Psi	30 mm Hg @ 20° C
Densidad de vapor	(Aire = 1): 3-4	(Aire = 1): 3-4	(Aire = 1): 4
Porcentaje de volatilidad	esencialmente 100	esencialmente 100	
Gravedad específica	(20/4° C): 0.680 - 0.740	(20/4° C): 0.74	(20/4° C): 0.860
Temperatura de inflamación	-38° C	-38° C	45° C
Límites de inflamabilidad en el aire	porcentaje en volumen: inferior = 1.4 %, superior = 7.6 %	porcentaje en volumen: inferior = 1.4 %, superior = 7.6 %	Porcentaje en volumen: inferior = 0.7 superior = 5.0%
Viscosidad cinemática	0.86 cs	0.86cs	a 40° C: 3 cs
Densidad	$\frac{\text{kg}}{760 \text{ m}^3}$	$\frac{\text{kg}}{760 \text{ m}^3}$	$\frac{\text{kg}}{840 \text{ m}^3}$
Azufre total			Porcentaje en peso: 0.05 Máxima.

figura 4.1 Características de los hidrocarburos.

#### 4.4 Determinación del Gasto (Q).

En este inciso se plantean dos formas de calcular el consumo que se tendrá para el año 2021; ambas maneras de cálculo se complementan y se comprueban entre sí, debido que parten de una base estadística de consumos a lo largo de cierto periodo de tiempo.

<sup>3</sup> Se pronuncia dísel.

<sup>4</sup> Valores obtenidos de la hoja de datos de seguridad para sustancias op. cit. Y manual de especificaciones. Especificación No 308 Pemex Refinación, sep. De 1997.

TESIS COM  
FALLA DE ORIG



#### 4.4.1 Método Aritmético.

Basándonos en la gran experiencia con la que cuenta la Gerencia de Operación por Ducto, adoptamos un modelo Aritmético para el cálculo de consumos futuros. El propósito de plantear un método de cálculo, es confirmar los datos obtenidos de consumos o demandas de hidrocarburos, que adquirimos de la fuente de información SITRAC del portal de intranet Pemex.

Aplicando las ecuaciones 2.59 y 2.60 se calculará el consumo para el año 2021:

Los datos de consumo por año, que son los iniciales se obtuvieron de la figura 4.2

Datos de Consumo.

Año.	Consumo (MBD).
1999	22.2
2006	30.7
2010	36.6

De la ecuación 2.59: 
$$Ka_{(1999-2010)} = \frac{36.6 - 22.2}{2010 - 1999} = 1.309 \quad 4.1$$

De la ecuación 2.60: 
$$P_{2021} = P_{2010} + Ka_{(1999-2010)}(2021 - 2010) = 50.9 \text{ MBD.} \quad 4.2$$

#### 4.4.2 Expectativas de Demandas para las TADs de S.L.P., Cd. Valles y Matehuala.

Para el nuevo proyecto del poliducto Madero - San Luis, es importante conocer las demandas actuales y las expectativas futuras del consumo de Gasolinas y Diesel de San Luis Potosí, Matehuala y Cd. Valles. Esto nos proporcionará el caudal que influirá en los cálculos que determinarán la potencia de bombeo y diámetro de la tubería; que se necesitara en la actualidad y en un futuro próximo (veinte años) para la conducción de los destilados de la refinería de Madero a la TAD SLP.

*Volumen de Ventas Interiores de Gasolina y Diesel, por Región (MBD*)													
AGENCIA		1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
S. L. P.	gasolina	5.3	5.5	5.7	6.0	6.2	6.5	6.8	7.1	7.4	7.7	8.1	8.4
S. L. P.	diesel	3.7	3.7	4.1	4.3	4.5	4.7	5.0	5.2	5.4	5.7	5.9	6.2
		9.0	9.2	9.8	10.3	10.7	11.2	11.8	12.3	12.8	13.4	14.0	14.6

figura 4.2 Demandas de gasolina y Diesel de San Luis Potosí hasta el 2010

<sup>5</sup> Se estima que los poliductos tienen un periodo útil de 20 años.

<sup>6</sup> Datos obtenidos de SITRAC que se encuentra en el Intranet de Pemex.



Volumen de Ventas Interiores de Gasolina y Diesel, por Región (MBD*)												
Matehuala	gasolina	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4
Matehuala	diesel	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6
		1.3	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.8	1.9	2.0
Cd. Valles	gasolina	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.4	1.5
Cd. Valles	diesel	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5
		1.9	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8	2.8	3.0
	Subtotal	12.2	12.4	13.3	13.9	14.5	15.2	16.0	16.6	17.4	18.1	19.0
Querétaro	diesel	10.0	10.1	11.0	11.6	12.2	12.8	13.4	14.1	14.7	15.4	16.1
		10.0	10.1	11.0	11.6	12.2	12.8	13.4	14.1	14.7	15.4	16.1
	Gran total	22.2	22.6	24.3	25.5	26.7	28.0	29.4	30.7	32.1	33.5	36.1

figura 4.2 Demandas de gasolina y Diesel de San Luis Potosí hasta el 2010

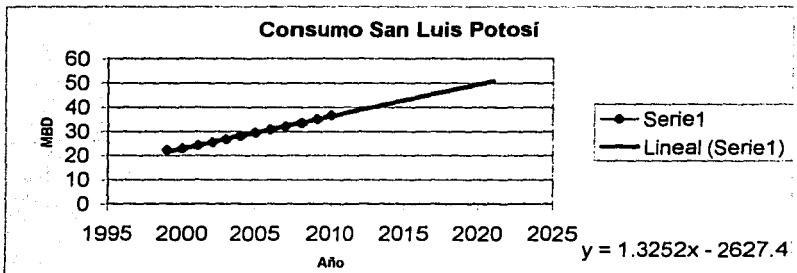


figura 4.3 Representación de la tendencia a seguir por la gráfica.

Con los datos obtenidos de la figura 4.2 sobre el consumo de gasolina y diesel en San Luis Potosí hasta el año dos mil diez, se realizó una gráfica utilizando como herramienta Excel (figura.4.3), y se observó que el comportamiento en el consumo de estos hidrocarburos es lineal "serie 1". Empleando las aplicaciones de Microsoft Excel se obtuvo la tendencia del comportamiento de la gráfica "Lineal serie 1" así como su ecuación. Con esta ecuación se obtuvieron los valores del consumo total año por año partiendo del año 2011 hasta el año 2021 (figura 4.4).

Con los valores obtenidos por esta ecuación, se corroboró el consumo de los productos antes calculados por el método aritmético en el inciso 4.4.1.

Consumo Total Por Año											
Año	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gran Total	37.58	38.9	40.2	41.55	42.9	44.2	45.5	46.9	48.2	49.5	50.8

Figura 4.4 Consumo total de Gasolina Y diesel hasta el año 2021en MBD.

IPSIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 4.5 Cálculo del Diámetro para la Línea de Conducción.

Para determinar el diámetro de la tubería que conducirá los hidrocarburos líquidos del proyecto, aplicaremos la fórmula 2.23, en el cual se establece un rango de velocidades del fluido ya definidas dentro de la tubería, que es de 2 a 4 ft/s para las líneas de bombeo.

$$\text{Con:} \quad d = \frac{0.286Q}{V} \quad 2.23$$

Q = BPH horas.  
V = ft/s de las estaciones.  
D = inches.

$$\text{Para:} \quad d = \frac{0.286(2116.666)}{4} = 12.3in. \quad 4.3$$

Q = 50.8 MBD  
Horas = 24hrs.  
V = 4 ft/s

$$\text{Para:} \quad d = \frac{0.286(2116.666)}{3} = 14.2in \quad 4.4$$

Q = 50.8 MBD  
Horas = 24hrs.  
V = 3 ft/s

$$\text{Para:} \quad d = \frac{0.286(2116.666)}{2.4} = 15.88in \quad 4.5$$

Q = 50.8 MBD  
Horas = 24hrs.  
V = 2.4 ft/s

Los resultados teóricos obtenidos en las ecuaciones (4.3, 4.4 y 4.5), se deben ajustar a los diámetros aproximados que existen comercialmente; ya que sería imposible encontrarlos en el mercado con el diámetro exacto que da la teoría. Los diámetros comerciales ajustados son: 12, 14 y 16 pulgadas respectivamente.

Otra forma de obtener el diámetro de la tubería, es utilizando una ecuación empírica (4.6) que a continuación indicamos y que también se ajusta a los rangos requeridos para un buen funcionamiento de la línea de conducción

$$d = \frac{4(0.093486)}{\pi(0.9144)} = 0.3608m = 14.2" \quad 4.6$$

En el ejemplo anterior(4.6), por la experiencia en proyectos anteriores de la subdirección de operación, se deberá tomar un valor diametral como base( en este caso es de 14" que es el que dio como resultado la fórmula 4.6 ), uno menor inmediato (12") y uno mayor o superior inmediato al

<sup>1</sup> En base a la experiencia de los ingenieros de Pemex Refinación, la obtención de los diámetros se basa en la fórmula 2.23, donde se define la velocidad por medio de un rango ya establecido. Dicha fórmula se obtuvo del manual de diseño de tuberías de la universidad de Texas.

intermedio que se cálculo (16"). Esto, con el propósito de contar con tres posibles opciones para analizar, y de estas, determinar el diámetro de tubería que brinde la mejor alternativa tanto en rendimiento como en costo<sup>8</sup>.

Determinados el gasto y los diámetros, parámetros que dan la pauta y que son determinantes en el diseño, el siguiente paso es calcular la línea de energía o gradiente hidráulico.

#### 4.6 Gradiente Hidráulico.

Determinaremos los cálculos del gradiente hidráulico tomando un diámetro aleatoriamente, en este caso el de 12" (sin olvidamos de los de 14" y 16"), definido en la sección anterior (4.5).

Los líquidos son Gasolina  $\nu = 0.86c$  y G.E.= 0.74. y Diesel  $\nu = 3c$  y G.E.= 0.86. Se propone para la conducción, un tubo API 5L, X52 con un espesor  $t = 0.250$  ", para el diámetro de 12" y  $t = 0.281$ " para los diámetros de 14" y 16"; los espesores se proponen con la finalidad de tener un parámetro de referencia con el cual iniciar. La propuesta de espesores, se tomo en base a la experiencia del desarrollo de proyectos anteriores. Y basándose en los resultados que se obtendrán, se determinara si este espesor es el adecuado o si es necesario aumentarlo o disminuirlo, a demás, se debe tomar en cuenta que a través de la línea de conducción se determinan diferentes tipos de localizaciones y espesores dependiendo de los lugares que recorrerá

#### El primer paso es establecer :

La MAOP( Máxima Presión de Operación Permitida): Es un parámetro que nos marca el limite de operación seguro de la tubería, su medida de presión se representa en columna de liquido en el perfil topográfico y es paralelo en el recorrido de este ( esto quiere decir que se le va adicionando su valor a la altura en cada punto del perfil, por eso toma su forma y es paralelo al mismo ), y conservara su altura de columna de liquido a lo largo del recorrido del perfil; y de esta forma se puede ver gráficamente (figura 4.5) cuando el gradiente o línea de energía rebasa los rangos de seguridad para el diseño<sup>9</sup>.

Así, el valor de la presión o altura dinámica del gradiente hidráulico (que será la presión de diseño) se restringirá a un valor menor o igual a la MAOP.

#### 4.6.1 Cálculo de la MAOP.

De la formula 2.25 y las figuras 2.11 y 2.12 tenemos:  $S = 0.72(1)(52000) = 37440 \text{ psi}$  4.7

Con los parámetros

$$D = 12.75"$$

$$t = 0.250 "$$

$$fd = 0.833$$

$$S = 37440 \text{ psi}$$

Sustituimos en la ecuación 2.26  $MAOP = \frac{2(37440)(0.833)(0.250)}{12.75} = 1223.04 \text{ psi}$  4.8

El resultado lo convertimos a columna de líquido, quedando:

$$MAOP = 859.736m$$

<sup>8</sup> Tomando en cuenta que entre mayor diámetro, más se incrementa el costo de la línea de conducción.

<sup>9</sup> Que marca la norma CID-NOR-07.3.13 en su inciso 6.2.13.

Gráficamente, en la figura 4.4, podemos observar el valor de la MAOP a través del recorrido en el perfil topográfico; notando que la presión en columna del líquido conserva su valor a lo largo del perfil, debido a esto la MAOP es similar al perfil, pero localizada en la grafica a la altura de columna de líquido que tiene como valor.

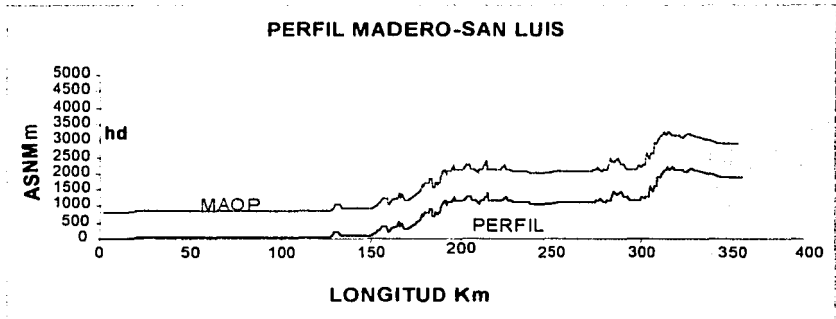


Figura 4.4. Comportamiento de la MAOP en el recorrido de la línea de conducción a través del perfil.

#### 4.6.2 Cálculo del Gradiente Hidráulico.

El gradiente hidráulico nos proporcionara la altura dinámica, que será el parámetro con el cual operará el tubo en la línea de conducción ( Presión de diseño ), y que es la presión necesaria para elevar el líquido a una determinada pendiente. Además, es un dato importante que nos suministra información tanto para calcular la curva del sistema como para la selección de una bomba adecuada que nos de la presión de diseño.

Para obtener el valor de la altura dinámica ( hd ), es necesario tomar en cuenta la máxima altura a vencer que en este caso particular es de 2196 m de ASNM en el kilómetro 316.7 del recorrido del perfil.

Si deseamos calcular un solo gradiente ( un bombeo o una bomba ) para obtener la altura dinámica a la cual se someterá el ducto para conducir el hidrocarburo líquido hasta la TAD en SLP, la columna de líquido tiene que vencer la máxima altura en el recorrido (2196 m de ASNM en el kilómetro 316.7). Esta altura dinámica, Sería enorme y por lo tanto superaría los límites de seguridad de operación delimitados por la MAOP en el perfil, a demás de ser una presión inusual que sería difícil manipular tanto en el ducto como en la bomba ya que esta tendría que ser demasiado grande ( si es que existe ) y muy costosa. En la figura 4.5<sup>10</sup> se muestra como la línea de energía sobrepasa los límites de seguridad (MAOP).

<sup>10</sup> Los valores de la altura dinámica representados en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 no son los parámetros reales, solo son ejemplos para dar una idea de cómo seleccionar un número adecuado de gradientes (para determinar las estaciones de bombeo), con el propósito de tener la suficiente energía para conducir los hidrocarburos sin sobrepasar las condiciones de seguridad indicadas.

ESTIS CON  
FALLA DE ORIGEN

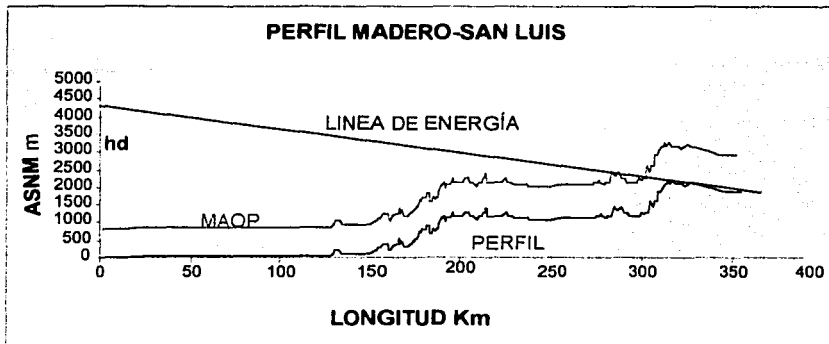


figura 4.5 En la grafica se muestra como la altura dinámica ( $hd$ ) de la línea de energía se encuentra por encima del rango de seguridad que determina la MAOP.

La manera de obtener la presión o altura dinámica que cuente con la suficiente energía para impulsar los hidrocarburos y además de no sobrepasar el rango de seguridad indicado por la MAOP. Es proponiendo varias estaciones de bombeo, las cuales contarán con un gradiente hidráulico cada una, y sus alturas dinámicas ( $hd$ ) se ajustarán a un valor menor o igual que el de la MAOP.

Como ejemplo, proponemos una estación de bombeo en un segundo punto alto antes de llegar al punto donde se encuentra la máxima altura del perfil (2196 m). En la figura 4.6 podemos observar la disposición de los dos gradientes hidráulicos resultantes.

Como se observa en la figura 4.6, las alturas dinámicas, todavía rebasan los rangos de seguridad; y es necesario proponer otros sitios de bombeo. Si se propusieran dos puntos de bombeo, las alturas dinámicas, de nuevo sobrepasarían los límites de seguridad indicados por la MAOP; debido a que en el kilómetro 316.7 tenemos un lugar demasiado alto que hay que vencer (2196 m de ASNM) y para obtener una altura dinámica que se ajuste a las condiciones de seguridad dadas y proporcione la suficiente energía para entregar el hidrocarburo, es necesario proponer un punto de bombeo antes del punto máximo de elevación (2196 m) ver figura 4.7.

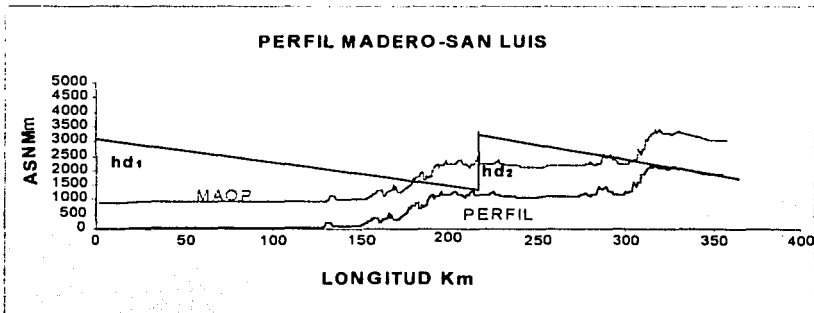
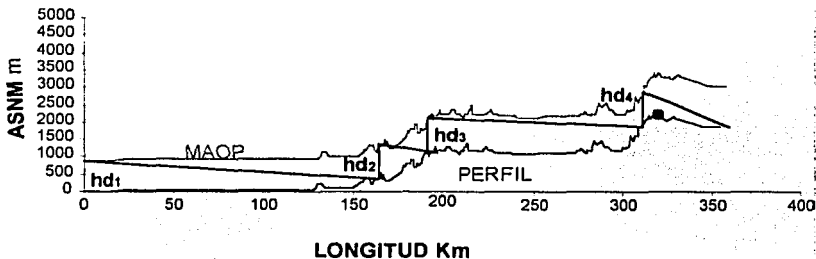


figura 4.6 En la grafica se muestra como las alturas dinámicas ( $hd$ ) de las líneas de energía aun se encuentra por encima del rango de seguridad que determina la MAOP.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con la propuesta anterior (figura 4.7), es necesario situar dos lugares de bombeo antes del que se encargara de bombear en el lugar más alto (hd4), con este planteamiento el número adecuado de rebombes será de tres, si se considerara un cuarto bombeo este puede o ser innecesario debido a que la disposición de las tres estaciones de bombeo proporcionan la energía necesaria para conducir los hidrocarburos líquidos (gasolina y diesel) y cumplen con los límites de seguridad delimitados por la MAOP. Además, una estación de bombeo extra generara un consumo mayor de potencia eléctrica.

### PERFIL MADERO-SAN LUIS



● El punto más elevado se localiza a 2196 m de ASNM en el kilómetro 316.7

figura 4.7 En esta figura se puede apreciar la colocación de un bombeo (hd4) antes del punto más alto del trayecto de la línea de conducción, así como dos estaciones de bombeo dispuestas antes del punto hd4, esto con el propósito de contar con la suficiente energía para conducir la gasolina y el diesel y respetar los límites de seguridad establecidos.

#### 4.6.2.1 Cálculo de las Alturas Dinámicas para los Gradientes.

Para calcular la altura dinámica (hd), primero, es necesario obtener: El número de Reynolds (Re), el factor de fricción (f) y las pérdidas por fricción hf.

Con :

$$Q = 50800 \text{ BD} = 2116.66 \text{ BH}$$

$$D = 12.75 \text{ in.}$$

$$T = 0.25 \text{ in.}$$

Para gasolina:

De la fórmula. 2.21

$$\text{Tenemos } Re = \frac{2,214Q}{dv} = \frac{2,214 * 2116.666}{12.25 * 0.86} = 444831.514 \quad 4.9$$

Con la fórmula 2.45 Obtenemos:

TESIS CON  
FALLA DE CALIDAD

$$f = \left( \frac{1}{1.14 - 2 \log \left[ \frac{\epsilon}{d} + \frac{21.25}{\text{Re}^{0.9}} \right]} \right)^2 = \left( \frac{1}{1.14 - 2 \log \left[ \frac{0.0018}{12.25} + \frac{21.25}{(444831.1637)^{0.9}} \right]} \right)^2 = 0.0151538$$

4.10

Para obtener las pérdidas por fricción utilizamos 2.42:

$$hf = \frac{2.6458 \times 10^{-3} f Q^2 G.E.}{d^5} = \frac{2.6458 \times 10^{-3} (0.0151538) (50800)^2 0.74}{(12.25)^5} = 0.27756 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \text{ Km.}$$

4.11

11 Altura dinámica la obtenemos por 2.47:

$$hd = G.E. \left( \frac{H_2 - H_1}{10} \right) + hf(l_2 - l_1) + P_b$$

$$hd_1 = 0.74 \left( \frac{300 - 7}{10} \right) + 0.27756(154 - 0) + 6.0 = 70.42624 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 704.2624 \text{ m.} \quad 4.12$$

$$hd_2 = 0.74 \left( \frac{1025 - 300}{10} \right) + 0.27756(189 - 154) + 6.0 = 69.3646 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 693.646 \text{ m} \quad 4.13$$

$$hd_3 = 0.74 \left( \frac{1500 - 1025}{10} \right) + 0.27756(304 - 189) + 6.0 = 73.0694 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 730.694 \text{ m} \quad 4.14$$

$$hd_4 = 0.74 \left( \frac{2100 - 1500}{10} \right) + 0.27756(355 - 304) + 6.0 = 64.555 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 645.55 \text{ m} \quad 4.15$$

Para Diesel:

De 2.21:

$$\text{Re} = \frac{2,2142(116.666)}{12.25 * 3.0} = 127517.97 \quad 4.16$$

De 2.45:

$$f = \left( \frac{1}{1.14 - 2 \log \left[ \frac{0.0018}{12.25} + \frac{21.25}{(127517.97)^{0.9}} \right]} \right)^2 = 0.0171089 \quad 4.17$$

<sup>11</sup> El valor de  $P_b$  (back pressure) se toma dentro de un rango de 4 a 8  $\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$  y es la presión de llegada a la siguiente estación ya sea de bombeo o de almacenamiento, y es la presión requerida para que en el punto de llegada de ese tramo se opere adecuadamente (proporcione la energía necesaria) tanto en el rebombeo como en el almacenamiento. 4 es valor en el cual se tiene poco margen de seguridad y si hay una caída de presión nos da poco tiempo para actuar y el valor de 8 es una presión muy grande. Tomamos un valor de 6 con el objetivo de dar un margen holgado de seguridad por si se presenta una falla en el sistema y así se da un tiempo adecuado para actuar.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN



con 2.42 se obtiene:

$$hf = \frac{2.6458 \times 10^{-3} (0.0171089)(50800)^2 0.74}{(12.25)^5} = 0.364188 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \text{ Km.} \quad 4.18$$

Para obtener las alturas dinámicas para cada gradiente, se usa :2.47

$$hd_1 = 0.86 \left( \frac{300 - 7}{10} \right) + 0.3641(154 - 0) + 6.0 = 87.283 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 872.83 \text{ m} \quad 4.19$$

$$hd_2 = 0.86 \left( \frac{1025 - 300}{10} \right) + 0.364188(189 - 154) + 6.0 = 81.0966 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 810.966 \text{ m} \quad 4.20$$

$$hd_3 = 0.86 \left( \frac{1500 - 1025}{10} \right) + 0.364188(304 - 189) + 6.0 = 88.73162 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 887.3162 \text{ m} \quad 4.21$$

$$hd_4 = 0.86 \left( \frac{2100 - 1500}{10} \right) + 0.364188(355 - 304) + 6.0 = 75.3136 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 753.136 \text{ m} \quad 4.22$$

De acuerdo con los datos obtenidos de las ecuaciones anteriores, las alturas dinámicas se representan en la figura 4.8.

Como se observa en la figura 4.8, las alturas dinámicas se ajustan a los parámetros permitidos por la MAOP, y proporcionan la energía suficiente para impulsar el combustible hasta su destino(SLP).

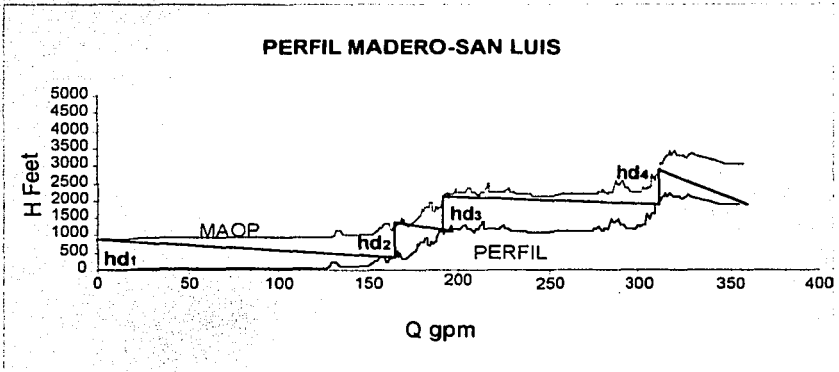


figura 4.8 En el perfil, donde el líquido conducido es gasolina, se representan las alturas dinámicas h1, h2, h3, h4 ; que son los puntos donde se localizarán las estaciones de bombeo.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

continuación, se presenta una tabla (figura 4.9) con los valores obtenidos para los tres diferentes diámetros (12", 14", 16"), y combustibles. Los resultados capturados en la presente tabla provienen de un desarrollo matemático parecido al ejemplo desglosado del ducto de 12" desarrollado anteriormente

Tabla de Resultados de los Gradientes para Diferentes Diámetros											
Diámetro	Q	Combustible	G Esp.	Viscos.	Espesor	No. Reynolds	F. de fricción	P por fricción	Altura Dinámica	MAOP	
	MBD			cStock	[ <sup>o</sup> ]	Re	f	hf [Kg/Cm <sup>2</sup> /Km]	hd [m]	[m]	
D 12"	50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.25000	444831.16370	0.01515	0.27756	704.26240	859.736	
	50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.25000	444831.16370	0.01515	0.27756	693.64600	859.736	
	50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.25000	444831.16370	0.01515	0.27756	730.69400	859.736	
	50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.25000	444831.16370	0.01515	0.27756	645.55000	859.736	
	50.80	Diesel	0.86000	3.00000	0.25000	127517.97000	0.01711	0.36419	872.63000	859.736	
	50.80	Diesel	0.86000	3.00000	0.25000	127517.97000	0.01711	0.36419	810.96600	859.736	
	50.80	Diesel	0.86000	3.00000	0.25000	127517.97000	0.01711	0.36419	887.31620	859.736	
	50.80	Diesel	0.86000	3.00000	0.25000	127517.97000	0.01711	0.36419	753.13600	859.736	
	D 14"	50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.28100	404902.79000	0.01518	0.17502	706.20000	880.0626
		50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.28100	404902.79000	0.01518	0.17502	614.10000	880.0626
50.80		Gasolina	0.74000	0.86000	0.28100	404902.79000	0.01518	0.17502	648.00000	880.0626	
50.80		Gasolina	0.74000	0.86000	0.28100	404902.79000	0.01518	0.17502	515.57600	880.0626	
50.80		Diesel	0.86000	3.00000	0.28100	116244.94000	0.01751	0.23467	882.60000	880.0626	
50.80		Diesel	0.86000	3.00000	0.28100	116244.94000	0.01751	0.23467	712.64000	880.0626	
50.80		Diesel	0.86000	3.00000	0.28100	116244.94000	0.01751	0.23467	779.00000	880.0626	
50.80		Diesel	0.86000	3.00000	0.28100	116244.94000	0.01751	0.23467	605.00000	880.0626	
D 16"		50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.28100	352972.17000	0.01526	0.08790	683.00000	770.054
		50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.28100	352972.17000	0.01526	0.08790	617.00000	770.054
	50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.28100	352972.17000	0.01526	0.08790	403.36400	770.054	
	50.80	Gasolina	0.74000	0.86000	0.28100	352972.17000	0.01526	0.08790	471.31300	770.054	
	50.80	Diesel	0.86000	3.00000	0.28100	101185.35484	0.01814	0.12144	818.11800	770.054	
	50.80	Diesel	0.86000	3.00000	0.28100	101185.35484	0.01814	0.12144	714.32000	770.054	
	50.80	Diesel	0.86000	3.00000	0.28100	101185.35484	0.01814	0.12144	477.60000	770.054	
	50.80	Diesel	0.86000	3.00000	0.28100	101185.35484	0.01814	0.12144	547.07700	770.054	

Figura 4.9 Representación tabulada de los diferentes parámetros calculados de los gradientes hidráulicos para cada diámetro.

## 4.7 Curva del Sistema.

Consiste, en graficar<sup>12</sup> el comportamiento de la altura dinámica con respecto a la variación del gasto (Q).

Esta grafica es muy importante, debido a que con ayuda de esta, seleccionaremos la bomba más adecuada que nos proporciona la energía y el rendimiento necesarios para impulsar los hidrocarburos.

En la figura 4.10 se muestra un ejemplo de la curva del sistema, esto con el propósito de ilustrar y dar a conocer como es su forma y así poder identificarla.

<sup>12</sup> Nos indica que altura dinámica se va necesitando para poder impulsar el líquido a una altura determinada, conforme aumenta o varia el gasto de este.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

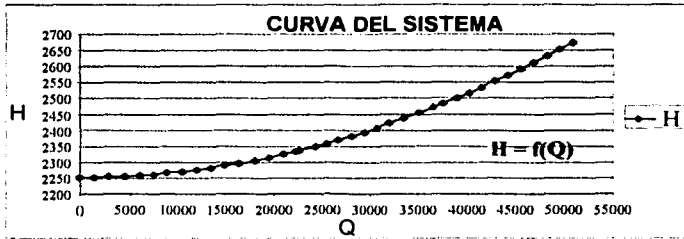


Figura 4.10 Ejemplo de curva del sistema. Como se observa, los valores de la altura dinámica dependen directamente del caudal.

### Obtención de la Altura Dinámica (H).

Para obtener los valores de H (figura 4.10) es necesario despejar 2.47 en términos de Q, para realizarlo, es necesario sustituir la ecuación 2.42 en la fórmula 2.47.

$$hd = G.E. \left( \frac{H_2 - H_1}{10} \right) + hf(l_2, l_1) + Pb \quad 2.47$$

$$hf = \frac{2.6458 \times 10^{-3} f Q^2 G.E.}{d^5} \quad 2.42$$

Sustituyendo hf 2.42 en 2.47 tenemos:

$$hd = G.E. \left( \frac{H_2 - H_1}{10} \right) + \left[ \frac{2.6458 \times 10^{-3} f Q^2 G.E.}{d^5} \right] (l_2, l_1) + Pb \quad 4.23$$

hd = H (Altura dinámica localizada en el eje de las abscisas en la curva del sistema).

$$(H_2 - H_1) = K_1 \quad 4.24$$

Aquí la primera y la segunda parte de la ecuación 4.23, se multiplica por 10/G.E., ya que es para convertirlas de  $\frac{kg}{cm^2}$  a m de columna de líquido, y esta conversión se realiza de esta forma, debido a que depende del tipo de líquido a manejar y la tercera sección se cambia por medio de la conversión  $1 \frac{kg}{cm^2} = 10$  m de columna de líquido, ya que este rango de succión deberá oscilar entre 4 y 6  $\frac{kg}{cm^2}$ , o lo que es lo mismo 40 o 60 m de columna de líquido.

$$\left[ \frac{2.6458 \times 10^{-2} f}{d^5} \right] (l_2 - l_1) + Pb = K_2 \quad 4.25$$

De las ecuaciones 4.24 y 4.25 obtenemos la ecuación 4.26 para la altura dinámica, que nos servirá para graficar la curva del sistema:

$$H = K_1 + K_2 Q^2 \text{ m} \quad 4.26$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 4.7.1 Ejemplo Para el Poliducto de 12".

Con las formulas anteriores, se dispusieron en las celdas del programa Microsoft-Excel, se capturaron los valores que solicitan las formulas y se fue aumentando conforme al gasto requerido, los resultados se pueden ver en la tabla de la figura 4.11 y la curva del sistema se aprecia en la figura 4.12.

Resultados para la Curva del Sistema del Ducto con Diámetro de 12"								
Q <sup>2</sup> (Barriles) <sup>2</sup>	gasolina		TOTALES					
	Q (Barril)	H (m)	H2-H1(m)	Cta.	Fp	d5 (in) <sup>2</sup>	Km	Pb
492240000	22200	2407.291839	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
510760000	22600	2416.538064	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
590490000	24300	2457.676544	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
650250000	25500	2488.511054	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
712890000	26700	2520.831566	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
784000000	28000	2557.522363	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
864360000	29400	2598.985905	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
942490000	30700	2639.298829	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1030410000	32100	2684.663123	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1122250000	33500	2732.050028	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1232010000	35100	2788.883159	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1339560000	36600	2844.175981	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1412256400	37580	2881.685327	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1513210000	38900	2933.774596	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1616040000	40200	2986.83204	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1726402500	41550	3043.776045	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1840410000	42900	3102.600768	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
1953640000	44200	3161.024323	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
2070250000	45500	3221.191865	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
2199610000	46900	3287.938055	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
2323240000	48200	3351.727723	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
2450250000	49500	3417.261378	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60
2580640000	50800	3484.539019	2093	0.02646	0.0152	275854.735	355	60

figura 4.11 En la tabla se registran los datos obtenidos de la ecuaciones para obtener la curva del sistema.

CURVAS TOT 12

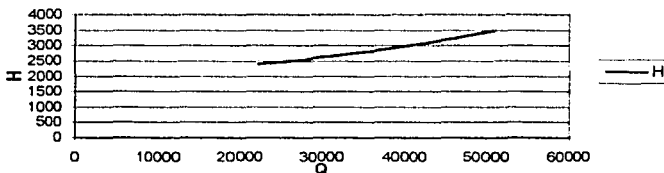


figura 4.12 Grafica de la curva del sistema para el poliducto de 12

### 4.7.2 Determinación de las Curvas del Sistema para el Proyecto.

En este inciso, se calculan y proponen las curvas del sistema que para este proyecto es una por cada gradiente hidráulico o estación de bombeo (4 sistemas).

Es necesario resolver que diámetro se debe utilizar en la línea de conducción, puesto que es un parámetro indispensable en la determinación de las curvas de los sistemas, además con estos gráficos nos apoyaremos más adelante en la selección de las bombas que proporcionaran la potencia requerida para impulsar la gasolina y el diesel.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

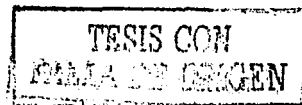
Se decidió proponer para el proyecto, un tubo de 14" de diámetro; esto debido a que un tubo de 12" quedaría muy ajustado para el caudal a manejar y si en un futuro se deseara incrementar el gasto, este no tendría la capacidad para conducirlos. Y un tubo de 16", aunque se tendría más holgura en capacidad para los gastos a conducir en un futuro, los costos de construcción de la línea se incrementarían considerablemente, debido a que el precio del tubo aumenta linealmente con respecto al diámetro<sup>13</sup> del tubo.

A continuación se presentan los resultados de las curvas del sistema para las cuatro estaciones de bombeo con tubos de 14" diámetro, y cuyos datos fueron obtenidos por el mismo método del los incisos 4.5 y 4.5.1.

Resultados de la Curva del Primer Sistema del Poliducto Madero- S. L. P.									
$Q^2$ (Gpm)	Q (Gpm)	H (feet)	H2-H1 (m)	Cte.	Fp	dS (in)	Km	Pb (m)	
0	0	1781.496	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1914.79174	43.7583	1782.612	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
7659.16694	87.5167	1785.961	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
17233.1256	131.275	1791.543	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
30636.6676	175.033	1799.357	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
47669.7934	218.792	1809.403	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
68932.5025	262.55	1821.683	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
93824.7951	306.308	1836.194	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
122546.671	350.067	1852.939	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
155096.131	393.825	1871.916	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
191479.174	437.583	1893.125	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
231689.0	481.342	1916.568	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
275730.01	525.1	1942.242	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
323599.803	568.858	1970.150	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
375299.18	612.617	2000.293	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
419415.982	647.623	2028.009	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
434666.234	659.292	2034.900	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
502517.943	708.885	2074.458	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
553374.812	743.892	2104.108	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
606682.614	778.898	2135.183	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
667198.543	816.822	2170.462	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
735586.393	857.663	2210.331	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
802076.473	895.587	2249.094	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
876898.023	936.428	2292.714	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
955055.567	977.269	2338.279	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1048463.36	1023.95	2392.734	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1139990.41	1067.7	2448.093	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1201856.39	1096.29	2482.160	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1287769.78	1134.8	2532.248	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1375280.02	1172.72	2583.263	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1469200.55	1212.11	2636.017	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1566223.05	1251.49	2694.580	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1662583.86	1289.41	2750.757	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1761821.15	1327.34	2808.610	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1871908.91	1366.18	2872.790	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
1977120.33	1406.1	2934.126	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
2085208.2	1444.83	2997.140	483	0.026456	0.015	438201	165	60	
2196172.51	1481.95	3061.830	483	0.026456	0.015	438201	165	60	

Figura 4.13 Tabla de resultados de la curva del sistema para el trayecto O a 165Km

<sup>13</sup> Inciso 1.6.2



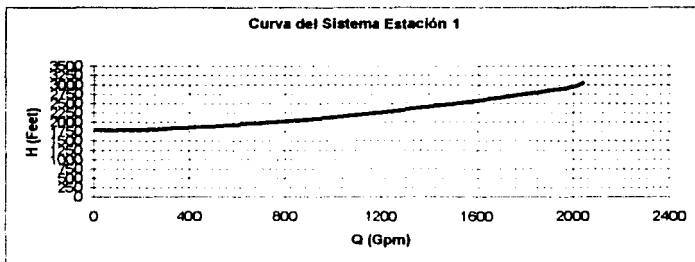


figura 4.14 Curva del sistema para el trayecto de 0 a 165 Km

**Resultados de la Curva del segundo Sistema del Poliducto Madero-S. L. P.**

Q (Gpm)	Q (Gpm)	H (feet)	H2-H1 (m)	Cte	Fp	d5 (in)	Km	Pb (m)
0	0	2444.225722	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1914.79174	43.75833333	2444.408368	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
7659.16694	87.51666667	2444.956387	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
17233.1256	131.275	2445.569718	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
30636.6678	175.0333333	2447.148382	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
47869.7934	218.7916667	2448.792378	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
68932.5025	262.55	2450.801707	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
93824.7951	306.3063333	2453.176368	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
122546.671	350.0666667	2455.916362	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
155098.131	393.825	2459.021688	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
191479.174	437.5833333	2462.492347	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
231689.9	481.3416667	2466.328338	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
275730.01	525.1	2470.529662	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
323599.803	568.8583333	2475.096318	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
375299.18	612.6166667	2480.028306	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
419415.982	647.6233333	2484.236937	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
434666.234	659.2922222	2485.691772	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
502517.943	708.885	2492.184652	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
553374.812	743.8916667	2497.018268	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
606682.614	778.8963333	2502.101696	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
667198.543	816.8222222	2507.874761	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
735586.393	857.6633333	2514.398788	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
802078.473	896.5872222	2520.741772	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
876898.023	936.4263333	2527.879557	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
955055.587	977.2694444	2535.335387	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1048463.36	1023.945	2544.246453	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1139990.41	1067.703333	2552.977899	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1201856.39	1096.292111	2558.879757	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1287789.78	1134.798444	2567.075674	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1375280.02	1172.723333	2575.423928	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1469200.55	1212.105833	2584.383707	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1568223.05	1251.488333	2593.639406	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1662583.88	1289.412222	2602.831984	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1761821.15	1327.336111	2612.298966	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1871908.91	1366.177222	2622.801058	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
1977120.33	1406.101111	2632.837958	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
2085208.2	1444.025	2643.149266	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60
2196172.51	1481.948889	2653.734978	483	0.026458	0.015179	438200	8178	27.60

figura 4.15 Tabla de resultados de la curva del sistema para el trayecto 165 a 192Km

FALLA DE ORIGEN

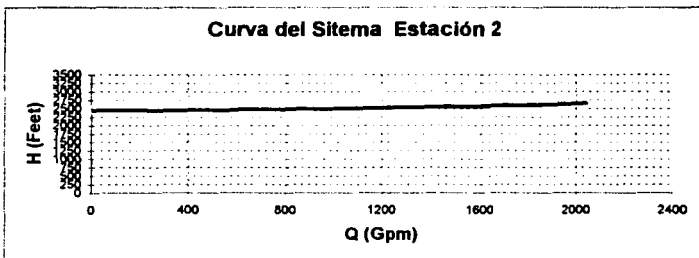
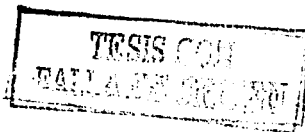


figura 4.16 Curva del sistema para el trayecto de 165 a 192 Km

**Resultados de la curva del Tercer Sistema del Poliducto Madero-S. L. P.**

Q (Gpm)	Q (Gpm)	H (feet)	H2-H1 (m)	Cte.	Fp	D5 (in)	Km	Pb (m)
0	0	1919.291339	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1914.79174	43.75833333	1920.062598	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
7659.16694	87.51666667	1922.376369	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
17233.1256	131.275	1926.232856	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
30636.6876	175.0333333	1931.631458	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
47869.7934	218.7916667	1938.572778	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
68932.5075	262.55	1947.056608	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
93824.7951	306.3083333	1957.082958	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
122548.8711	350.0666667	1968.651818	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
155098.131	393.825	1981.783195	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
191478.174	437.5833333	1996.417088	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
231669.8	481.3416667	2012.613495	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
275730.01	525.1	2030.352418	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
323599.803	568.8583333	2049.833855	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
375299.18	612.6166667	2070.457807	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
419415.982	647.8233333	2088.22758	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
434666.234	659.2922222	2094.370217	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
502517.943	708.885	2121.700155	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
553374.812	743.8916667	2143.184754	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
606582.614	778.8983333	2163.856563	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
667198.543	816.8222222	2188.031727	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
735586.393	857.8633333	2215.577617	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
802076.473	896.5872222	2242.359105	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
876898.023	936.4283333	2272.49642	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
955055.587	977.2694444	2303.977437	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1048463.26	1023.945	2341.601091	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1139990.41	1067.703333	2378.467199	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1201856.39	1096.292111	2403.386152	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1287769.78	1134.798444	2437.991139	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1375280.02	1172.723333	2479.23932	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1465920.55	1212.105833	2511.0698	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1566223.05	1251.488333	2550.149117	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1662583.88	1289.412222	2588.962222	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1761821.15	1327.336111	2628.933927	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1871908.91	1366.177222	2673.276091	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
1977120.33	1406.101111	2715.65412	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
2085208.2	1444.025	2759.190748	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60
2196172.51	1481.948889	2803.885977	529	0.026458	0.015179	438200.8178	114	60

figura 4.17 Tabla de resultados de la curva del sistema para el trayecto 192 a 306 Km



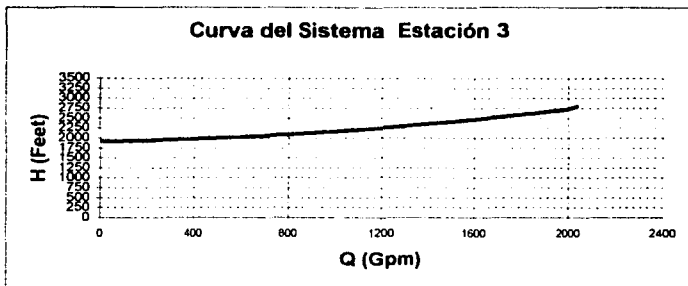
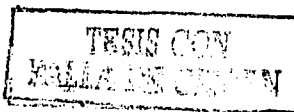


figura 4.18 Curva del sistema para el trayecto de 192 a 306 Km

**Resultados de la Curva del Cuarto Sistema del Poliducto Madero-S. L. P.**

Q (Gpm)	Q (Gpm)	H (feet)	H2-H1	Cte.	Fp	d5	Km	Pb (m)
1914.79174	43.75833333	1837.801847	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
7659.16684	87.51666667	1838.536383	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
17233.12568	131.275	1840.25388	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
30636.6678	175.0333333	1842.574428	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
47869.7934	218.7916667	1845.557977	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
68932.5025	262.55	1849.204536	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
93824.7951	306.3083333	1853.514106	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
122546.671	350.0666667	1858.486688	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
155098.131	393.825	1864.12228	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
191479.174	437.5833333	1870.420883	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
231689.8	481.3416667	1877.382496	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
275750.01	525.1	1885.007121	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
323599.803	568.8583333	1893.294156	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
375739.18	612.6166667	1902.245402	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
419415.982	647.6233333	1909.883287	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
434666.234	659.2922222	1912.523543	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
502517.943	708.885	1924.270622	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
553374.812	743.8916667	1933.075408	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
606682.614	778.8983333	1942.304518	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
667198.543	816.8222222	1952.781561	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
735586.393	857.6633333	1964.621481	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
802076.473	895.5872222	1976.132802	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
876898.023	936.4283333	1989.08656	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
950565.567	977.2699444	2002.617875	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1048463.36	1023.944	2018.789445	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1139990.41	1067.703333	2034.635424	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1201856.38	1096.292111	2045.348182	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1287789.78	1134.799444	2060.220255	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1375820.02	1172.723333	2075.370789	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1469200.55	1212.105833	2091.63113	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1566223.05	1251.468333	2108.428506	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1667583.88	1289.412222	2125.11335	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1761821.15	1327.338111	2142.292158	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1871908.91	1368.177222	2161.351507	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
1977120.33	1406.101111	2179.566624	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
2085208.2	1444.025	2198.279738	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60
2196172.51	1481.948889	2217.490644	500	0.02646	0.015179	438200.8178	49	60

figura 4.19 Tabla de resultados de la curva del sistema para el trayecto 306 a 365 Km





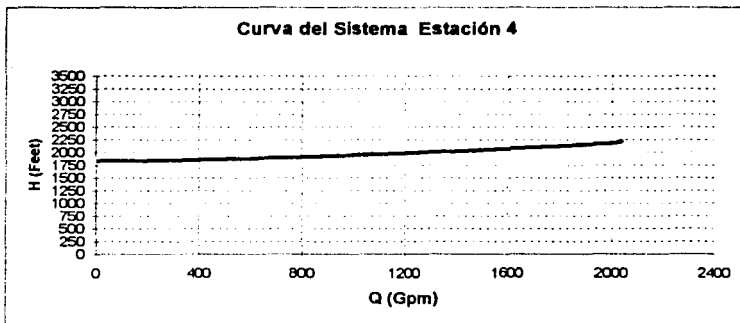


figura 4.20 Curva del sistema para el trayecto de 306 a 355 Km

#### 4.8 Selección de la Bomba.

Una vez obtenida la curva del sistema<sup>14</sup> para cada estación de bombeo. El siguiente paso, es contactar a los fabricantes de bombas, para solicitarles<sup>15</sup> las curvas características de sus bombas que puedan satisfacer las necesidades de presión (H) y gasto (Q) de nuestra línea de conducción.

Para obtener las curvas características de las bombas que satisfagan los rangos de nuestras necesidades de conducción, es necesario seleccionarlas de una familia de bombas, para ello debemos utilizar las graficas llamadas familia de curvas (en el anexo A4-1 se explica como se seleccionaran las posibles curvas características de una familia de bombas).

Del catalogo de bombas de Byron Jackson obtuvimos las curvas de la bomba que satisface nuestros requisitos de presión y caudal. La bomba que se seleccionó pertenece a las del tipo<sup>16</sup> 4x6x10C DVMX que es capaz de proporcionar la suficiente energía para impulsar los 50800 BPD o bien 1481.9 gpm de Diesel o Gasolina.

En la figura 4.21 se muestra la grafica de la bomba Byron Jackson 4x6x10C que se opto para nuestra propuesta. Se puede observar que a mayor número de pasos, la presión que puede entregar es superior, pero también el costo de la bomba se incrementa considerablemente conforme aumentan los pasos. Por eso es necesario elegir una bomba con un número de pasos conveniente, que nos pueda en un futuro proporcionar una mayor presión en caso de que se requiriera (esto evitaría en el mañana agregar otra bomba al sistema si se requiriera más presión, y por consiguiente se prescindiría de realizar un gasto futuro que pudiera poner en aprietos a la administración de la empresa).

<sup>14</sup> En la cual tenemos representado gráficamente nuestras necesidades de presión y caudal a conducir.

<sup>15</sup> En la actualidad algunos fabricantes de bombas, dentro de su servicio de soporte técnico al cliente, este último le proporciona los datos de presión(H) y gasto(Q) que requiere, y ellos nos pueden indicar la bomba apropiada que satisfaga nuestras necesidades de caudal y presión con el mejor rendimiento. Sin la necesidad de que nosotros las seleccionemos de sus curvas características.

<sup>16</sup> 4x6x10 De izquierda a derecha; el primer número (4) indica el diámetro en la descarga de la bomba, el segundo número (6) indica el diámetro de la succión de la bomba y el tercer número (10) indica el diámetro del impulsor.

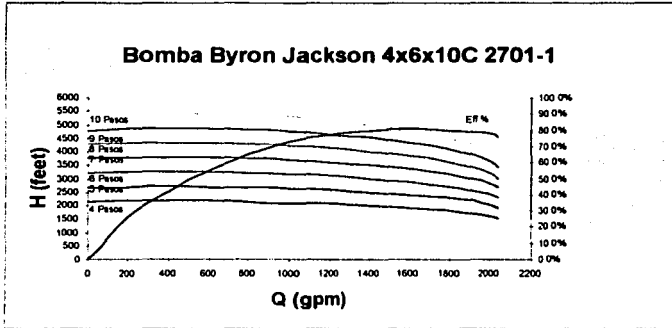


figura 4.21 Curvas características de la bomba seleccionada: 10 pasos 4x6x10C DVMX.

Los datos con que se grafico la curva de la bomba 4x6x10C DVMX de la figura 4.21 los podemos ver en la figura 4.22.

Datos de la Curva 4x6x10C de Bomba Byron Jackson.										
Q (gpm)	Eff %	H Feet	H Feet	H Feet	H Feet	H Feet	H Feet	H Feet	H Feet	H Feet
		1 Paso	2 Pasos	3 Pasos	4 Pasos	5 Pasos	6 Pasos	7 Pasos	8 Pasos	9 Pasos
0	0.0%	1781.4961	2150	2690	3200	3750	4300	4800	5350	5350
200	26.0%	1805.0890	2200	2710	3250	3800	4330	4890	5400	5400
400	42.0%	1860.2531	2200	2710	3280	3800	4350	4900	5410	5410
600	55.0%	1933.5931	2200	2700	3250	3800	4330	4890	5400	5400
800	65.0%	2025.1087	2150	2700	3200	3750	4300	4840	5350	5350
1000	73.0%	2134.8002	2120	2650	3180	3700	4250	4760	5300	5300
1200	77.0%	2262.6673	2100	2600	3100	3600	4150	4650	5150	5150
1400	80.0%	2408.7103	2020	2500	3000	3500	4000	4520	5000	5000
1600	81.0%	2572.9290	1920	2400	2900	3390	3850	4350	4800	4800
1800	80.0%	2755.3234	1800	2290	2700	3150	3600	4100	4500	4500
2000	78.0%	2955.8936	1600	2050	2450	2850	3200	3650	4000	4000
2040	76.0%	3048.9857	1500	1900	2300	2700	3000	3400	3800	3800

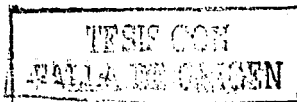
figura: 4.22 Datos de la curva 4x6x10 DVMX.

Una vez conocida la bomba y su capacidad para satisfacer las necesidades de conducción; el siguiente punto es determinar el número de pasos de está, esto con el propósito de definir un tipo concreto de bomba que operara en nuestro sistema (Puesto que dentro de este tipo de bomba seleccionada existen diez modelos dependiendo de sus números de pasos).

Para definir el número de pasos de la bomba seleccionada; lo único que tenemos que hacer es colocarle sobrepuesta o empalmal sobre la curva de la bomba la grafica de la curva del sistema<sup>17</sup> (figura 4.23) que se cálculo anteriormente para una distancia del ducto ya definida.

En la figura 4.23, en el eje de las ordenadas, localizamos el punto donde se muestra el caudal a impulsar ( $Q=1481.9$  gpm), a partir de este punto, trazamos una línea recta paralela a las abscisas (H), prolongamos esta recta para alcanzar y cruzar la curva del sistema hasta que toque una línea de pasos de la curva de la bomba que se sitúe por arriba de la curva del sistema (en nuestro ejemplo se cruza con la de 5 pasos), esta curva nos indica la bomba con los pasos adecuados

<sup>17</sup> 4.5.2 Determinación de las curvas del sistema para el proyecto.



para impulsar los líquidos que manejaremos. Si esta curva queda muy ajustada, es decir que el punto de intersección está muy cerca de la curva del sistema no dará oportunidad a tener un margen para proporcionar una mayor presión en caso de que se requiera. Entonces prolongamos la recta (1) hasta que toque con la siguiente línea de pasos de la curva de la bomba (6 pasos) y esto nos indica que tendremos una bomba que nos puede entregar más presión en caso de requerirla.

Después de haber determinado el número de pasos de la bomba, es importante conocer su eficiencia, y para poder obtenerla lo que tenemos que hacer es: trazar una línea (2) recta paralela al eje de las ordenadas, tomando como lugar de inicio para nuestro trazo el punto donde se interceptaron la línea de pasos de la bomba y la línea (1) que se prolongo del punto que indica el gasto a conducir (ósea el punto donde se selecciono el número de pasos de la bomba). Ya localizado el punto de inicio solo tenemos que prolongar la recta hacia la derecha donde se localizan los valores de la eficiencia en porcentaje, el valor correspondiente de eficiencia para la bomba de 6 pasos impulsando un gasto de 1481.9 gpm es de 85% según se indica en la grafica de la figura 4.23. Para conocer el número de revoluciones por minuto a que se desempeñara la bomba, solo tenemos que observar los recuadros de datos que trae ilustrados la gráfica de la curva de la bomba proporcionada por el proveedor; para nuestra bomba 4x6x10C 2701-1 de seis pasos, el número de revoluciones será de 3550 RPM

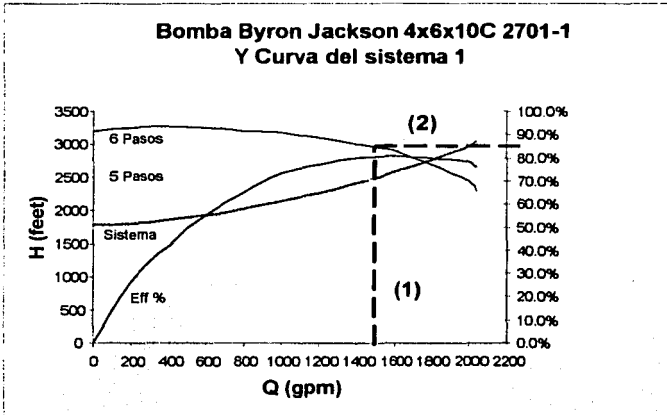


figura. 4.23 curva de la bomba empalmada con la curva del sistema 1.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

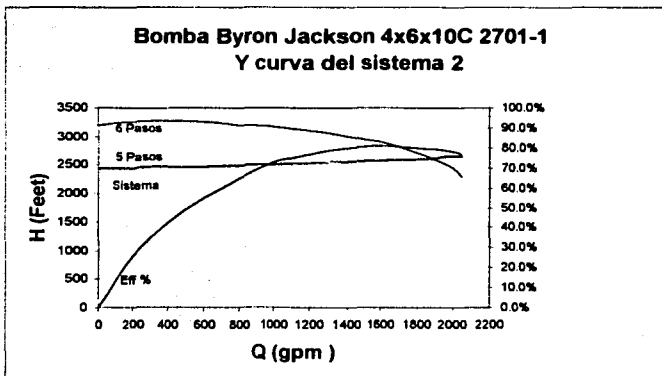


figura:4.24 Curva de la bomba empalmada con la curva del sistema 2.

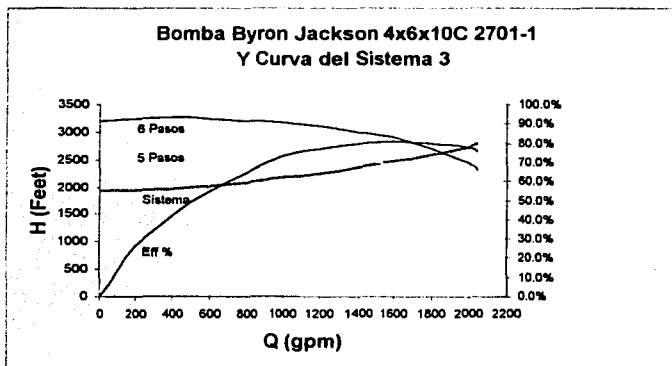


figura:4.25curva de la bomba empalmada con la curva del sistema 3.

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

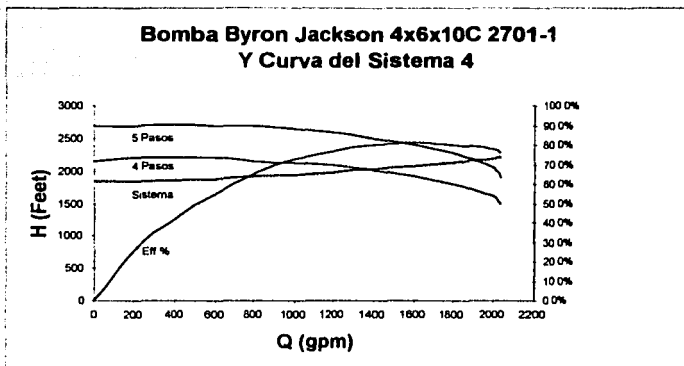


figura:4.26 curva de la bomba empalmada con la curva del sistema 4.

El planteamiento con que se determino el número de pasos y eficiencia de la bomba para la primera estación de bombeo, se utiliza de la misma forma con las tres estaciones de bombeo restantes, y apoyándonos en las figuras 4.24, 4.25 y 4.26. se determino que: Para la 1ª estación de rebombeo 2, el tipo de bomba a emplear es del tipo 4x6x10C 2701-1 de seis pasos, una eficiencia de 85% y que operara a 3550 RPM. Para la estación de rebombeo 3, el tipo de bomba a emplear es del tipo 4x6x10C 2701-1 de seis pasos, una eficiencia de 85% y 3550 RPM. Y para la estación de rebombeo 4 el tipo de bomba a emplear es del tipo 4x6x10C 2701-1 de cinco pasos, una eficiencia de 83% trabajando a 3550 RPM. .

#### 4.9 Selección del Motor Eléctrico.

Una vez fijado el tipo de bomba para cada estación de bombeo, necesitamos establecer la capacidad de los motores eléctricos que se acoplaran a las bombas y que transmitirán la suficiente energía mecánica para que las bombas puedan impulsar los líquidos.

Para determinar la potencia de los motores eléctricos utilizaremos la formula del 19caballaje al freno (BHP), esta formula nos proporciona la fuerza necesaria para parar el motor eléctrico cuando este operando. Con este dato conoceremos la potencia requerida del motor para impulsar las bombas.

$$BHP = Cte. \left( \frac{Q(Pd - Ps)}{4} \right) \text{ HP} \quad 4.26$$

Donde:

BHP = Caballaje al freno.

Cte. = 0.0002416.

$Q$  = 50800 BPD.

$Pd$  = Presión de descarga.

$Ps$  = Presión de succión.

<sup>18</sup> A cada estación de rebombeo le corresponde una curva de sistema determina de acuerdo a sus necesidades, por ello también nos referimos a cada estación de rebombeo como: sistema 1, Sistema 2, sistema 3 y sistem 4.

<sup>19</sup> sus siglas en ingles: BHP Breake Horse Power.

Una manera practica y rápida para determinar los BHP de las bombas para cada sistema es auxiliándonos del programa Microsoft Excel, en el cual se capturan los valores requeridos por la formula 4.26 en las celdas de la hoja de cálculo, agrupándolos correspondientemente por columnas y renglones; después auxiliándonos de las herramientas de Excel, se programa la formula 4.26 en la columna de celdas correspondientes (columna de resultados) y el programa ejecuta, dándonos los resultados del caballaje al freno para las bombas de cada sistema. El ejemplo y los resultados para la propuesta del proyecto lo podemos observar en la figura 4.27.

14 GASOLINA	BHP		Q	Pd Kg/cm <sup>2</sup>	Ps Kg/cm <sup>2</sup>
Sistema 1	216.071094	0.0002416	50800	70.62	0.2
Sistema 2	170.015611	0.0002416	50800	61.41	6
Sistema 3	180.417216	0.0002416	50800	64.8	6
Sistema 4	139.841752	0.0002416	50800	51.576	6
14 DIESEL	BHP		Q	Pd Kg/cm <sup>2</sup>	Ps Kg/cm <sup>2</sup>
Sistema 1	264.059619	0.0002416	50800	86.26	0.2
Sistema 2	200.250836	0.0002416	50800	71.264	6
Sistema 3	220.612208	0.0002416	50800	77.9	6
Sistema 4	167.22344	0.0002416	50800	60.5	6

figura 4.27 Valores del BHP para cada estación de bombeo para Gasolina y Diesel.

Con las deducciones expuestas en la figura 4.27, tomamos como resultado definitivo los valores para diesel el cual requiere más potencia para impulsarse que la Gasolina.

La propuesta de los motores eléctricos para el proyecto será, para el sistema 1, 2, 3 y 4 un motor de 264 HP, 200 HP, 220 HP y 167 HP respectivamente. En caso de que los valores calculados no correspondan con los valores comerciales del proveedor, se seleccionará el inmediato superior del valor calculado.

<sup>20</sup> si tomamos como resultado las bombas que impulsaran gasolina, la potencia no será la suficiente para impulsar el Diesel ya que como se puede observar el diesel requiere más energía para ser impulsado.

#### 4.10. Ruta Propuesta Para El Poliducto Madero-San Luis Potosí.

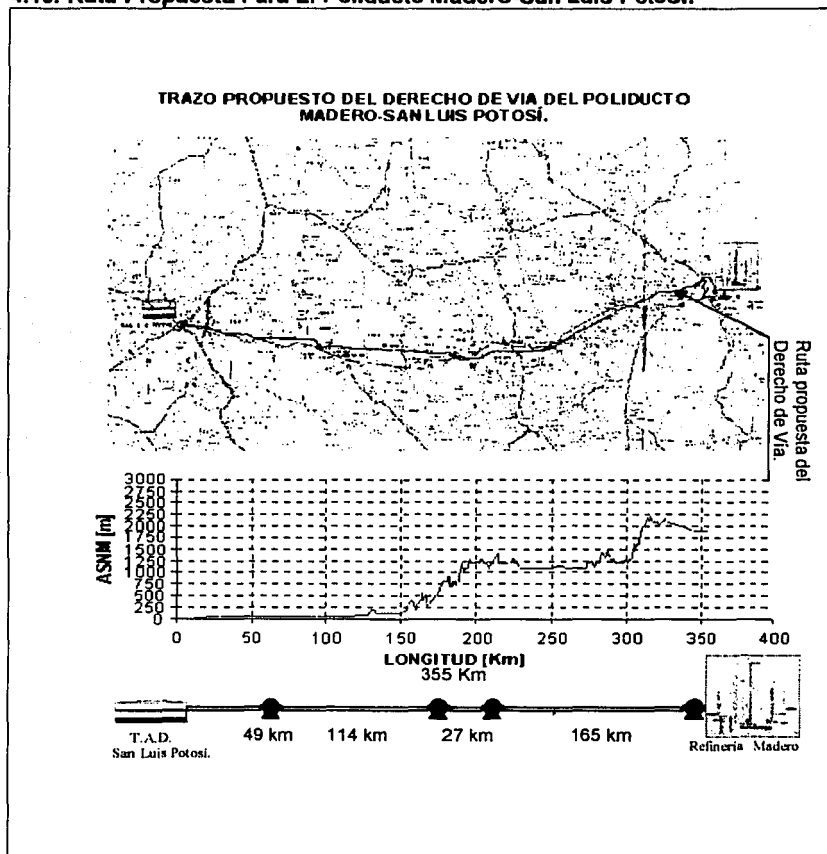


Figura: 4.28 Ruta propuesta, perfil de elevación de terreno y estaciones de bombeo.

En la figura 4.28 podemos observar que la ruta propuesta trata de seguir el derecho de vía de las carreteras federales<sup>21</sup>; y de esta manera facilitar su construcción, evitando negociaciones que aplazarán la construcción del mismo, entendiéndose que los arreglos serían con dueños de predios por donde pasara el Poliducto.

<sup>21</sup> No se especifica más a fondo sobre la ruta a seguir por seguridad de la línea de conducción, debido a que los productos a conducir son productos listos para consumirse y pueden ser objeto de robo en el mismo poliducto.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

#### 4.11 Análisis de Costos de la Línea de Conducción y Transportación por Autotranque.

Para el análisis de los costos por diseño, se tomaron los datos proporcionados por el departamento de operación de PEMEX REFINACION.

Aquí se tomaron en cuenta los análisis de costos por metro lineal de líneas de conducción, considerando 100 km de línea regular, apertura, conformación y conservación de derecho de vía y áreas de almacenamiento, excavación de zanja, con un promedio de 70% tierra y 30% roca, movimiento, almacenamiento y distribución de materiales (válvulas, conexiones, accesorios, anticorrosivos, etc.), acarreo y tendido de tubería, doblado, alineado y soldado de tubería, inspección radiográfica, limpieza, recubrimiento exterior y bajado de tubería, tapado de tubería incluyendo el suministro de material suave para cama y colchón. Obra civil y mecánica de las instalaciones superficiales (una trampa para envío de diablos, válvula de seccionamiento, trampa doble para recibo y envío de diablos, válvula de seccionamiento y trampa para recibo de diablos, todas en especificación 600 ANSI, RTJ para este análisis de costos). Pintura exterior anticorrosiva de las instalaciones superficiales, prueba hidrostática, limpieza interior de la tubería, protección catódica, limpieza final del derecho de vía, ingeniería, materiales, supervisión de construcción y administración de toda la obra.

Cantidades expresadas en pesos por metro de línea.

Este análisis no incluye obras especiales como: cruzamientos de arroyos, pantanos, lagunas, ríos, barrancas, corredores de tubería en operación, vías de ferrocarril, carreteras vecinales, estatales o federales, ni obras de arte, puentes, estructuras o caminos de acceso a las instalaciones superficiales, debido a que éstos costos varían en cantidad y magnitud en cada región y proyecto específico.

Tomando en cuenta esto y que el diámetro de la tubería es de 14" y esta misma tiene un espesor de 0.281", se revisa en las tablas de los costos de líneas de construcción de la Gerencia de Transportación por Ducto, se ve que el costo de esta tubería por metro con grado X-52 es de \$1,699.90 (costo total).

También se nos proporcionaron los costos de los 2 trenes de medición de 6" (uno para la salida y uno para la llegada), con un rango de medición para un flujo de 50.8 MBD, en el cual se mete una turbina de 6" (el diámetro del tubo de los trenes es de 6", y el costo es de \$8,000,000.00 de pesos, contando ya con el costo de la turbina que se le mete a cada uno de ellos).

Los precios por auto tanque para cada uno de los productos son los siguientes:

	Costo por cada 64 toneladas	Costo por cada 58 toneladas
	Diesel	Gasolinas
De Cd. Madero a San Luis Potosí	\$12,411.12	\$12,852.94
De Cd. Madero a Cd. Valles	\$7,245.23	\$7,648.37

Las tarifas incluyen I.V.A. y arrastre. Los costos son dados en pesos.

Los costos de las bombas de las estaciones de bombeo y rebombeo son:

Estación 4.	Estaciones 1, 2 y 3.
Para una bomba de 5 pasos	Para una bomba de 6 pasos
\$1,800,000.00	\$1,800,000.00
Los costos son dados en pesos	Los costos son dados en pesos

El precio proporcionado para las válvulas de compuerta de serie # 600 es de \$146,224.00 (pesos).



Estos costos de la línea de conducción fueron proporcionados gracias a la Gerencia de Transportación por Ducto de la Subdirección de Distribución.

Cálculo de costos

<b>Costos de la línea de conducción.</b>			
<b>Elementos Constitutivos</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Total:</b>
<b>Costo de línea por metro</b>	\$1,699.90	355000 m	\$603,484,500
<b>Válvulas de compuerta<sup>22</sup></b>	\$146,224	2	\$292,448
<b>Trenes de medición<sup>23</sup></b>	\$8,000,000	2	\$16,000,000
<b>Bombas de 6 pasos</b>	\$1,800,000	3	\$5,400,000
<b>Bombas de 5 pasos</b>	\$1,600,000	1	\$1,600,000
		<b>TOTAL:</b>	<b>\$626,756,948</b>

figura 4.29 Monto Total del Poliducto.

### Costos de Transportación por Auto tanque.

El costo de transportación por auto tanque se obtiene de la siguiente forma:

Diesel

Gasolinas

64,000 kg

58,000 kg

$$\text{Densidad} = 840 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad} = 760 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Entonces} = \frac{64000 \text{ kg}}{840 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 76.19 \text{ m}^3$$

$$\text{Entonces} = \frac{58000 \text{ kg}}{760 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 76.31579 \text{ m}^3$$

Pero como  $1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ Lts}$

Entonces = 76190.4762 Lts.

Entonces = 76315.9 Lts.

Aquí se dividen las cantidades de los combustibles en 15,000 BD de Diesel y 35,800 BD de Gasolinas, esto es de acuerdo al consumo y pedido de San Luis Potosí.

Con una cantidad de 15,000 BD de Diesel, esto es:

$$15000\text{BD} / \frac{159 \text{ Lts.}}{1 \text{ B}} = 2,385,000 \text{ lts por día los que se deben mandar, pero cada cargamento lleva}$$

76190.4762 Lts., así que para saber cuantos cargamentos se deben mandar se hace lo siguiente:

$$\frac{2,385,000}{76190.4762} = 31.303125, \text{ este es el número de cargamentos que deben llevar en un solo día,}$$

esto a su vez se multiplica por el costo de cada cargamento:

$$31.303125 (\$12,411.12) = \$388,506.8408, \text{ este costo es por día.}$$

<sup>22</sup> Son dos válvulas debido a que la línea de conducción cruza un lago, y por norma, se dispone una válvula a la entrada y otra a la salida del lago.

<sup>23</sup> Se instalan 2 trenes de medición, puesto que, es necesario registrar en la refinera cuanto combustible se manda y cuanto se recibe en la TAD.

Esto mismo se hace para la Gasolina con 35,800 BD:

$$35800 / \frac{159 \text{ Lts.}}{1 B} = 5,692,200 \text{ lts. por día los que se deben mandar, pero cada cargamento lleva}$$

76315.9 Lts. así que para saber cuantos cargamentos se deben mandar se hace lo siguiente:

$$\frac{5,692,200}{76315.9} = 74.58734, \text{ este es el número de cargamentos que deben llevar en un solo día, esto a}$$

su vez se multiplica por el costo de cada cargamento:

$$74.58734 (\$12,852.94) = \$958,666.6058, \text{ este costo es por día.}$$

Ahora se suman los dos costos (que son por día):

$$\$388,506.8408 + \$958,666.6058 = \$1,347,173.447 \text{ por día, por año se gastara:}$$

$\$1,347,173.447 (365) = \$491,718,308.00$  por año, ahora con la siguiente fórmula se hará el cálculo para ver cuanto es lo que se gasta en el envío de los combustibles por auto tanque durante los 20 años de duración de la línea de conducción.

$$S = C (1+i)^n$$

Donde:

S = Monto.

C = Capital o inversión inicial.

n = Número de años de inversión.

i = Tasa de interés anual por unidad o efectiva por periodo (que puede ser antes de un año).

Entonces: C = \$491,718,308.00, n = 20 años, i = 2% anual:

$$S = \$491,718,308.00 (1+0.02)^{20} = \$730,667,539.3, \text{ este es el costo total de transportación por auto tanque que se gasta durante los 20 años que dura la línea.}$$

Comparando, se ve que el costo de la línea de conducción (\$626,756,948) es mucho menor que el costo de las transportaciones por auto tanque (\$730,667,539.3), por lo que se opta por hacer la línea de conducción, que es el aspecto principal de este proyecto.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## C A P I T U L O 5

### Operación y Mantenimiento.

#### 5.1 Operación de la Línea de Conducción.

En esta etapa se describirá de forma general, la función que desempeñan las líneas de conducción de Hidrocarburos dentro de los sistemas de conducción, transporte y distribución de productos y especialmente en el caso que nos ocupa, que es el de la conducción de productos destilados desde la refinería de Cd. Madero, Tamps hasta la TAD. de San Luis Potosí. Los productos destilados a conducir son diesel y gasolinas (Premiun y Magna), a los cuales se puede adicionar la conducción de algunos otros componentes intermedios.

En lo que cabe destacar al manejo de los hidrocarburos líquidos en este proyecto y en muchos otros, el caudal que se maneja es llevado a través del poliducto por medio de lotes de los distintos productos, esto se refiere a que se manda un primer lote con una cierta cantidad de galones o barriles de un producto a través del ducto e inmediatamente se manda otro lote de un segundo producto y enseguida un tercer lote con un tercer producto y así sucesivamente se repite el ciclo, hasta dejar satisfecha la demanda requerida de cada uno de los tres combustibles solicitados en la TAD de San Luis Potosí.

La operación de la línea es como sigue:

- Primero se procesa el petróleo crudo en la refinería hasta convertirlo en los productos deseados, en nuestro caso diesel y gasolinas.
- Conduciéndose por separado a los tanques de almacenamiento.
- Dichos tanques proporcionan la carga de succión a la bomba por un conducto común separándose los productos mediante un control adecuado de válvulas.
- La bomba descarga al poliducto que conduce los combustibles por lotes (predeterminados) hasta una estación de rebombeo.
- El rebombeo continúa de la misma manera entre estaciones sucesivas hasta alcanzar el destino deseado, en este caso la TAD de S.L.P.
- Al llegar cada uno de los productos, estos son muestreados para identificar el que esta llegando y así finalmente poder almacenarlos por separado.

De acuerdo con lo anterior, entre lote y lote consecutivo se mezcla una cantidad insignificante (comparada con el volumen manejado) de estos combustibles, razón por la cual en la terminal de almacenamiento se distribuye una cierta cantidad de éste producto intermedio a cada uno de ellos.

#### 5.2 Filosofía del Mantenimiento.

El transporte y distribución del crudo, gas y derivados del petróleo, tiene en los ductos su más rentable sistema, implicando una gran responsabilidad en la seguridad y eficiencia de los mismos a lo largo de miles de kilómetros. Lo que hace necesario un conocimiento detallado de las características y las condiciones físicas de los ductos, del equipo periférico, de las propiedades del producto manejado, de los efectos y comportamiento termodinámico o hidráulico del mismo, así como su ubicación entre otros. Para garantizar el perfecto estado de las instalaciones que proporcionen condiciones laborales seguras y una operación eficiente del sistema se requiere de un plan maestro en lo que ha mantenimiento de los mismos se refiere.

Para llevar a cabo lo anterior la responsabilidad recae en todo el personal, ya sea administrativo, técnico, o manual, esté en oficinas o en campo.

Es común en nuestro ambiente considerar las actividades del área encargada del mantenimiento de manera extrema, tomando en cuenta una falta de integración entre ésta, la operación y el diseño del proyecto.

El mantenimiento se hace necesario para que los equipos y el sistema alcancen su propósito, que es el de mantener la operación continúa, la seguridad y la disponibilidad del mismo, aunque conviene señalar que con él no se pueden compensar las deficiencias fundamentales del diseño o las situaciones en las que el equipo es operado fuera de los límites establecidos.

El grado o la cantidad de mantenimiento a aplicar esta determinado por factores internos o externos, tales como el material del tubo, tipo de construcción, edad, obsolescencia, metodología del tendido durante la construcción, su ubicación o trazo, tipo de uso, productos manejados, histograma de operación, sus fallas de origen y consecuencias de las mismas, un análisis detallado de los sistemas de protección catódica etc. y en cuanto a los sistemas de bombeo o de compresión, las condiciones operativas, su frecuencia o intervalo paro- arranque, las variaciones del voltaje en el caso del equipo accionador, el número de unidades instaladas en las estaciones de bombeo o de compresión, el tipo de marca y modelo del equipo, las recomendaciones del fabricante, su disponibilidad, es decir, de cuanto tiempo se dispone, así mismo esto es aplicable en lo referente a los equipos de medición y control de calidad, y el resto de la instrumentación. Y en el caso de los factores externos debemos de tomar en cuenta como recurso principal, las compañías o contratistas de las zonas, los representantes de las diversas marcas de equipos, la atención de estos, la velocidad de respuesta en casos de emergencia, la experiencia en trabajos anteriores y considerar que si bien es cierto que la reglamentación nos indica que todos los trabajos se deben asignar mediante contratos debidamente concursados, se deberá encuadrar de manera precisa y concisa que es lo que se esta solicitando, es decir, los trabajos a ejecutar descritos detalladamente y de manera ordenada.

La metodología a emplear en el mantenimiento, desde un punto de vista general describe cuatro niveles que son: estrategia, planeación, proceso y recursos.

Estrategia, es un plan que contempla todas las actividades y que asegura que los objetivos del mantenimiento coincidan con la de la empresa.

Planeación, contempla los recursos con los que cuenta la organización, el ciclo de vida que se manifiesta para él vinculo del diseño y la operación, en casos específicos la calidad mediante documentos, normas, prácticas operativas, etc.

Proceso, para atacar este nivel se requiere el establecer un plan de mantenimiento, considerando la programación óptima del mismo, planear y programar mediante el uso más óptimo de los recursos materiales, humanos y las herramientas y equipos, ejecutar el trabajo, desempeño de los insumos, es decir, medir el resultado, y finalmente investigar las fallas, pretendiendo determinar las causas y su efecto.

Recursos, los recursos necesarios para llevar a cabo el mantenimiento, considerando en primer lugar el humano, contemplando básicamente sus habilidades y experiencia, logística de materiales incluyendo partes, bienes y servicios, infraestructura, talleres y oficinas de mantenimiento y otros equipos de trabajo, documentación del trabajo ósea las ordenes de trabajo, permisos para trabajos peligrosos, sistemas de comunicación, así como de informática que permitan un monitoreo del desarrollo del avance del programa, y finalmente las dependencias externas pero que inciden en el desarrollo de los trabajos, por ejemplo los gestores, etc. Las funciones del mantenimiento para los sistemas de transporte por ducto y sus instalaciones superficiales requieren de estos niveles y componentes, el que tanto son aplicados depende de diversos factores como por ejemplo: El número y el valor de las instalaciones, el tipo de instalación (por ejemplo estaciones de medición, estaciones de compresión, estaciones de bombeo, trazo del ducto, dentro o fuera de ciudades, etc.), distribución geográfica de los posibles contratistas o las facilidades para la ejecución, cultura de la empresa, habilidades y experiencia de la fuerza de trabajo, obligaciones del tipo legal y/o regulatorias, experiencia de trabajos ejecutados en el pasado, así como el análisis del histograma del ducto. Las maneras más comunes para aplicar el mantenimiento las que al mismo tiempo son las básicas se pueden definir como sigue a continuación:

**Mantenimiento Correctivo:** Este se aplica como consecuencia de una falla manifiesta, es decir no necesariamente al término de su vida útil y no es posible su planeación, generalmente es un tipo de mantenimiento basado en operar hasta fallar y se deberá considerar donde el impacto de las fallas es bajo y el costo de la falla es menor que el costo del mantenimiento programado, pues podría ser más económica la sustitución del o de los equipos o partes dañados de los mismos, comparándola con un paro de la línea de producción, y su aplicación se hace por razones de seguridad y ambientales, un ejemplo que comúnmente se aplica en el área de transporte de hidrocarburos es la corrección de fugas, generalmente provocadas por factores externos, o bien los sistemas de bombeo de inhibidores o las tarjetas electrónicas de un sistema de control de una turbina de gas, etc., es decir, se trata de corregir las fallas que haya en la línea de conducción.

En otras palabras, el mantenimiento correctivo es el conjunto de actividades encaminadas a reparar las partes dañadas de un equipo y/o instalación, una vez ocurrida la falla.

El mantenimiento correctivo, independientemente del que se aplica a una falla manifiesta de algún equipo ó instalación, se ha programado la rehabilitación de los ductos acorde a los resultados de la inspección interior previa; dichas rehabilitaciones contemplan básicamente los conceptos generales de localización topográfica de la falla, excavaciones, calibraciones, sustitución de tramos de tubería, tapado, reacondicionamiento del d.d.v., etc.

**Mantenimiento preventivo:** Es aquel tipo de mantenimiento que basado en la medición de un parámetro o parámetros que permitan determinar las condiciones y el deterioro o la tendencia a deteriorarse de un equipo, sistema o como en este caso un ducto y sus periféricos, mediante estadísticas y técnicas de diagnóstico, las que a su vez permiten una planeación de un conjunto de actividades y recursos que tienen como objetivo incrementar los factores de confiabilidad, disponibilidad y eficiencia de los sistemas o equipos donde se aplica.

En forma más técnica, el mantenimiento preventivo programa las acciones necesarias para minimizar el riesgo de paro y/o siniestro por una falla imprevista de un equipo y/o instalación. (recomendación del fabricante).

### **Programa de Mantenimiento Preventivo de las Instalaciones Superficiales.**

A las instalaciones que se les proporciona mantenimiento preventivo, son básicamente:

- Trampas de envío y recibo de diablos.
- Válvulas de seccionamiento.
- Cruces aéreos, con vías de comunicación y subfluviales.
- Mantenimiento a rectificadores.
- Medición de potenciales.
- Monitoreo de la corrosión interior.
- Inspección terrestre del D. D. V.
- Postes de señalamiento.
- Mantenimiento a los D.D.V., así como los compartidos.
- Caminos de acceso.
- Corridas de diablos de limpieza.
- Bombas de inyección.
- Niples de evaluación.
- Edificios.
- Estaciones de bombeo.
- Mantenimiento a equipo dinámico.

Las actividades a las instalaciones, se realizan a través de cartas de mantenimiento con sus respectivas frecuencias, de los cuales principalmente se encuentran las siguientes:

1. Lubricación y engrase de válvulas.
2. Chapado y limpieza.
3. Protección mecánica y recubrimiento anticorrosivo.
4. Celaje terrestre.
5. Celaje aéreo.
6. Caminos de acceso.
7. Derechos de vías.
8. Pintura (obra civil a edificios).
9. Mantenimiento a áreas verdes.
10. Cruces aéreos con vías de comunicación y subfluviales.

Existen varios métodos de aplicación del mantenimiento preventivo, a continuación se mencionaran algunos de los más populares:

**Mantenimiento preventivo-predictivo:** El programa de mantenimiento más efectivo resulta cuando las acciones son llevadas antes de la falla y la detección exacta de la falla mediante técnicas de análisis- diagnóstico. Con el enorme desarrollo de la electrónica y la informática se ha facilitado el entendimiento aplicado de los diversos "síntomas" de los sistemas de transporte de hidrocarburos que aunados a la experiencia o bien a la aplicación de complejos "sistemas expertos" permiten largas corridas de operación cumpliendo con los principios de la aplicación de los programas de mantenimiento planeados originalmente; recientemente mediante la aplicación y el estudio se han logrado abatir la incredulidad y el esceptismo que el empleo de diablos instrumentados causaba y se ha demostrado su eficacia así como la asimilación por parte del personal técnico que lo adecua a la idiosincracia y a las características de operación de las empresas.

En forma más simple, el mantenimiento predictivo es el conjunto de acciones que se llevan a cabo justo antes de que ocurra una falla del equipo y/o instalación (monitoreo de condiciones).

El mantenimiento preventivo también recibe otras definiciones como por ejemplo: mantenimiento periódico, mantenimiento proactivo, mantenimiento según condición, mantenimiento integral, mantenimiento centrado en la confiabilidad que tiene un acercamiento desde el punto de vista integral y que apoya los cambios de pensamiento en las organizaciones pues requiere profesionistas con multihabilidades y conocimientos, así como actitud para laborar en equipo y es muy posible que se convierta en un método definitivo de planeación del mantenimiento pues permitirá establecer un proceso usado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier equipo o artículo físico en su contexto de operación y permitirá preservar la función del sistema no la operación del equipo y a la vez determinar que mantenimiento debe llevarse a cabo basado en las consecuencias de alguna falla ya que esta ligado con los siguientes objetivos: ¿Cómo ocurre la falla?, Cuales son las consecuencias?, ¿Que se puede hacer para prevenir las consecuencias de la falla que son importantes para nosotros?. Además el mantenimiento centrado en la confiabilidad considera que todos los tipos de mantenimiento pueden ser aplicados mediante una efectiva planeación que considere el monitoreo de todos los parámetros y cuando las consecuencias de una falla no son severas reconoce que operar hasta fallar puede ser más efectivo en cuanto a costos. Aunque como se ha señalado persigue el mismo fin y utiliza las técnicas de manejo estadístico y de diagnóstico para su planeación y aplicación.

Refiriéndonos a lo comentado anteriormente respecto a la cantidad de mantenimiento a aplicar vale la pena señalar que no se deben perder de vista los costos pues la aplicación de programas de mantenimiento preventivo tendrá un impacto sobre dichos costos que harán por consiguiente que los costos por mantenimiento correctivo disminuyan hasta el tender a desaparecer estos últimos, lo que en el transcurso del tiempo nos lleva a invertir como si decidiera cambiar totalmente por sistemas o equipos nuevos. Por lo anterior se deberá balancear cuanto mantenimiento correctivo versus mantenimiento preventivo es conveniente aplicar.

## **Aplicación de las Técnicas del Mantenimiento en los Sistemas de Distribución de Hidrocarburos por Ducto.**

A partir de 1992., son creados los organismos subsidiarios de Petróleos Mexicanos obligando a la creación de los comités de transición en los que se distribuyeron los sistemas de transporte entre las diferentes áreas usuarias de los sistemas de distribución de hidrocarburos por ducto, originando también la creación del Comité de Inter organismos de Ductos.

La división ha permitido que cada una de las entidades aplique sus propios criterios en lo que ha mantenimiento se refiere dándole a cada una de las actividades su propio valor agregado de acuerdo a una problemática específica que puede variar desde el celaje terrestre clase 1,2,3,o 4, los precios unitarios para el mantenimiento de los derechos de vía compartidos, el análisis de riesgos por la corrosión interna, que tiene por objeto la operación de los ductos en forma segura y confiable durante un mayor periodo de tiempo, mediante la recopilación de registros históricos de operación, el cálculo de la probabilidad de la falla, la evaluación de las consecuencias, el cálculo del riesgo y la subsecuente clasificación del ducto de acuerdo a los resultados, y la construcción de un sistema de información geográfica que permite atender eficientemente el mantenimiento, la construcción, legalización de los derechos de vía y el control del estado de ductos e instalaciones petroleras, encaminado a integrar la información de los diferentes usuarios, los derechos de vía, las afectaciones, así como su ubicación geográfica, es decir, atiende tanto los problemas técnicos como las relaciones de la propia empresa con los usuarios y los propietarios de predios, etc., pues permite rápidamente la ubicación de las instalaciones, la problemática de los asentamientos humanos, el control del pago de afectaciones, la regulación de los derechos de vía, la simulación de escenarios de riesgo y la planeación y control de la atención de contingencias.

Dado que los ponentes forman o formaron parte de la Subdirección de Distribución de Pemex-Refinación, se pone a su consideración el enfoque que con respecto al mantenimiento integral de los sistemas de transporte por ducto se está aplicando actualmente:

Sistema integral para el mantenimiento de instalaciones de ductos, SIMID. Cuyo objetivo es el de contar con una herramienta automatizada que permita generar y dar seguimiento a los programas de mantenimiento de instalaciones de ductos y esta enfocado a un mantenimiento preventivo programado a las instalaciones superficiales, los derechos de vía, la obra civil, tanquería y tuberías. Los sistemas de corrosión interna, los equipos dinámicos, las subestaciones y centros de control, etc., en cada uno de los sectores de las subgerencias de la gerencia de transportación por ductos, estableciendo criterios estandarizados que aseguren una evaluación objetiva y oportuna a los diferentes niveles jerárquicos de la organización. Este sistema toma como base los productos y los reportes del sistema del mismo nombre que venían manejándose antes de 1992 y debido a la imposibilidad de poder continuar su aplicación por haberse construido considerando que su actualización se debería hacer a nivel central mediante una clave personal, situación que fue corregida y en aplicación actualmente. Sus alcances permiten integrar un inventario único de las instalaciones y sus equipos, la formulación de las cartas de mantenimiento para cada una de las especialidades, contar con indicadores de evaluación de las cartas de mantenimiento, la generación automática de los programas de mantenimiento para cada una de las especialidades, la capacidad de registrar el cumplimiento de los programas de mantenimiento, así como, los costos por concepto de mano de obra, materiales y equipo, y la capacidad para integrar información de inventarios, programas y seguimiento a nivel sector, subgerencia y gerencia generando además información estadística de los grados de cumplimiento.

Sistema informático para el control de la protección interior SICCI. Sistema que permite la administración de los censos de los ductos, y contiene información que contempla entre otras variables, la subgerencia a la que pertenece, el servicio para lo que está destinado, la fecha de inicio de la operación, el origen y su destino, su diámetro nominal, su longitud y lo más importante la clave de la instalación, así mismo permite el control de todos los dispositivos de corrosión interior, es decir, los testigos de corrosión, las sondas eléctricas, las bombas dosificadoras del inhibidor, permitiendo el monitoreo de las velocidades de corrosión, ubicando la corrosión crítica.

generando gráficos, estadísticas, históricos, comparativos, y permite la administración del tratamiento anticorrosivo, mediante el control de existencias del inhibidor y su costo, y finalmente los costos del tratamiento por cada 1000 bis transportados.

**Sistema informático de control de rectificadores SISREC.** Contiene el censo de las instalaciones de los sistemas de protección catódica, los catálogos e información sobre equipos y herramientas para el mantenimiento preventivo de la protección anticorrosiva exterior, el control de la operación de rectificadores y camaras anódicas mediante el análisis de las tomas de lecturas sobre información para el cálculo de la eficiencia, la resistencia de circuito, el consumo de energía y el potencial de drenaje y estado de las instalaciones y el análisis de los perfiles de potenciales de la protección catódica a los ductos para que mediante las graficas comparativas del comportamiento de la protección catódica se analice el comportamiento del sistema.

**Sistema informático de perfiles de potenciales de la protección catódica PPPCD.** Este es un sistema que sirve para el monitoreo de los potenciales de drenaje mediante el registro de las tomas de potenciales de la protección catódica, el cual permite el registro de los datos de un ducto considerando su ubicación específica, así como la fecha del registro y mediante un grafico del perfil de dichos potenciales permite de manera inmediata la detección de aquellos puntos que rebasan los límites que nos indican las normas respectivas, su aplicación nos señala la eficiencia de los tramos rehabilitados, así como la evaluación de la misma protección catódica.

**Sistema informático para ductos inspeccionados con diablos instrumentados INSPECCI.** La aplicación de este sistema es la del control de los ductos inspeccionados con equipo instrumentado y comprende la elaboración de cuestionarios para la inspección interior de un ducto, es decir la mayoría de los datos que se requieren para poder hacer una corrida con un diablo instrumentado y contempla datos de las trampas de envío y recibo de diablos, de las dimensiones y características de las válvulas, de las tee's de las mismas, de las válvulas de seccionamiento y de las válvulas check, en suma las características de las trampas de envío y recibo de los diablos. Con seguridad se puede decir que la mayor importancia de este sistema radica en el cálculo para el periodo máximo de inspección y determinar el número de prioridad de la inspección del ducto, el producto obtenido nos dará el número de prioridad así como el periodo máximo de inspección en años, cabe aclarar que este modelo se basa en una ponderación por puntos de los diferentes factores que influyen en la probabilidad y consecuencias de fallas en tuberías y esto permite obtener un número de prioridad para cada sección del ducto a inspeccionar, para que con estos se determine la periodicidad que puede ser baja, media y alta, y de ahí determinar el intervalo de la inspección en años. Por otra parte permite la generación de informes detallados donde se obtienen datos de las inspecciones efectuadas, la compañía contratada, la longitud inspeccionada, así como las consultas del histograma de corridas con equipo instrumentado.

**Rehabilitación de la red nacional de ductos que transportan hidrocarburos líquidos.** A partir de su formación la gerencia de transportación por ducto, se avoco a la corrección inmediata de los problemas que presentaban los ductos mediante la plantación de proyectos que incluyeran la inspección, la rehabilitación que como consecuencia de la misma se requiriera, la modernización de las instalaciones y el mantenimiento a largo plazo de un sistema de transporte.

Lamentablemente los costos que arrojaban requerían el otorgamiento de recursos que superaban el presupuesto de la empresa, por lo que se implementaron alternativas, una de las cuales fue aceptada por lo que se arranco el "plan de acción para la rehabilitación de los ductos y el 100% de la protección catódica de la red nacional de ductos", con el tiempo se decidió la implementación de auditorías para identificar el estado de los mismos aprovechando al máximo los resultados de las inspecciones realizadas por las compañías de los proyectos, así como simultáneamente proceder a la inspección mediante diablos instrumentados del resto de los sistemas y a ir reparando los sistemas de protección catódica, dándole énfasis a lo referente a las camaras anódicas, a la toma de potenciales y a la protección interior. Con la información que se obtenía, resultado de las inspecciones y sobre la base de las experiencias que se fueron adquiriendo, los proyectos de las rehabilitaciones permitieron incluir más alcances, es decir, se incluyeron trabajos relativos a la



protección catódica, la señalización, algunos libramientos, mantenimiento a las válvulas de seccionamiento, etc.



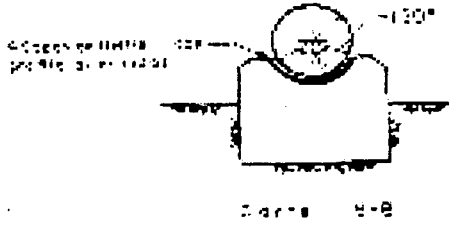
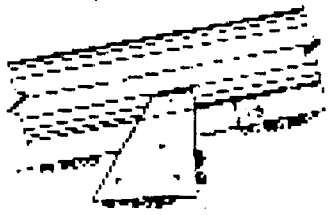
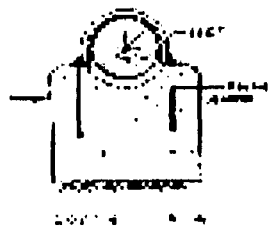
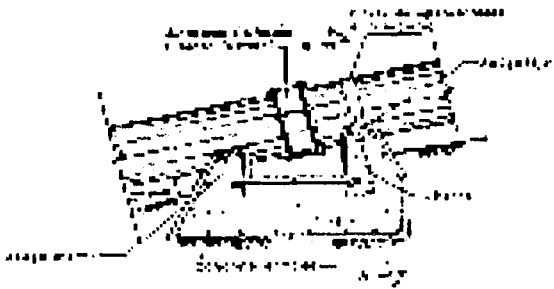
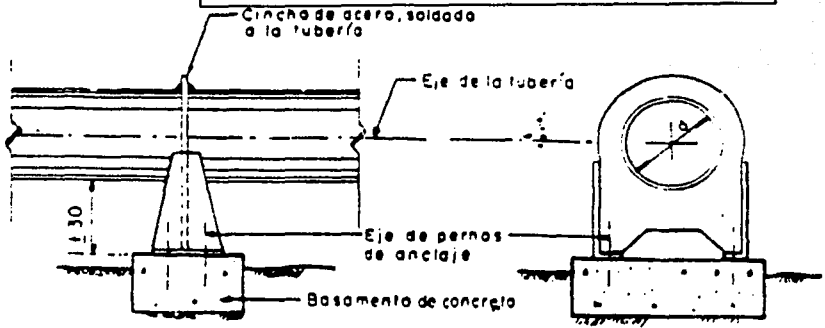
TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## C o n c l u s i o n e s .

Con el desarrollo y análisis expuesto en nuestra propuesta de Implantar un sistema de conducción por ducto para Gasolina y Diesel entre la Refinería Francisco I. Madero en Cd. Madero Tamaulipas y la Terminal de Almacenamiento y Distribución de San Luis Potosí, S.L.P., concluimos:

- 1) Que la línea de conducción nos da la ventaja de flexibilizar la distribución de los hidrocarburos, entregarlos oportunamente y de una manera segura.
- 2) PEMEX tendrá una menor cantidad de gastos e inversiones (originados por el sistema logístico de los auto tanques y carro tanques que actualmente abastecen a San Luis Potosí) y una mayor eficiencia en la entrega de los combustibles durante todos los años en que este en servicio la línea de conducción.
- 3) El envío de los combustibles a través de los poliductos es más recomendable que la transportación por auto tanque y carro tanque, debido a que son un medio de conducción seguro, rápido y eficaz. Así, con la operación del poliducto se reducen los congestionamientos vehiculares, el riesgo generado por el excesivo tránsito de auto tanques en las carreteras que unen los puntos que se mencionan; se disminuye las emisiones contaminantes generadas por los motores de combustión interna de los vehículos que transportan los hidrocarburos y se aumenta la seguridad en el traslado de los combustibles.
- 4) El abastecimiento de Gasolina y Diesel a Cd. Valles y Matehuala será de la TAD de San Luis Potosí, S.L.P. utilizando auto tanques. De esta forma, se reducen los grandes recorridos que se realizan para abastecer a estas ciudades y se soluciona el problema de abasto para el área de influencia de estas regiones.
- 5) El ducto tendrá un diámetro de 14 in de acuerdo al análisis de cálculo técnico económico de diferentes diámetros, con un espesor de 0.281 in y una distancia de 355 Km. Esta línea de conducción contara con cuatro estaciones de bombeo que se localizan en los puntos establecidos en el inciso 4.5 de las curvas de los sistemas, dichas estaciones se proyectan para suministrar la presión requerida para llevar los hidrocarburos hasta San Luis Potosí sin sobrepasar los límites de seguridad establecidos por la MAOP. Nuestro ducto seguirá la ruta propuesta por el derecho de vía, que se planteo en el mapa ilustrado en el capítulo 4.
- 6) De acuerdo a los costos; que se calcularon, analizaron y compararon entre el precio total de la obra de conducción y el costo total del transporte por auto tanque, se concluye que es más caro el estar transportando por carro tanque y auto tanque durante los próximos 20 años (que es el tiempo de vida del poliducto) que el costo del tendido de la tubería, con todos los accesorios, recubrimientos, mano de obra, etc.

Anexo A2-1 Tipos de Silletas.



SILLETA PARA APOYO MOVIL

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## ANEXO 3-1

Tabla 4-1. Pérdida de Fricción en el Tubo para Agua.  
(Tubo de hierro forjado o acero cédula 40 en buenas condiciones)

Díametro	Flujo	Velocidad	Velocidad de la columna m de agua	Pérdida de Fricción m de agua por 100 m de tubo
51	3.15	1.46	0.11	4.67
51	6.3	2.91	0.43	17.4
51	9.4	4.36	0.97	38
51	12.6	5.82	1.73	66.3
51	18.9	8.75	3.9	146
102	12.6	1.53	0.12	2.27
102	18.9	2.3	0.27	4.89
102	31.5	3.84	0.75	13
102	63.1	7.68	3	50.2
102	126	15.36	12.04	196
153	12.6	0.87	0.023	0.299
153	31.5	1.69	0.14	1.66
153	63.1	3.38	0.58	6.17
153	126	6.76	2.34	23.8
153	252	13.53	9.36	93.1
203	31.5	0.98	0.048	0.424
203	63.1	1.95	0.19	1.65
203	126	3.9	0.78	5.86
203	252	7.83	3.11	22.6
203	504	15.63	12.46	88.6
254	63.1	1.19	0.073	0.497
254	189	3.59	0.66	4
254	315	5.97	1.82	10.8
254	473	8.99	4.11	24
254	631	11.98	7.31	42.2
305	126	1.74	0.16	0.776
305	315	4.36	0.97	4.47
305	631	8.75	3.9	17.4
305	941	13.1	8.75	38.4
305	1262	17.46	15.57	68.1

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

Tabla 4-2. Resistencias de Accesorios y Válvulas.  
(Longitud equivalente de tubo recto, en m dando la resistencia equivalente)

Tamaño de tubo en mm	Codo normal	Codo de radio medio	Codo de radio grande	Codo de 45	Te	Válvula de compuerta abierta	Válvula de globo abierta	Eje de balancín abierto
25.4	0.82	0.7	0.52	0.39	1.77	0.18	8.23	2.04
50.8	1.68	1.4	1.06	0.76	3.35	0.36	17.38	3.98
76.2	2.47	2.07	1.55	1.16	5.18	0.52	25.92	6.1
101.6	3.35	2.77	2.13	1.52	6.71	0.7	33.55	8.023
127	4.27	3.66	2.71	1.86	8.23	0.88	42.7	10.06
152.4	4.88	4.27	3.35	2.35	10.06	1.06	48.8	12.2
203.2	6.4	5.49	4.27	3.05	13.11	1.37	67.1	16.16
254	7.93	6.71	5.18	3.96	17.08	1.74	88.45	20.43
304.8	9.76	7.93	6.1	4.57	20.13	2.04	103.7	24.4
355.6	10.98	9.45	7.01	5.18	23.18	2.44	118.95	28.36
406.4	12.81	10.67	8.23	5.79	26.53	2.74	131.15	32.63
457.2	14.03	12.2	9.15	6.4	30.5	3.11	152.5	36.6
508	15.86	13.11	10.37	7.01	33.55	3.66	170.8	40.67
609.6	19.21	16.16	12.2	8.54	42.7	4.27	207.4	48.8
914.4	28.67	24.09	18.3	13.11	61	6.1	305	73.2

## Anexo A4-1

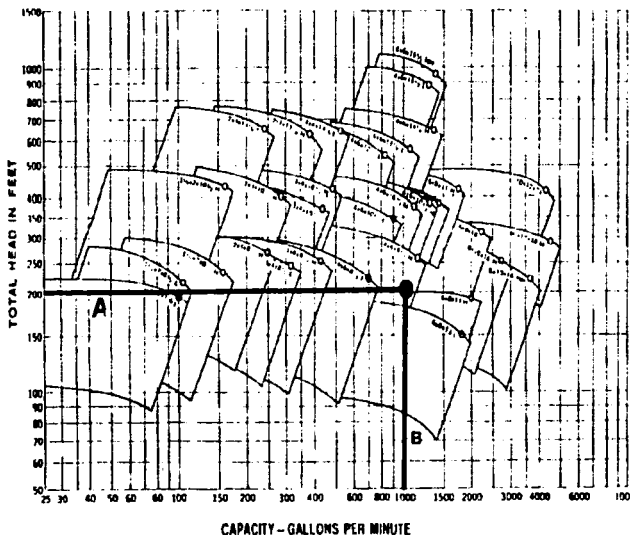
Selección de las curvas características una bomba, utilizando la familia de curvas de bombas.

El procedimiento de selección es muy sencillo:

- El Primer punto es conocer el gasto Q y la presión H a laque deberá trabajar nuestra bomba (Para ejemplificar, supongamos que deseamos impulsar un gasto  $Q = 1000$  gpm. A una presión de  $H = 200$  Feet.)
- Del catalogo solicitado al fabricante de bombas, localizamos la familia de curvas de sus bombas (parecida a la ilustrada en este anexo o con una forma parecida).
- Una vez que se localizo la familia de curvas debemos de observar que la escala maneje los rangos de nuestras necesidades de conducción, en este ejemplo si se ubican los parámetros que proponemos como ejemplo, de no localizarse los datos a manejar, se le solicita al fabricante otro catalogo de bombas que contenga un rango mayor o menor de valores en su escala según sea el caso.
- Localizado el punto donde indica el caudal a manejar en el eje de la ordenadas Q, iniciamos el trazo de una línea (A) perpendicular al eje Q y que se prolonga hasta llegar aproximadamente a la altura de presión requerida e indicada en el eje de la abscisas H, de este eje Trazamos una recta (B) perpendicular al eje H y se prolonga hasta topa con la recta (A).

## SINGLE STAGE PROCESS PUMPS Type SJA

### QUICK SELECTION RANGE CHART



En la intersección de las rectas A y B, se localiza el punto que toca o indica el área formada por la curva correspondiente; en este punto se localizaran las curvas características de las bombas que podemos analizar y seleccionar, esto debido a que el punto indica un grupo específico de bombas capaz de manejar los parámetros requeridos por nuestros requerimientos.

- Para nuestro ejemplo el punto de intersección indica analizar las curvas de las bombas 4x6x8 1/2 H que se encuentran en el manual.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN

**BIBLIOGRAFÍA**

Byron Jackson, Manual de Bombas Centrifugas, Single Stage Process Pumps, 7th Edición, Api 610, Manual del Distribuidor.

Ing. Cesar Valdez Enrique, Abastecimiento de Agua Potable, 3a. Edición, Facultad de Ingeniería, UNAM, División de Ing. Civil, Topográfica y Geodésica.

Crane, División de Ingeniería; Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías; Mc Graw-Hill.

Gerhart Philip M., Gross Richard J., Hochstein John I.; Fundamentos de Mecánica de Fluidos, Segunda Edición; Addison-Wesley Iberoamericana.

Greene Richard W. y Cuerpo de Redactores de Chemical Engineering Magazine; Válvulas, Selección, Uso y Mantenimiento; Mc Graw-Hill.

G. Hicks Tyler, Bme, Bombas, su Selección y Aplicación, Compañía Editorial Continental, S.A., México.

Hernández Arroyo Patrocinio; Manual de Practicas (Laboratorio de Hidráulica y Mecanica de Fluidos) Volumen 1, Hidráulica Básica; Tesis Profesional Para Obtener el Grado de Ingeniero en UNAM ENEP Aragón.

Karassik Igor J., Roy Carter; Bombas Centrifugas, Operación, Selección y Mantenimiento; C.E.C.S.A

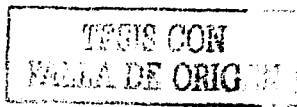
Mancebo del Castillo Uriel; Teoría del Golpe de Ariete y sus Aplicaciones en Ingeniería Hidráulica; Limusa.

Mc Naughton Kenneth J. Y Cuerpo De Redactores de Chemical Engineering; Bombas, Selección, Uso y Mantenimiento; Mc Graw-Hill.

Ortiz Hernández Javier, Arriaga Aldana Alfredo; Análisis Hidráulico en ductos y Criterios para su Rehabilitación o Sustitución; Apuntes Personales; Subgerencia de Ingeniería de Medición y Control de la Subdirección de Distribución de Pemex Refinación.

Pemex Comité Inter. Organismos de Ductos, Norma para el Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento e Inspección de Tuberías de Transporte de Hidrocarburos, Cid-Nor-07.3.13, 7ª Revisión, Mayo De 1997.

Pemex, Memoria de labores 1999, Realizada por la Unidad de Planeación Corporativa de Pemex, Marzo 1999.



Pemex, Norma para el Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento e Inspección de Tuberías de Transporte, Realizada por el Comité Interorganismos De Ductos, Pemex, Mayo 1999.

Petroleum Extension Service; Oil Pipeline Construction and Maintenance; University of Texas at Austin, Second Edition.

Streeter Victor L, Wylie E. Benjamin; Mecanica de Fluidos; Sexta Edición; Mc Graw-Hill.

Warring R. H.; Selección de Bombas, Sistemas y Aplicaciones; Labor, S: A: Barcelona 1977.

White Frank M.; Mecánica De Fluidos; Mc Graw-Hill.

Intranet de Pemex.

#### **Revistas:**

Pemex, Revista "Ductos", Realizada por Pemex, Numeros 1, 2, 4, 6 y 7, Año 1, (1997 Y 1998).

Pemex, Revista "Ductos", Realizada por Pemex, Numeros 9 y 10, Año 2, (1998).

Pemex, Revista "Ductos", Realizada por Pemex, Numeros 13,15,16,17,18, 19, 20, 21, 22, 23, Año 3, (1999, 2000 y 2001).

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN