

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PARA EL DESPACHO DE METANOL, MTBE E ISO-OCTANO A TRAVÉS DEL MUELLE PETROQUÍMICO DE JOSE**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Rojas U., Carelia  
Para optar al Título  
de Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2006

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PARA EL DESPACHO DE METANOL, MTBE E ISO-OCTANO A TRAVÉS DEL MUELLE PETROQUÍMICO DE JOSE**

TUTOR ACADÉMICO: Prof<sup>a</sup>. Dr. Nólides Guzmán  
TUTORES INDUSTRIALES: Ing. Gehu Poreza  
Ing. Regina Salazar

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por la Br. Rojas U., Carelia  
Para optar al Título  
de Ingeniero de Petróleo

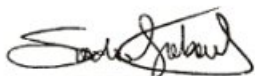
Caracas, 2006

Caracas, Junio de 2006

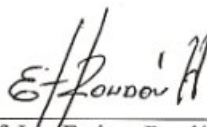
Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Carelia Rojas, titulado:

**“Desarrollo del Sistema de Transporte para el Despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose”**

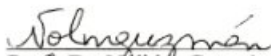
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.



Prof. Ing. Sandro Gasbarri  
Jurado



Prof. Ing. Enrique Rondón  
Jurado



Prof. Dr. Nólides Guzmán  
Tutor Académico



## AGRADECIMIENTOS

La elaboración del presente Trabajo Especial de Grado trae consigo no tan solo la edición de este libro, sino también la culminación de una carrera profesional, para lo cual han sido muchas las personas quienes me han ayudado y apoyado, entre las cuales me atrevo a nombrar:

- Dios Todopoderoso, la esperanza de que cada día será mejor que el anterior.
- La Universidad Central de Venezuela, es un honor haber sido bienvenida en la casa donde hoy y siempre se vencerá la sombra.
- A mis padres, siempre han sido y serán el pilar de fortaleza y amor que me guía hacia la excelencia. Las palabras no son lo suficiente para agradecerles.
- A mis hermanas, somos tres mejores amigas que se complementan. Les doy gracias por estar ahí y ayudarme todas las veces que las necesito, las quiero.
- A la Facultad de Ingeniería y la Escuela de Petróleo, en sus aulas conseguí los mejores profesores que incentivaron mis ganas de aprender.
- A mi tutora Prof<sup>a</sup> Nólides Guzmán, gracias por todo su tiempo, paciencia y dedicación.
- A Pequiven, muchas gracias por la oportunidad que me han brindado. Ing. Gehu Poreza y Regina Salazar, por brindarme toda la ayuda necesaria. A la Gerencia de Operaciones y todas las personas que me tendieron una mano cuando la necesitaba. Así como las personas involucradas en el proyecto, Ing. Claudio Passerini, Ing. Ernesto Silva, Ing. Alejandro Hernández.
- Mis familiares, hermanos, tíos, primos y cuñados, siempre apoyándome.
- A mis amigos, sin ustedes el camino hubiese sido interminable, Issa una amistad invaluable; Dani, gracias por estar siempre ahí; Giovanny, Santiago, William y Herbert comenzamos juntos y hoy cada quien sigue su camino, gracias por todos los buenos ratos; Mayralit, Mauricio, Miguel, Andriuska, Any, César, Ricardo, Leo, Rafael E., Domingo, Lenin, Raúl A., Tato, Karen, Julio S., Hernán, Criseida y Adriana Z., amigos inolvidables.

**Rojas U., Carelia J.**

**DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PARA EL  
DESPACHO DE METANOL, MTBE E ISO-OCTANO A TRAVÉS  
DEL MUELLE PETROQUÍMICO DE JOSE**

**Tutor Académico: Prof<sup>a</sup>. Dr. Nólides Guzmán. Tutores Industriales: Ing. Gehu  
Poreza, Ing. Regina Salazar. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.**

**Escuela de Ingeniería de Petróleo. Año 2006, 124 p.**

**Palabras Claves:** Tuberías Horizontales, Simulación de Tuberías, Programa  
Pipesim<sup>®</sup> 2003.

**Resumen.** En la industria petroquímica, además de los procesos mediante los cuales se obtienen los diversos productos, es de vital importancia el control sobre el sistema de despacho de éstos. El presente Trabajo Especial de Grado se realiza con el fin de diseñar el sistema de redes hidráulicas y mecanismo de despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose, utilizando como herramienta el software PIPESIM<sup>®</sup>. Se generan soluciones prácticas para la empresa, mediante el desarrollo de un diseño a grandes rasgos, con la ayuda del simulador, permitiendo la caracterización de los principales parámetros, así como el cálculo de las principales variables del proceso de transporte de los productos a cargar a través del Muelle Petroquímico del Complejo Industrial José Antonio Anzoátegui. De igual forma se estudian las opciones ocupacionales para el mencionado muelle, una vez sea puesto en marcha el proyecto que involucra el presente trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

|   |           |
|---|-----------|
| RESUMEN.....  | iv        |
| ÍNDICE GENERAL .....  | v         |
| ÍNDICE DE TABLAS.....   | x         |
| NOMENCLATURA.....   | xi        |
| INTRODUCCIÓN .....  | 1         |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....   | 3         |
| OBJETIVOS.....  | 4         |
| METODOLOGÍA .....   | 5         |
| <br>  |           |
| <b><i>CAPÍTULO I: MARCO REFERENCIAL.....</i></b>                                | <b>7</b>  |
| <b>1.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA.....</b>                                      | <b>7</b>  |
| 1.1.1 PETROQUÍMICA DE VENEZUELA, PEQUIVEN, S.A.....                             | 7         |
| 1.1.2 EL COMPLEJO PETROQUÍMICO ANZOÁTEGUI-JOSE.....                             | 7         |
| 1.1.3 LAS EMPRESAS MIXTAS ASOCIADAS A PEQUIVEN.....                             | 9         |
| 1.1.4 EMPRESAS MIXTAS OPERATIVAS EN EL COMPLEJO<br>PETROQUÍMICO ANZOÁTEGUI..... | 9         |
| 1.1.4.1 METANOL DE ORIENTE, (METOR).....  | 9         |
| 1.1.4.2 FERTILIZANTES NITROGENADOS DE ORIENTE, (FERTINITRO).....                | 10        |
| 1.1.4.3 SUPERMETANOL .....  | 10        |
| 1.1.4.4 SUPER OCTANOS .....   | 11        |
| 1.1.4.5 AGUAS INDUSTRIALES DE JOSE.....   | 11        |
| 1.1.5 EL MUELLE PETROQUÍMICO DE JOSE.....                                       | 13        |
| <b>1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>1.2.1 MECÁNICA DE FLUIDOS.....</b>   | <b>14</b> |
| 1.2.1.1 NATURALEZA DE LOS FLUIDOS.....  | 14        |
| 1.2.1.2 TERMINOLOGÍA DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS.....                             | 17        |
| <b>1.2.2 DINÁMICA DE FLUIDOS.....</b>   | <b>19</b> |
| 1.2.2.1 BALANCE DE ENERGÍA.....   | 19        |
| 1.2.2.1.1 Balance total de energía.....   | 19        |
| 1.2.2.1.2 Balance de energía mecánica.....                                      | 21        |
| 1.2.2.1.3 Evaluación de la caída de presión en el sistema.....                  | 21        |
| 1.2.2.2 FLUJO EN TUBERÍAS .....   | 22        |
| 1.2.2.2.1 Distribución de velocidad en tuberías circulares.....                 | 22        |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| 1.2.2.2.2    | <i>Flujo incompresible</i> .....   | 22        |
| 1.2.2.2.3    | <i>Tuberías circulares</i> .....   | 22        |
| 1.2.2.2.4    | <i>Fluidos no newtonianos</i> .....  | 25        |
| 1.2.2.2.5    | <i>Flujo no isotérmico</i> .....   | 28        |
| 1.2.2.2.6    | <i>Flujo turbulento</i> .....  | 29        |
| 1.2.2.2.7    | <i>Flujo isotérmico en conductos horizontales (para gases ideales)</i> ..... | 30        |
| 1.2.2.2.8    | <i>Diámetro económico de la tubería: flujo turbulento</i> .....              | 31        |
| 1.2.2.2.9    | <i>Diámetro económico de la tubería: flujo laminar</i> .....                 | 31        |
| 1.2.2.2.10   | <i>Pérdidas de presión diversas</i> .....                                    | 31        |
| 1.2.2.2.11   | <i>Accesorios y válvulas</i> .....   | 32        |
| <b>1.2.3</b> | <b>BOMBEO DE LÍQUIDOS</b> .....  | <b>33</b> |
| 1.2.3.1      | PRINCIPIOS DEL BOMBEO DE LÍQUIDOS.....                                       | 33        |
| 1.2.3.1.1    | <i>Desplazamiento</i> .....  | 34        |
| 1.2.3.1.2    | <i>Fuerza centrífuga</i> .....   | 34        |
| 1.2.3.2      | SELECCIÓN DE LA BOMBA.....   | 35        |
| 1.2.3.3      | BOMBAS CENTRÍFUGAS.....  | 35        |
| <b>1.2.4</b> | <b>TUBERÍAS PARA PLANTAS DE PROCESOS</b> .....                               | <b>36</b> |
| 1.2.4.1      | CÓDIGO PARA TUBERÍAS A PRESIÓN.....  | 36        |
| 1.2.4.2      | MATERIALES PARA SISTEMAS DE TUBERÍAS.....                                    | 37        |
| 1.2.4.2.1    | <i>Precauciones sobre materiales específicos</i> .....                       | 38        |
| 1.2.4.3      | SISTEMAS DE TUBERÍAS METÁLICAS DE ACERO AL CARBONO Y ACERO INOXIDABLE.....   | 40        |
| 1.2.4.3.1    | <i>Tubos y tuberías</i> .....  | 41        |
| 1.2.4.3.2    | <i>Juntas</i> .....  | 42        |
| 1.2.4.3.3    | <i>Codos y accesorios</i> .....  | 43        |
| 1.2.4.3.4    | <i>Válvulas</i> .....  | 44        |
| 1.2.4.4      | DISEÑO DE SISTEMAS DE TUBERÍAS.....  | 46        |
| 1.2.4.4.1    | <i>Seguridad</i> .....   | 46        |
| 1.2.4.4.2    | <i>Condiciones de diseño</i> .....   | 46        |
| 1.2.4.4.3    | <i>Criterios de diseño: tuberías metálicas</i> .....                         | 48        |
| 1.2.4.4.4    | <i>Diseño de presión de componentes metálicos</i> .....                      | 49        |
| 1.2.4.4.5    | <i>Expansión térmica y flexibilidad de tuberías metálicas</i> .....          | 50        |
| 1.2.4.4.6    | <i>Soportes de tuberías</i> .....  | 54        |
| 1.2.4.4.7    | <i>Golpe de Ariete</i> .....   | 56        |
| 1.2.4.5      | FABRICACIÓN, MONTAJE E INSTALACIÓN.....                                      | 57        |
| 1.2.4.5.1    | <i>Soldadura</i> .....   | 57        |
| 1.2.4.5.2    | <i>Doblado y formación</i> .....   | 57        |
| 1.2.4.5.3    | <i>Pre calentamiento y tratamiento térmico</i> .....                         | 58        |
| <b>1.3</b>   | <b>PROPIEDADES PRINCIPALES DE LA HERRAMIENTA: PIPESIM®2003</b> . <b>58</b>   |           |
| 1.3.1        | Diseño y Análisis de tuberías y facilidades.....                             | 58        |
| 1.3.2        | Modelaje de flujo multifásico.....   | 58        |
| 1.3.3        | Modelos de Fluido.....   | 59        |
| 1.3.4        | Certeza del tipo de flujo.....   | 59        |
| 1.3.5        | Diseño de equipos de superficie.....   | 59        |
| 1.3.6        | Módulo de Análisis de redes de tubería.....                                  | 60        |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>CAPÍTULO II: DESARROLLO DEL DISEÑO .....</b>  | <b>61</b>  |
| <b>2.1 CONDICIONES DE DISEÑO .....</b>   | <b>61</b>  |
| 2.1.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....  | 61         |
| 2.1.2 CONFIGURACIÓN DE LAS BOMBAS.....   | 62         |
| 2.1.3 CONDICIONES AMBIENTALES DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO JOSE.....                              | 63         |
| 2.1.4 CONFIGURACIÓN DE LAS TUBERÍAS .....  | 63         |
| <b>2.2 DISEÑO DE LAS TUBERÍAS.....</b>   | <b>68</b>  |
| 2.2.1 CONFIGURACIÓN DE LAS TUBERÍAS.....   | 68         |
| 2.2.1.1 <i>Metor</i> .....   | 68         |
| 2.2.1.2 <i>SuperMetanol</i> .....  | 74         |
| 2.2.1.3 <i>MTBE de Super Octanos</i> .....   | 75         |
| 2.2.1.4 <i>IsoOctano de Super Octanos</i> .....  | 77         |
| <b>2.3 REVISIÓN DEL MODELO DE OCUPACIÓN DEL MUELLE .....</b>                                   | <b>79</b>  |
| 2.3.1 CONFIGURACIÓN DE LOS BRAZOS DE CARGA EN LA PLATAFORMA<br>DISPUESTA PARA EL PROYECTO..... | 79         |
| <br>   |            |
| <b>CAPÍTULO III: RESULTADOS .....</b>  | <b>83</b>  |
| <b>3.1 SELECCIÓN DEL ESPESOR DE PARED.....</b>   | <b>83</b>  |
| <b>3.2 CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A LA FRICCIÓN EN<br/>LAS TUBERÍAS.....</b>        | <b>85</b>  |
| 3.2.1 ECUACIÓN DE FANNING.....   | 86         |
| 3.2.2 PIPESIM® .....   | 91         |
| 3.2.2.1 <i>Metor</i> .....   | 91         |
| 3.2.2.2 <i>Supermetanol</i> .....  | 96         |
| 3.2.2.3 <i>MTBE de Super Octanos</i> .....   | 99         |
| 3.2.2.4 <i>Iso-Octano de Super Octanos</i> .....   | 102        |
| <b>3.3 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS .....</b>   | <b>104</b> |
| <br>   |            |
| <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>  | <b>110</b> |
| <b>CONCLUSIONES.....</b>   | <b>114</b> |
| <b>RECOMENDACIONES.....</b>  | <b>116</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>   | <b>118</b> |
| <b>GLOSARIO .....</b>  | <b>121</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>ANEXO 1 Información de productos químicos: Iso-Octano .....</b> | <b>122</b> |
| <b>ANEXO 2 Información de productos químicos: Metanol.....</b>     | <b>123</b> |
| <b>ANEXO 3 Información de productos químicos: MTBE .....</b>       | <b>124</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1: Vista parcial del Complejo Petroquímico General de División José Antonio Anzoátegui.....         | 8   |
| Figura 2: Vista de la Planta Super Octanos ubicada en el Complejo Petroquímico Anzoátegui.....             | 11  |
| Figura 3: Diagrama de corte.....   | 15  |
| Figura 4. Diagrama de Moody.....   | 23  |
| Figura 5. Curva de flujo general.....  | 26  |
| Figura 6: Esquema gráfico de la configuración de las tuberías de Metor.....                                | 69  |
| Figura 7: Datos de la configuración del fluido (Metor).....  | 70  |
| Figura 8: Datos de la configuración del sistema de bombeo de Metor.....                                    | 70  |
| Figura 9: Datos de la configuración de la línea de 24” de Metor.....                                       | 71  |
| Figura 10: Datos de la configuración de la línea de 16” de Metor.....                                      | 72  |
| Figura 11: Datos de la configuración de la línea de 12” de Metor.....                                      | 73  |
| Figura 12: Datos de la configuración de la línea de 20” de SuperMetanol.....                               | 74  |
| Figura 13: Datos de viscosidad para la configuración de MTBE de Super Octanos.....                         | 76  |
| Figura 14: Datos de la configuración de la línea de 20” de MTBE de Super Octanos.....                      | 77  |
| Figura 15: Datos de la configuración de la línea de 20” de IsoOctano de Super Octanos.....                 | 78  |
| Figura 16: Modelo Esquemático de la disposición de los Brazos De Carga en el Muelle Petroquímico Jose..... | 80  |
| Figura 17: Datos a ingresar para la corrida del modelo de la tubería de Metor.....                         | 92  |
| Figura 18: Gráfica Presión vs Distancia (Metor) $q= 2500\text{m}^3/\text{h}$ .....                         | 94  |
| Figura 19: Análisis de sensibilidad con variación de flujo (Metor).....                                    | 95  |
| Figura 20: Gráfica Presión vs Distancia (Metor) $q=2140 \text{ m}^3/\text{h}$ .....                        | 96  |
| Figura 21: Gráfica Presión vs Distancia (Supermetanol) $q= 2000\text{m}^3/\text{h}$ .....                  | 98  |
| Figura 22: Análisis de sensibilidad con variación de flujo (Supermetanol).....                             | 99  |
| Figura 23: Análisis de sensibilidad con variación de flujo (MTBE).....                                     | 101 |
| Figura 24: Análisis de sensibilidad con variación de flujo (IsoOctano).....                                | 103 |
| Figura 25: Distribución porcentual actual de la ocupación mensual del Muelle Criogénico.....               | 108 |
| Figura 26: Distribución porcentual de uso del Muelle Petroquímico a futuro.....                            | 108 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1: Estructura participativa de Pequiven Jose.....   | 12  |
| Tabla 2. Valores de aspereza superficial para varios materiales.....  | 23  |
| Tabla 3: Longitud Equivalente de tubería recta.....   | 33  |
| Tabla 4: Propiedades de los fluidos.....  | 61  |
| Tabla 5. Sistema de Bombeo.....   | 62  |
| Tabla 6: Condiciones Ambientales del Complejo Jose.....   | 63  |
| Tabla 7: Características de las Tuberías Principales (24" y 20").....   | 64  |
| Tabla 8: Características de las Tuberías de 16".....  | 65  |
| Tabla 9: Características de las Tuberías de 12".....  | 66  |
| Tabla 10: Longitudes equivalentes de diversos accesorios.....   | 67  |
| Tabla 11: Características de los brazos de carga.....   | 81  |
| Tabla 12: Programación Mensual de Ventanas Muelle No 9.....   | 82  |
| Tabla 13: Espesores mínimos de las líneas con costura.....  | 84  |
| Tabla 14: Espesores mínimos de las líneas sin costura.....  | 84  |
| Tabla 15: Longitudes de tubería con y sin costura.....  | 85  |
| Tabla 16: Cantidad de accesorios y longitudes equivalentes correspondientes<br>a las líneas de Metor y SuperMetanol.....    | 88  |
| Tabla 17: Cantidad de accesorios y longitudes equivalentes correspondientes<br>a las líneas propiedad de Super Octanos..... | 89  |
| Tabla 18: Resumen de los cálculos de caída de presión en las Tuberías<br>Principales.....                                   | 89  |
| Tabla 19: Resumen de los cálculos de caída de presión en las Tuberías de 16".....   | 90  |
| Tabla 20: Resumen cálculo de caída de presión en las Tuberías de 12".....   | 90  |
| Tabla 21: Resultados de la corrida en PIPESIM <sup>®</sup> de la configuración de Metor.....                                | 93  |
| Tabla 22: Resultados de la corrida en PIPESIM <sup>®</sup> de la configuración de<br>Supermetanol.....                      | 97  |
| Tabla 23: Resultados de la corrida en PIPESIM <sup>®</sup> de la configuración de MTBE.....                                 | 100 |
| Tabla 24: Resultados de la corrida en PIPESIM <sup>®</sup> de la configuración de<br>IsoOctano.....                         | 102 |
| Tabla 25: Cuadro comparativo entre valores de caída de presión de Metor.....  | 104 |
| Tabla 26: Cuadro comparativo entre valores de caída de presión de<br>Supermetanol.....                                      | 104 |
| Tabla 27: Cuadro comparativo entre valores de caída de presión de MTBE.....   | 105 |
| Tabla 28: Cuadro comparativo entre valores de caída de presión de IsoOctano.....  | 105 |
| Tabla 29: Cuadro comparativo entre modelos.....   | 106 |
| Tabla 30: Posibilidades de carga simultánea a través del Muelle Petroquímico.....   | 107 |
| Tabla 31: Tiempos mínimos para carga de buques.....   | 109 |

## NOMENCLATURA

$c$  = suma de tolerancias dejadas por la corrosión, la erosión y cualquier profundidad de la muesca o estriado (-)

$C_v$  = coeficiente de flujo en la válvula que pasa bajo una caída de presión de 1 psi.

$c_v$  = calor específico del fluido (BTU/lb.°R)

$D$  = diámetro del conducto (ft)

$d$  = diámetro interno de la válvula (ft)

$D_o$  = diámetro exterior de la tubería (ft)

$du/dy$  = gradiente de velocidad (1/s)

$E$  = factor de calidad (-)

$F$  = pérdida por fricción (ft.lbf/lb)

$f$  = factor de fricción de Fanning (-)

$G$  = velocidad másica media (lb/s.ft<sup>2</sup>)

$g$  = aceleración local debido a la gravedad (32,2 ft/s<sup>2</sup>)

$g_c$  = constante dimensional (32,17 lb.ft/lbf.s<sup>2</sup>)

$h_v$  = carga de velocidad (ft)

$i$  = entalpía específica (BTU/lb)

$J$  = equivalente mecánico de calor (ft.lbf/BTU)

$K$  = índice de consistencia (lbf.s<sup>n</sup>/ft<sup>2</sup>)

$K_I$  = cantidad de cargas de velocidad (ft/s)

$L$  = dimensión lineal característica del canal de flujo (ft)

$L_I$  = longitud del conducto (ft)

$L_2$  = longitud desarrollada de la tubería entre anclajes (ft)

$L_e$  = longitud equivalente (ft)

$n$  = exponente (-)

$n'$  = exponente de la ley de potencia (-)

$N_{Re}$  = número de Reynolds (-)

$P$  = presión de diseño (lbf/ft<sup>2</sup>)

$p$  = presión absoluta (lbf/ft<sup>2</sup>)

$p_I$  = presión estática corriente arriba (lbf/ft<sup>2</sup>)

$p_2$  = presión estática corriente abajo (lbf/ft<sup>2</sup>)

- $Q$ = calor agregado (BTU)  
 $q$ = flujo volumétrico del fluido (ft<sup>3</sup>/s)  
 $r$ = radio (ft)  
 $R_H$ = radio hidráulico medio (ft)  
 $r_w$ = radio de la tubería (ft)  
 $S$ = esfuerzo básico permisible para los materiales (lbf/ft<sup>2</sup>)  
 $s$ = entropía específica (BTU/lb. °R)  
 $SE$ = esfuerzo permisible (lbf/ft<sup>2</sup>)  
 $S_f$ = altura de la carga de fluido perdida por unidad de longitud de ducto (-)  
 $t_m$ = espesor mínimo de pared (ft)  
 $u$ = energía interna específica (BTU/lb)  
 $U$ = distancia de anclajes (ft)  
 $v$ = volumen específico (ft<sup>3</sup>/lb)  
 $V$ = velocidad lineal media (ft/s)  
 $v_{prom}$ = volumen específico promedio (ft<sup>3</sup>/lb)  
 $v_1$ = volumen específico en condiciones corriente arriba (ft<sup>3</sup>/lb)  
 $v_2$ = volumen específico en condiciones corriente abajo (ft<sup>3</sup>/lb)  
 $W$ = trabajo externo neto (lbf.ft)  
 $We$ = trabajo proporcionado por una fuente externa (lbf.ft)  
 $y$ = resultante de la deformación por desplazamiento total a ser absorbida por el sistema (ft)  
 $Z$ = altura por arriba de cualquier plano de referencia horizontal arbitrario (ft)

### **Símbolos griegos**

- $\Delta p$ = caída de presión estática (lbf/ft<sup>2</sup>)  
 $\Delta T_a$ = aumento global de la temperatura (°F)  
 $\varepsilon$ = aspereza de la superficie interna del canal (ft)  
 $\eta$ = viscosidad plástica (lb/ft.s)  
 $\mu$ = viscosidad dinámica (lb/ft.s)  
 $\mu_a$ = viscosidad aparente (lb/ft.s)  
 $\nu$ = viscosidad cinemática (ft<sup>2</sup>/s)

$\theta$ = ángulo de inclinación respecto a la horizontal (°)

$\rho$ = densidad del fluido (lb/ft<sup>3</sup>)

$\rho_{prom}$ = densidad promedio (lb/ft<sup>3</sup>)

$\tau$ = esfuerzo cortante (lbf/ft<sup>2</sup>)

$\tau_w$ = esfuerzo cortante en la pared (lbf/ft<sup>2</sup>)

$\tau_y$ = esfuerzo de cedencia (lbf/ft<sup>2</sup>)

$\omega$ = flujo en peso del fluido (lb/s)

### **Abreviaturas**

ASME= The American Society of Mechanical Engineers

CS= Condiciones Standard

EOS= Equations of State

ERW= Electric Resistance Weld

MTBE= Metil Ter-Butil Éter

MTMA= mil toneladas métricas anuales

MTMM= mil toneladas métricas mensuales

Soca= Super Octanos, C.A.

Sumeca= Supermetanol, C.A.

TAME= Ter-Amil Metil Éter

## INTRODUCCIÓN

Petroquímica de Venezuela (Pequiven), en la búsqueda de un despacho para sus productos a través del puerto de su propiedad en el Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, se planteó el Proyecto “Facilidades para el despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose”.

En el complejo existen cuatro empresas mixtas: FertiNitro, Metanol de Oriente (Metor), Supermetanol y Super Octanos, de las cuales sólo la primera descarga sus productos a través del muelle de Pequiven; las otras empresas lo hacen a través del Terminal de Almacenamiento y Embarque de Jose (TAEJ), lo cual es necesario redireccionar.

El referido proyecto consta de la instalación de todas las facilidades para el despacho de productos (Metanol, MTBE e Iso-Octano) a través del Muelle Petroquímico de Jose, incluyendo la red de líneas hidráulicas y los brazos de carga en el muelle, para lo cual se hace necesario el levantamiento en campo de los datos requeridos para llevar a cabo el diseño. El desarrollo del proyecto consiste en la Ingeniería, Procura y Construcción (IPC) para el despacho de los productos desde las plantas Metor, Supermetanol y Super Octanos, hasta la plataforma de líquidos del Muelle Petroquímico de Jose, lo cual a grandes rasgos comprende la instalación de:

- a) Cuatro líneas y cuatro brazos de carga.
- b) Instalación de un tanque para contingencias en el proceso de carga.
- c) Una línea que interconecte las tuberías de los brazos de Metanol, para dar la facilidad a Supermetanol y Metor de despachar, tanto del lado Este como Oeste.
- d) Una línea de venteo de gases de MTBE, Metanol, Iso-Octano y sus mezclas; desde el Muelle hasta el cabezal del mechorrio existente.
- e) Interconexión al sistema de tuberías existentes para servicios industriales.

El presente Trabajo Especial de Grado tiene como objetivo el diseño del sistema de transporte para el despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose, basándose en el uso del software PIPESIM<sup>®</sup>.

PIPESIM<sup>®</sup> es un simulador con aplicaciones para tuberías, que mediante el suministro de algunos datos como: flujo, presión, temperatura, propiedades físico-químicas y termodinámicas de los fluidos, diseño de las tuberías, además de las ecuaciones seleccionadas de acuerdo al fluido y variables a manejar, arroja resultados que permiten predecir tiempos óptimos de carga de los buques, así como los efectos que podría causar sobre el sistema cualquier cambio operacional realizado.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Petroquímica de Venezuela (Pequiven), junto a las empresas mixtas que laboran en el Complejo Petroquímico Anzoátegui deben habilitar las instalaciones del Muelle Petroquímico de Jose, propiedad de Pequiven, para lo cual se tiene previsto el desarrollo de la Ingeniería, Procura y Construcción del proyecto “Facilidades para el Despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose”, que se encuentra en su fase inicial desde febrero de 2006. En la fase de ingeniería son muchas las interrogantes que se plantean las empresas mixtas acerca de las características para el despacho que tendrán sus productos, así como la implementación de diferentes configuraciones de tuberías para lograr un mayor volumen de despacho o mejoras en la calidad de dicho despacho.

Es así como se plantea este Trabajo Especial de Grado, direccionado hacia la búsqueda de soluciones al diseño del sistema de redes hidráulicas y mecanismo de despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose, utilizando como herramienta el software PIPESIM<sup>®</sup>.

Se elabora la simulación del sistema de transporte que se desea instalar en el Muelle Petroquímico de Jose, para que sea ésta un modelo teórico a seguir durante la puesta en marcha del proyecto “Facilidades para el Despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose”.

## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL:

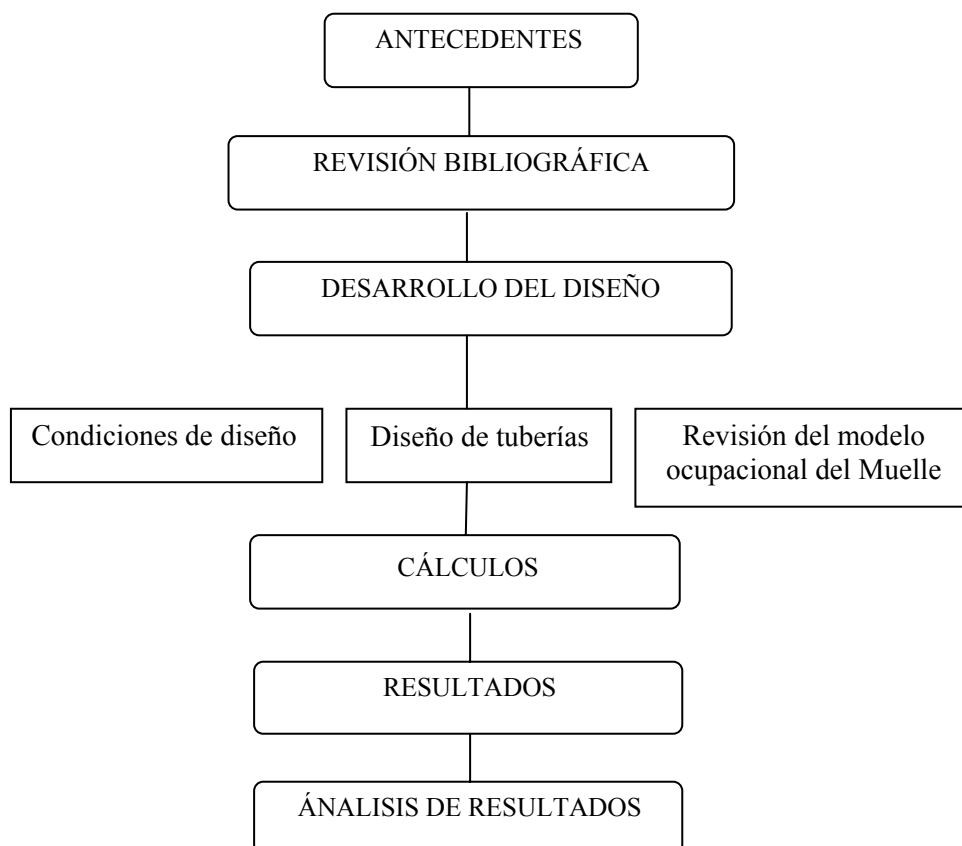
Diseñar el sistema de redes hidráulicas y mecanismo de despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose, utilizando como herramienta el software PIPESIM®.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Recopilar la información de campo necesaria para la realización del diseño del proyecto.
- Diseñar el sistema de tuberías desde las Empresas Mixtas hasta los brazos de carga ubicados en el Muelle Petroquímico de Jose, haciendo uso de Pipesim®2003.
- Diseñar las facilidades para el despacho de los productos hasta los cargueros.
- Calcular los parámetros y variables en cada una de las líneas.
- Calcular la capacidad de despacho durante la ventana operacional para cada uno de los productos.
- Calcular la capacidad operativa del muelle para el despacho simultáneo del mayor número de cargueros.

## METODOLOGÍA

La metodología seguida en el presente Trabajo Especial de Grado se puede recopilar en los siguientes puntos principales, los cuales están separados por capítulos a lo largo del trabajo, y presentan la siguiente estructura:



El primer capítulo correspondiente a los antecedentes, explica los principales aspectos de la empresa, así como la estructura participativa de Pequiven Jose. Luego se realiza el estudio de los principales aspectos teóricos involucrados en

la elaboración de un diseño de sistema de transporte, así como la descripción del software utilizado.

Se explican las bases para la elaboración del diseño, propiedades involucradas y configuración de los elementos del proyecto. Y por último, se procede al cálculo de las variables del diseño, comparación entre modelos y estudio operacional del Muelle Petroquímico de Jose.

Se analizan los resultados obtenidos, se generarán conclusiones y se harán recomendaciones de acuerdo al estudio realizado.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO REFERENCIAL**

#### **1.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA [3]**

##### **1.1.1 PETROQUÍMICA DE VENEZUELA, PEQUIVEN, S.A.**

Pequiven fue creada en 1977, asumiendo las funciones y operaciones de lo que fuera el Instituto Venezolano de Petroquímica (IVP), inaugurado en el año 1955. Desde marzo de 1978, cuando se constituyó como filial de PDVSA, Pequiven ha vivido sucesivas etapas de reestructuración hasta llegar a convertirse en la Corporación Petroquímica de Venezuela.

Su misión es manufacturar y comercializar productos químicos y petroquímicos de alta calidad, en el mercado nacional e internacional, maximizando el valor del gas y de las corrientes de refinación, a fin de impulsar el desarrollo industrial y agrícola del país.

Su visión es ser líder en motorizar el desarrollo agrícola e industrial de nuestro país, ser reconocida en los mercados nacionales e internacionales por la manufactura de productos químicos y petroquímicos de alta calidad y a costos competitivos.

Está integrada por tres Complejos Petroquímicos: El Tablazo, en el estado Zulia, Morón en el estado Carabobo y Jose en el estado Anzoátegui. Organizada en Unidades de Negocio que atienden el desarrollo de tres líneas de productos: Olefinas y sus derivados, Fertilizantes y Productos Industriales. Participa directamente en 16 Empresas Mixtas compuestas por socios nacionales e internacionales.

##### **1.1.2 EL COMPLEJO PETROQUÍMICO ANZOÁTEGUI-JOSE**

El Complejo Jose ubicado en el estado Anzoátegui, costa oriental del país, es un desarrollo petroquímico de Pequiven con gran futuro debido a la riqueza en gas natural que posee la zona. El Complejo tiene una superficie de 740 hectáreas donde se han instalado las plantas de: Super Octanos, Metor, Supermetanol y FertiNitro. En la

figura 1 se puede observar una vista aérea de las instalaciones del Complejo, donde se señalan los nombres de las calles que intervienen en el desarrollo del proyecto en estudio.

Además de los servicios de agua, electricidad, gas, generación de vapor y otras instalaciones como las oficinas administrativas, servicio de bomberos, sistema de intercomunicaciones, clínica industrial, vigilancia, sistema de disposición de efluentes industriales, mantenimiento, todo ello para satisfacer las necesidades del condominio.

El desarrollo del complejo demuestra la experiencia y competitividad de Pequiven, cuya estructura empresarial no escatima esfuerzos en mantener actualizada la capacidad de sus recursos humanos, revisión permanente de los procesos, uso de la tecnología de punta para fortalecer la productividad de sus plantas, atención esmerada consciente en la necesidad de conservar el ambiente y las relaciones interactivas y comprometidas con el país.



**Figura 1: Vista parcial del Complejo Petroquímico General de División José Antonio Anzoátegui.**

### **1.1.3 LAS EMPRESAS MIXTAS ASOCIADAS A PEQUIVEN**

La decisión gubernamental (1960) de permitir la participación asociada de empresas venezolanas y extranjeras en el negocio petroquímico fue muy acertada. Hoy esa modalidad empresarial ha fortalecido a Pequiven y ha logrado para el país avances en tecnología y manufactura de productos petroquímicos.

Las ganancias generadas demuestran el progreso logrado por Pequiven y las empresas mixtas respecto al aumento sostenido de la producción y diversificación de productos como sigue:

- Olefinas y Plásticos: ácido clorhídrico, cloro, dicloruro de etileno, etileno, pirogasolina, monómero de cloruro de vinilo (MCV), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de alta densidad; polietileno de baja densidad, polietileno lineal de baja densidad, polipropileno, propileno y soda cáustica.

- Fertilizantes: ácido fosfórico, ácido nítrico, ácido sulfúrico, amoníaco, caprolactama, fosfato diamónico, fosfato tricálcico, granulados de NPK, nitrato de potasio, oleum, roca fosfática, solución de amoníaco, sulfato de amonio, sulfato de sodio, urea.

- Productos Industriales: alquilbencenos, tálico anhídrido, benceno-tolueno-xileno (BTX), clorofluorometanos, glicol de etilenos, metanol, MTBE, óxido de etileno, polifosfato de sodio, tetrámero de propileno/tres.

### **1.1.4 EMPRESAS MIXTAS OPERATIVAS EN EL COMPLEJO PETROQUÍMICO ANZOÁTEGUI**

#### **1.1.4.1 METANOL DE ORIENTE, (METOR)**

El inicio de operaciones de la planta de producción de Metanol, empresa mixta Metanol de Oriente (Metor, S.A.), representa una significativa contribución para el proceso de industrialización del gran potencial de gas natural con el que cuenta Venezuela. Esta empresa tiene una composición accionaria representada por

Pequiven, Mitsubishi Corporation y Mitsubishi Gas Chemical, Empresas Polar e International Finance Corporation.

Esta planta tiene una capacidad instalada de 750 MTMA de Metanol, producto de amplio uso en la industria química y petroquímica.

El Metanol es un insumo para la manufactura de productos oxigenados (MTBE y TAME), ampliamente cotizados para mejorar el octanaje de la gasolina y las emisiones al ambiente. El Metanol también es materia prima para producir resinas y otros compuestos químicos. Así mismo, es producto final utilizado como solvente y combustible. Esta variedad de aplicaciones le otorga al Metanol un lugar fundamental en la industria química y petroquímica.

#### 1.1.4.2 FERTILIZANTES NITROGENADOS DE ORIENTE, (FERTINITRO)

El objetivo de esta empresa es la venta de productos elaborados en las plantas de Amoníaco y Urea, así como sus subproductos, tanto en Venezuela como en el extranjero.

Tiene como socios a la empresa Koch Industries con 35% de participación, Snamprogetti aporta 20%, Empresas Polar un 10% y Pequiven 35%. Esta empresa tiene una capacidad instalada estimada en 1.200 MTMA de amoníaco y 1.460 MTMA de urea.

#### 1.1.4.3 SUPERMETANOL

Esta empresa tiene como principal objetivo la producción de Metanol, así como la venta de dicho producto y de sus subproductos, principalmente en el mercado internacional. Empresa compuesta por Pequiven, Ecofuel, Metanol Holding y Petrochemical Investment Ltd. La capacidad estimada de producción asciende a 770 MTMA.

#### 1.1.4.4 SUPER OCTANOS

Empresa compuesta accionariamente por Pequiven, Ecofuel y el Banco de Inversión Mercantil. Se encarga de la producción de MTBE, así como la venta y comercialización de sus productos, principalmente en el mercado internacional. Opera desde el año 1991 y su capacidad está alrededor de 550 MTMA. En la figura 2 se observa una toma aérea de la planta dentro del Complejo Antonio José Anzoátegui.



**Figura 2: Vista de la Planta Super Octanos ubicada en el Complejo Petroquímico Anzoátegui.**

#### 1.1.4.5 AGUAS INDUSTRIALES DE JOSE

Se encarga del suministro de aguas industriales al Complejo Jose, además del agua potable, agua para incendios y servicios de remoción de aguas negras a las plantas petroquímicas instaladas en los terrenos propiedad de Pequiven dentro del complejo. Posee una capacidad estimada de 1.300 litros por segundo.

A continuación se presenta un resumen de la estructura participativa de las principales empresas mixtas ubicadas en el Complejo Petroquímico Jose.

**Tabla 1: Estructura participativa de Pequiven Jose**

| EMPRESAS      | PRODUCTOS | CAPACIDAD<br>[MTMA] | USOS   | SOCIOS                        | PARTICIPACIÓN<br>[%] |
|---------------|-----------|---------------------|--|-------------------------------|----------------------|
| Metor         | Metanol   | 750                 | Formaldehído<br>Componente de gasolina MTBE<br>Solvente<br>Acido acético | Pequiven                      | 37,50                |
|               |           |                     |  | Mitsubishi Corporation        | 23,75                |
|               |           |                     |  | Mitsubishi Gas Chemical       | 23,75                |
|               |           |                     |  | Empresas Polar                | 10                   |
|               |           |                     |  | IFC                           | 5                    |
| Supermetanol  | Metanol   | 770                 | Formaldehído<br>Componente de gasolina MTBE<br>Acido acético<br>Solvente | Pequiven                      | 34,51                |
|               |           |                     |  | Ecofuel                       | 34,51                |
|               |           |                     |  | Metanol Holding Ltd.          | 15,49                |
|               |           |                     |  | Petrochemical Investment Ltd. | 15,49                |
| Super Octanos | MTBE      | 550                 | Componente oxigenado de gasolina   | Pequiven                      | 49                   |
|               |           |                     |  | Ecofuel                       | 49                   |
|               |           |                     |  | Banca de Inversión Mercantil  | 2                    |
| FertiNitro    | Amoniaco  | 1200                | Fertilizante   | Pequiven                      | 35                   |
|               | Urea      | 1460                |  | Koch Industries               | 35                   |
|               |           |                     |  | Snamprogetti                  | 20                   |
|               |           |                     |  | Empresas Polar                | 10                   |

### **1.1.5 EL MUELLE PETROQUÍMICO DE JOSE.**

El Muelle Petroquímico de Jose es el proyecto de infraestructura más reciente realizado por Pequiven para exportar los productos petroquímicos de las plantas que operan y se proyectan en el oriente del país.

La obra construida a un costo de 150 millones de dólares está destinada a la exportación de urea, polietilenos, amoníaco, etileno, etilenglicol, dietilenglicol, metanol, MTBE y otros productos químicos de las plantas existentes. Actualmente su uso es destinado exclusivamente para el despacho de urea y amoníaco. El sistema de carga de urea tiene capacidad para despachar 1.000 toneladas métricas por hora y el de amoníaco 1.100 toneladas métricas por hora.

La obra está diseñada con posibilidades de ampliar las tuberías y brazos de carga en etapas sucesivas sobre la plataforma existente, sin afectar la operación regular del muelle. Dentro de dicho marco se encuentra el proyecto referido en este Trabajo Especial de Grado. Adicionalmente, el diseño permite la construcción de una segunda plataforma y extender el muelle de contenedores.

El embarcadero tiene una plataforma de sólidos para despachar urea con capacidad para el atraque simultáneo de un buque y otro de contenedores. La plataforma de líquidos está dispuesta para el atraque de dos naves con productos petroquímicos. En una tercera plataforma de servicios pueden atracar dos remolcadores y una lancha de pasajeros, la cual dispone de una dársena de 60 hectáreas a una profundidad de 14 metros. A las plataformas del muelle tendrán acceso buques de hasta 65 mil toneladas de peso muerto.

El puente marino de concreto armado y pretensado de más de 1.500 metros de longitud, sostiene las plataformas y sirve de conexión con todos los servicios hasta la costa. Descansa sobre pilotes metálicos de 36 y 48 pies.

## 1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 1.2.1 MECÁNICA DE FLUIDOS

#### 1.2.1.1 NATURALEZA DE LOS FLUIDOS [4]

Un *fluido* es una sustancia que sufre una deformación continua cuando está sujeta a un esfuerzo cortante. La resistencia que un fluido real ofrece a tal deformación se conoce con el nombre de *viscosidad* del fluido. Para gases y líquidos simples (bajo peso molecular), la viscosidad es constante cuando se fijan la presión estática y la temperatura. Los materiales de este tipo se denominan *newtonianos*.

Un *fluido ideal* o *perfecto* es un gas o líquido hipotético que no ofrece resistencia al corte y tiene viscosidad cero. En la mayor parte de los problemas de flujo se obtienen resultados incorrectos al despreciar la viscosidad, pero en los mismos problemas pueden utilizarse las relaciones presión-volumen-temperatura para gases ideales.

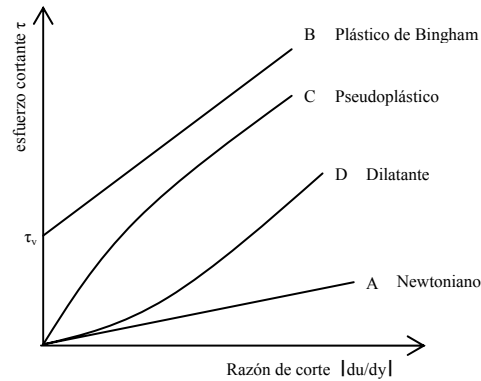
Si la viscosidad de un fluido es una función del esfuerzo cortante, equivalente a la razón de corte, además de la temperatura y presión, el fluido se denomina *no newtoniano*. Los fluidos no newtonianos se dividen generalmente en 3 clases:

1) *Aquellos cuyas propiedades son independientes del tiempo cuando son sometidos a corte, tales como:*

a) Fluidos plásticos de Bingham: probablemente son los fluidos no newtonianos más simples, ya que sólo difieren de los fluidos newtonianos en que su relación lineal entre el esfuerzo cortante y la razón de corte no parten del origen, como se ilustra en curva B de la figura 3, se requiere un esfuerzo cortante  $\tau_y$  finito para que haya flujo. Entre los ejemplos que pueden citarse para un fluido que exhibe comportamiento plástico de Bingham se incluyen suspensiones de arena o granos y lodo de aguas negras.

b) Fluidos pseudo plásticos: aquí se incluyen la mayor parte de los fluidos no newtonianos, entre los que se encuentran las soluciones poliméricas

o fundiciones y suspensiones de pulpa de papel o pigmentos. En la figura 3 se muestra la curva C típica del flujo de estos materiales.



**Figura 3: Diagrama de corte.**

Para estos fluidos, la viscosidad disminuye a medida que aumenta el esfuerzo de corte aplicado. En general, la curva de flujo en un intervalo de razón de corte, puede aproximarse a la forma de la línea recta en un diagrama logarítmico, con lo cual se tiene:

$$\tau = K \left( \frac{du}{dy} \right)^{n-1} \frac{du}{dy} \text{ con } n < 1$$

**Ec. 1**

Donde:  $\tau$  = esfuerzo cortante;  $du/dy$  = gradiente de velocidad;  $K$  = índice de consistencia; y  $n$  = exponente.

c) Fluidos dilatantes: son los que exhiben un comportamiento reológico opuesto al de los materiales pseudo plásticos, es decir, la viscosidad aumenta a medida que aumenta el esfuerzo de corte aplicado. Algunos ejemplos de estos materiales son suspensiones de almidón o mica en agua o arenas movedizas.

2) *Aquellos cuyas propiedades son dependientes de la duración del corte.* Incluye los materiales para los cuales el esfuerzo cambia con la duración de

corte. Se excluyen los cambios que podrían producirse por rompimiento mecánico o destrucción de partículas o enlaces moleculares.

a) Fluidos tixotrópicos: son los que poseen una estructura que puede sufrir un trastorno en función del tiempo bajo corte. Cuando la estructura sufre algún trastorno bajo una razón de corte constante, el esfuerzo cortante decrece. Esta estructura puede reconstruirse a sí misma si cesa la fuerza aplicada sobre el material. Ejemplos de este tipo de fluidos son la mayonesa, lodo de perforación, pinturas y tintas.

b) Materiales reopécticos: son los que incrementan su viscosidad aparente con mucha rapidez cuando son agitados o golpeados rítmicamente. Algunos ejemplos de estos materiales son las suspensiones coloidales de bentonita y pentóxido de vanadio y las suspensiones de yeso en agua.

3) *Fluidos viscoelásticos*: son aquellos que exhiben muchas de las características de un sólido, exhiben recuperación elástica de la deformación que sufren durante el flujo. Los líquidos poliméricos forman la mayor parte de los fluidos de esta clase. En este tipo de fluidos tienen lugar esfuerzos normales, es decir, esfuerzos perpendiculares a la dirección de flujo, además de los esfuerzos tangenciales usuales. Estos esfuerzos provocan varios efectos no usuales, por ejemplo, el “efecto Weissenberg” en que el fluido tiende a escalar un eje que se encuentra girando en el fluido. Las ecuaciones desarrolladas para fluidos pseudo plásticos se pueden aplicar para flujo de fluidos visco elásticos en estado estacionario no acelerado; las propiedades elásticas se manifiestan en forma general como “efectos terminales”.

La unidad de viscosidad dinámica ( $\mu$ ) en el sistema internacional (SI) es el pascal-segundo (Pa·s). Un Pa·s es igual a 10 Poise, 1000 centipoises (cP) o 0,672 lb/(ft.s).

La viscosidad cinemática ( $\nu$ ) de un fluido de densidad  $\rho$  y viscosidad  $\mu$  es  $\nu = \mu/\rho$ . Una unidad de viscosidad cinemática, denominada stoke (St), es igual a  $1\text{cm}^2/\text{s}$ . La fluidez es el recíproco de la viscosidad.

#### 1.2.1.2 TERMINOLOGÍA DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS. [4]

Se dice que un flujo es *estacionario* si no varía con el tiempo, es decir, cuando la velocidad del flujo de masa es constante y todas las demás cantidades (temperatura, presión, área transversal) son independientes del tiempo. Por el contrario, se dice que un flujo es *no estacionario* cuando la velocidad de flujo de masa y/u otras cantidades varían en función del tiempo. El flujo no estacionario puede originarse por la acción de una válvula de control, de una maquinaria reciprocante o por tratarse de un flujo compuesto de dos fases inestables.

Se dice que un flujo es *acelerado* si no es estacionario o si su velocidad varía en la dirección general del flujo. Gran cantidad de efectos asociados con fluidos visco elásticos no newtonianos ocurren por lo general en flujo acelerado.

Se dice que una corriente es *uniforme* si la forma y el tamaño de su sección transversal son iguales a lo largo del canal. Se dice que la temperatura o velocidad es uniforme a lo largo de una región cuando tiene el mismo valor en todas sus partes en un instante dado.

La *velocidad másica media* ( $G$ ) de una corriente que pasa por una sección transversal dada, tomada en sentido perpendicular a la dirección común del flujo que pasa por el aparato, es el cociente del flujo másico entre el área de la sección transversal dada. A lo largo de un canal con un área de sección transversal uniforme, la velocidad media de masa es constante a menos que exista una acumulación o agotamiento de material dentro de canal. Cuando se está considerando el flujo que pasa por un haz de tubos o un lecho de sólidos, se utiliza el término *velocidad másica superficial* para identificar la cantidad obtenida al dividir el flujo másico entre el área

total de la sección transversal de la cámara circundante (sin restar la parte correspondiente al corte transversal ocupado por las obstrucciones).

La *velocidad lineal media* ( $V$ ) de una corriente que pasa por cualquier sección transversal dada, se toma usualmente como la cantidad obtenida cuando la velocidad másica media correspondiente se divide entre la densidad promedio en la sección transversal dada. A menos que el flujo sea isotérmico, el término velocidad lineal media no se puede interpretar salvo que se defina con precisión la regla que se eligió para determinar la densidad promedio. En consecuencia, siempre que sea posible, es preferible manejar el flujo no isotérmico en función de la velocidad de masa. La *velocidad lineal superficial* corresponde a la velocidad superficial másica.

La *carga de velocidad*  $\left( V^2 / 2g_c \right)$  es la carga estática equivalente a la energía cinética de una corriente de velocidad uniforme  $V$ .

Un *número de Reynolds* ( $N_{Re}$ ) es cualquiera de varias cantidades adimensionales de la forma  $LV\rho/\mu$  que son proporcionales a la razón de la fuerza inercial a la fuerza viscosa en un sistema de flujo. En este caso,  $L$  = dimensión lineal característica del canal de flujo.

Se puede predecir la transición de flujo turbulento a laminar en fluidos no newtonianos, de acuerdo con el concepto del número de Reynolds. Se toma como régimen laminar  $N_{Re} < 2100$  y para régimen turbulento  $N_{Re} > 4000$ .

El *radio hidráulico medio* ( $R_H$ ) de un canal es igual al área de la sección transversal de esa parte del canal que está llena con fluido, dividida entre la longitud del perímetro húmedo. El radio hidráulico de una tubería circular es un cuarto del diámetro; de donde, en el caso de un ducto no circular, se dice que el *diámetro hidráulico* es cuatro veces el radio hidráulico.

La *línea aerodinámica* se define como aquella que queda en la dirección del flujo en cada uno de los puntos en un instante dado. El *flujo laminar* se define como aquel en el que las líneas aerodinámicas se mantienen bien definidas unas de otras en

toda su longitud. Las líneas aerodinámicas no deben ser rectas necesariamente, ni el flujo constante, siempre y cuando se satisfaga el criterio antes citado. Este tipo de movimiento se conoce también con los nombres de *flujo aerodinámico* o *viscoso*.

Un flujo laminar con  $N_{Re} < 1$ , se conoce como *flujo lento* o flujo reptante. En este tipo de flujo se puede despreciar la fuerza inercial relativa a la fuerza viscosa.

Si el número de Reynolds de un sistema excede al número crítico de Reynolds, casi siempre sucede que el movimiento no es laminar en toda la longitud del canal, sino que se generan turbulencias en la zona inicial de inestabilidad, que se extienden rápidamente por todo el fluido produciendo con ello una perturbación en el patrón general de flujo. El resultado es una turbulencia del fluido superpuesta al movimiento primario de traslación, generando lo que se conoce como *flujo turbulento*.

## 1.2.2 DINÁMICA DE FLUIDOS.

### 1.2.2.1 BALANCE DE ENERGÍA. [4]

#### 1.2.2.1.1 Balance total de energía.

Considérese una unidad de peso de fluido en un sistema de flujo y sean:  $i$ =entalpía específica,  $J$ = equivalente mecánico de calor,  $s$ = entropía específica,  $u$ =energía interna específica,  $v$ = volumen específico,  $Z$ = altura por arriba de cualquier plano de referencia horizontal arbitrario. En este caso, la energía potencial relativa al nivel de referencia elegido es  $Zg/g_c$ , la energía total cinética es  $V^2/2g_c$ , y la energía total de la unidad de peso de fluido es  $\left( Ju + Zg/g_c + V^2/2g_c \right)$ . Para un flujo estacionario del fluido no se tendrá ninguna acumulación o deficiencia, ya sea de éste o de la energía dentro del sistema y la energía total del mismo se alterará sólo

agregando o quitando calor de éste o aplicando cualquier trabajo externo sobre el sistema. Por tanto,

$$\left( Ju_2 + \frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{V_2^2}{2g_c} \right) - \left( Ju_1 + \frac{Z_1 g}{g_c} + \frac{V_1^2}{2g_c} \right) = JQ + W \quad \text{Ec. 2}$$

donde los subíndices 1 y 2 indican las condiciones en la entrada y salida, respectivamente;  $Q$  es el calor agregado utilizando fuentes externas al sistema;  $W$  es el trabajo externo neto, aplicando a una libra de fluido mientras está dentro del aparato. El término  $W$  se subdivide como sigue

$$W = p_1 v_1 - p_2 v_2 + W_e \quad \text{Ec. 3}$$

donde  $W_e$  = trabajo proporcionado por una fuente externa, por ejemplo, un ventilador o una bomba.

Si se combinan las ecuaciones 2 y 3, se obtiene:

$$Ju_1 + \frac{Z_1 g}{g_c} + \frac{V_1^2}{2g_c} + p_1 v_1 + JQ + W_e = Ju_2 + \frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{V_2^2}{2g_c} + p_2 v_2 \quad \text{Ec. 4}$$

Esta expresión de la primera ley de la termodinámica; se denomina a menudo balance global de energía del teorema de Bernoulli. En esta expresión no se incluye ningún término de fricción, ya que éste representa una conversión de energía mecánica en calor sin que el contenido general de energía del sistema sufra cambio alguno.

Los términos de energía cinética de las ecuaciones antes citadas se aplican estrictamente sólo cuando la velocidad a través de una sección transversal dada es uniforme. Cuando se trata de un flujo turbulento en tuberías circulares, el término  $V^2/2g_c$ , es de 3 a 8% por debajo del valor real, en tanto que para un flujo laminar en tuberías circulares, el término de energía cinética apropiado es  $V^2/g_c$ , que permite cierto margen para la distribución de velocidad parabólica.

### 1.2.2.1.2 Balance de energía mecánica.

El cambio de energía interna  $J du$  de una libra de fluido se expresa como  $JT ds - p dv$ . Si están presentes otras formas de energía, por ejemplo, la eléctrica, y sufre un cambio, tales formas deberán incluirse también. La presencia de fricción hace que el proceso se torne irreversible, de donde  $JT ds = J dq + dF$ , donde  $F$ =pérdida de fricción. Tomando en consideración esta pérdida de fricción y la situación de irreversibilidad, la ecuación de balance de masa se convierte en

$$\frac{Z_1 g}{g_c} + \frac{V_1^2}{2g_c} - \int_1^2 v \partial p - F + W_e = \frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{V_2^2}{2g_c} \quad \text{Ec. 5}$$

La ecuación 5 se denomina forma de *energía mecánica del teorema de Bernoulli*. Para líquidos, la integral  $\int_1^2 v \partial p$  se reduce a  $v(p_2 - p_1)$ , donde  $v$  es prácticamente constante.

### 1.2.2.1.3 Evaluación de la caída de presión en el sistema.

Existe una distinción real entre la caída de presión y la pérdida por fricción. La caída de presión representa una conversión de energía de presión en cualquier otra forma de energía, mientras que la pérdida por fricción representa una pérdida neta de la energía de trabajo total disponible que caracteriza al fluido. Los dos términos se relacionan entre sí por medio de la ecuación 5.

Hay dos métodos para evaluar la caída general de presión de un sistema si se recurre a varias resistencias en serie. El primer método comprende el cálculo de la caída de presión de cada resistencia individual, tomando en cuenta el signo algebraico correspondiente y luego sumando todos los términos que componen el sistema total. El segundo método consiste en calcular la pérdida por fricción de cada resistencia individual, la suma de todos los términos particulares y la aplicación de la ecuación 5 para obtener la caída de presión general. La suma de las caídas de presión puede utilizarse en sistemas compuestos de líneas ramificadas.

## 1.2.2.2 FLUJO EN TUBERÍAS. [4]

## 1.2.2.2.1 Distribución de velocidad en tuberías circulares.

En el caso de flujo laminar en tuberías circulares, el patrón de velocidad tiene forma parabólica con una velocidad máxima en el centro e igual a dos veces la velocidad promedio ( $V$ ). La velocidad local ( $u$ ) en cualquier punto de la sección transversal está expresada por

$$\frac{u}{V} = 2 \left( 1 - \frac{r^2}{r_w^2} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

donde  $r$ = radio en el punto en cuestión y  $r_w$ = radio de la tubería.

## 1.2.2.2.2 Flujo incompresible.

El flujo se considerará como incompresible si: la sustancia en movimiento es un líquido, o si se trata de un gas cuya densidad cambia dentro del sistema en un valor no mayor de 10%. En este caso, se utiliza la densidad de entrada, el error resultante en la caída de presión calculada no sobrepasará por lo común los límites de incertidumbre del factor de fricción.

## 1.2.2.2.3 Tuberías circulares.

La ecuación de Fanning para flujo estacionario en tuberías circulares uniformes que corren llenas de líquido en condiciones isotérmicas

$$F = \left( \frac{4fL_1}{D} \right) \frac{V^2}{2g_c} = \left( \frac{4fL_1}{D} \right) h_v = \left( \frac{4fL_1}{D} \right) \frac{G^2}{2g_c \rho^2} = \frac{32fL_1 \omega^2}{\pi^2 \rho^2 g_c D^5} = \frac{32fL_1 q^2}{\pi^2 g_c D^5} \quad \text{Ec. 7}$$

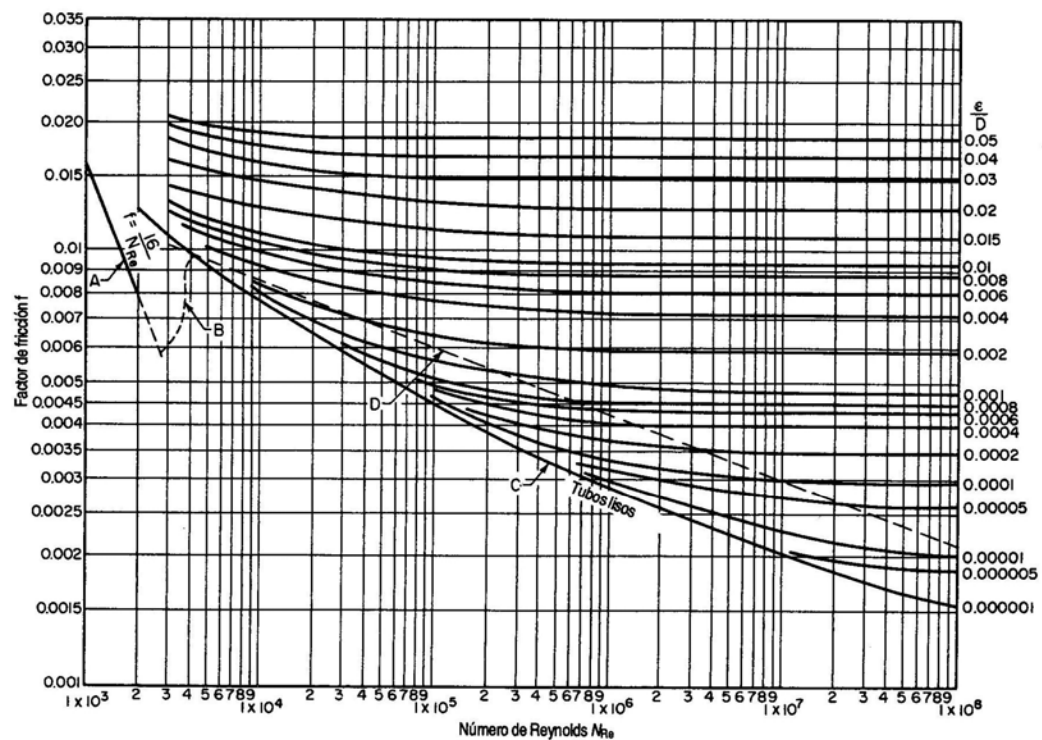
expresa la pérdida por fricción  $F$  en energía específica, donde  $D$ = diámetro del conducto;  $L_1$ = longitud del conducto;  $h_v$ = carga de velocidad ( $V^2/2g_c$ );  $\omega$ = flujo en peso del fluido;  $q$ = flujo volumétrico del fluido;  $f$ = factor de fricción de Fanning. La caída de presión debida a la fricción es  $\Delta p = F\rho$ .

El factor de fricción de Fanning  $f$  es una función del número de Reynolds y la aspereza de la superficie interna del canal ( $\epsilon$ ). Una correlación que se utiliza con mucha frecuencia, es el diagrama de Moody, que es una gráfica del factor de fricción

de Fanning en función del número de Reynolds y la aspereza relativa  $\varepsilon/D$ , tal como se muestra en la figura 4. En la tabla 2 se presentan valores de  $\varepsilon$  para varios materiales.

**Tabla 2. Valores de aspereza superficial para varios materiales.**

| Material   | Asperezura de superficie $\varepsilon$ , [mm] |
|--|---|
| Tubos estirados (latón, plomo, vidrio y similares) | 0,00152                                       |
| Acero comercial o hierro                           | 0,0457  |
| Hierro fundido asfaltado                           | 0,122   |
| Hierro galvanizado                                 | 0,152   |
| Hierro fundido                                     | 0,259   |
| Duelas de madera                                   | 0,183 - 0,0914                                |
| Concreto   | 0,305 - 3,05                                  |
| Acero remachado                                    | 0,914 - 9,14                                  |



**Figura 4. Diagrama de Moody.**

El diagrama de Moody para flujo turbulento ( $N_{Re} > 4000$ ) se representa por medio de la ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{N_{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

La ecuación anterior se reduce a la ecuación de Prandtl, cuando  $\varepsilon/D=0$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left( \frac{1,256}{N_{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Para tuberías rugosas, se aplica la ecuación de von Kármán:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} \right) \quad \text{Ec. 10}$$

Cuando se tiene especificada la velocidad del flujo, el factor de fricción puede ser calculado mediante la ecuación 11:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 3,60 \log \left( \frac{N_{Re}}{7} \right) \quad \text{Ec. 11}$$

O para  $N_{Re} \leq 10^5$  mediante la ecuación de Blasius:

$$f = \frac{0,0791}{N_{Re}^{1/4}} \quad \text{Ec. 12}$$

Para flujo turbulento ( $N_{Re} > 4000$ ), se han desarrollado las ecuaciones siguientes, explícitas en las incógnitas. Para el cálculo del flujo,

$$\frac{q}{D^2 \sqrt{gDS_f}} = \frac{-\pi}{\sqrt{2} \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{1,78\nu}{D \sqrt{gDS_f}} \right)} \quad \text{Ec. 13}$$

donde  $S_f$  = altura de la carga de fluido perdida por unidad de longitud de ducto ( $\Delta p g / \rho g L$ ).

Para el cálculo de la caída de presión debida a la fricción, se cuenta con la ecuación:

$$\frac{D^5 g S_f}{q^2} = \frac{0,203}{\left[ \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{N_{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ec. 14}$$

el error introducido al aplicar esta ecuación es menor de  $\pm 1\%$  para el intervalo  $5 \times 10^3 \leq N_{Re} \leq 10^8$ ,  $10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 10^2$

Para el cálculo del diámetro del ducto se tiene:

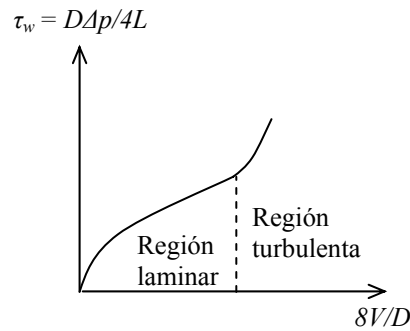
$$\frac{D^5 g S_f}{q^2} = 0,125 \left[ \left( \frac{\varepsilon^5 g S_f}{q^2} \right)^{0,25} + \left( \frac{v^5}{q^3 g S_f} \right)^{0,20} \right]^{0,20} \quad \text{Ec. 15}$$

el error que se tiene al aplicar esta ecuación es menor que  $\pm 2\%$  para el intervalo  $3 \times 10^3 \leq N_{Re} \leq 3 \times 10^8$ ,  $2 \times 10^{-6} \leq \varepsilon/D \leq 2 \times 10^2$

Para verificaciones o estimaciones aproximadas, el concepto *carga de velocidad* puede aplicarse a la primera de las dos formas de la ecuación 7.

#### 1.2.2.2.4 Fluidos no newtonianos.

Mediante la figura 5 es posible determinar la caída de presión debida a la fricción para el flujo laminar de fluidos no newtonianos en tuberías circulares. Ésta muestra una curva de flujo típica en coordenadas cartesianas.  $D\Delta p/4L$  es el esfuerzo cortante en la pared  $\tau_w$ , y  $\delta V/D$  es la relación para la razón de corte en la pared.



**Figura 5. Curva de flujo general.**

La curva de flujo se determina a partir de pruebas de laboratorio o a pequeña escala con el fluido no newtoniano específico.

En la región laminar, la curva es independiente del diámetro de la tubería, en el caso de fluidos no newtonianos independientes del tiempo. Si el fluido depende del tiempo, se obtendrá una curva por separado para cada diámetro y longitud de tubería.

Para plásticos de Bingham, la ecuación teórica del flujo es

$$\frac{8V}{D} = \frac{g_c \tau_w}{\eta} \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_y}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^4 \right] \quad \text{Ec. 16}$$

Si  $\left( \frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^4$  es relativamente pequeña, por ejemplo, en caso de esfuerzos cortantes grandes o caídas de presión, la ecuación puede ser aproximada por

$$\frac{8V}{D} = \frac{g_c}{\eta} \left( \tau_w - \frac{4}{3} \tau_y \right) \quad \text{Ec. 17}$$

El error causado al omitir el último término de la ecuación es inferior al 2% para  $\tau_y/\tau_w$  menor a 0,4. La viscosidad aparente  $\mu_a$  se obtiene al introducir la ecuación anterior en la ecuación de Poiseuille,

$$\mu_a = \left( \frac{g_c \tau_y D}{6V} \right) + \eta \quad \text{Ec. 18}$$

En estas ecuaciones,  $\Delta p$ = caída de presión estática,  $\eta$ = viscosidad plástica y  $\tau_y$ = esfuerzo de cedencia.

Para aquellos fluidos a los que se aplica la ley de potencia sirve la ecuación:

$$\frac{D\Delta p}{4L} = K' \left( \frac{8V}{D} \right)^{n'} \quad \text{Ec. 19}$$

donde

$$K' = K \left( \frac{3n' + 1}{4n'} \right)^{n'} \quad \text{Ec. 20}$$

$$n' = \frac{\partial \left[ \ln \left( \frac{D\Delta p}{4L} \right) \right]}{\partial \left[ \ln \left( \frac{8V}{D} \right) \right]} = n \quad \text{Ec. 21}$$

$$\left( - \frac{\partial u}{\partial r} \right)_w = \left( \frac{3n' + 1}{4n'} \right) \left( \frac{8V}{D} \right) \quad \text{Ec. 22}$$

$n'$  = exponente de la ley de potencia, pendiente de la línea de la gráfica de  $D\Delta p/4L$  contra  $8V/D$  en coordenadas logarítmicas;  $\left( - \frac{\partial u}{\partial r} \right)_w$  = razón del esfuerzo cortante en la pared;  $K'$  = constante. Si  $n' = 1$ , el fluido será newtoniano; si  $n' < 1$  se tratará de un fluido pseudo plástico o plástico de Bingham; y cuando  $n' > 1$ , el fluido será dilatante.

El límite de flujo laminar constante o estable se toma comúnmente como  $N'_{Re} = 2100$ , donde

$$N'_{Re} = \text{número de Reynolds generalizado} = D^{n'} V^{2-n'} \frac{\rho}{\gamma} \quad \text{Ec. 23}$$

$$\gamma = g_c K' 8^{n'-1} \quad \text{Ec. 24}$$

o bien,  $N'_{Re} = DV\rho / \mu_a = 2100$  para plásticos de Bingham.

En flujos turbulentos, la curva de flujo general (Fig. 5) se interrumpe. El punto de interrupción será diferente para distintos diámetros de tubería. Para predecir la caída de presión del flujo turbulento de fluidos no newtonianos independientes del tiempo, el factor de fricción de Fanning se obtiene del diagrama de Moody aplicando el número generalizado de Reynolds. Para fluidos que se comportan como plásticos de Bingham,  $n' \approx 1$  en flujo turbulento, la caída de presión puede predecirse a partir de la correlación de fricción de Fanning para fluidos newtonianos, utilizando para la viscosidad del fluido la viscosidad plástica ( $\eta$ ).

Se puede lograr una reducción de la pérdida por fricción en flujos turbulentos de líquidos newtonianos, agregando polímeros solubles de alto peso molecular en concentraciones extremadamente reducidas. En estos sistemas, el acuerdo general es que el comportamiento de reducción de arrastre se asocia con la naturaleza viscoelástica de las soluciones en la región de corte, cercana a la pared. Es necesario un polímero de peso molecular mínimo para iniciar la reducción de arrastre con un flujo específico. Existe una concentración crítica por encima de la cual no ocurre la reducción de arrastre. Para determinar la reducción de arrastre máxima en tuberías lisas, se aplica la siguiente ecuación

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -19 \log \left( \frac{50.73}{N_{Re} \sqrt{f}} \right) \quad \text{o aproximadamente} \quad f = \frac{0.58}{N_{Re}^{0.58}} \quad \text{Ec. 25}$$

para  $4000 < N_{Re} < 40.000$

#### 1.2.2.2.5 Flujo no isotérmico.

En flujos no isotérmicos de líquidos,  $f$  se incrementa sensiblemente cuando el líquido se está enfriando y disminuye al calentarse. Los datos disponibles, que corresponden mayormente a aceites, se calculan de manera aproximada encontrando primero  $f$  para el flujo isotérmico del líquido a la temperatura de la corriente principal y luego dividiendo el resultado, en caso de enfriamiento, entre  $(\mu_a/\mu_w)^{0,23}$  si se encuentra en la región laminar o por  $(\mu_a/\mu_w)^{0,11}$  si está en la región turbulenta; o bien, en casos de calentamiento, por  $(\mu_a/\mu_w)^{0,38}$  si se trata de la región laminar o por  $(\mu_a/\mu_w)^{0,17}$  si es la turbulenta. En este caso,  $\mu_a$  es la viscosidad a la temperatura de la

corriente principal y  $\mu_w$  es la viscosidad a la temperatura de la pared. Además,  $\rho=1/v$  varía con la temperatura, pero debido a la incompresibilidad, no lo hace con la presión. Por lo tanto, la ecuación 26 se utiliza para calcular la caída de presión en conductos de caudal completo, por ejemplo, tubos intercambiadores de calor.

$$p_1 - p_2 = \frac{G^2(v_2 - v_1)}{g_c} + \frac{fG^2 v_{prom} L}{2g_c R_H} + \frac{g}{g_c} k \rho_{prom} L \quad \text{Ec. 26}$$

Donde  $p_1$ = presión estática corriente arriba;  $p_2$ = presión estática corriente abajo;  $v_1$ = volumen específico en condiciones corriente arriba;  $v_2$ = volumen específico en condiciones corriente abajo;  $v_{prom}$ = volumen específico promedio;  $\rho_{prom}$ = densidad promedio;  $K= \text{sen } \theta$ , en donde  $\theta$ = ángulo de inclinación respecto a la horizontal.

El flujo de líquidos viscosos en canales pequeños, por ejemplo tubos capilares, va acompañado con frecuencia de grandes caídas de presión. La conversión de la energía de trabajo en calor a través del esfuerzo cortante viscoso genera un aumento de temperatura apreciable  $\Delta T_a = \Delta p / c_v \rho J$ , en donde  $\Delta T_a$ = aumento global de la temperatura y  $c_v$ = calor específico del fluido. El aumento en la velocidad de flujo debido a una reducción de viscosidad es mucho mayor que la que corresponde al aumento global de temperatura, ya que gran parte del calor se genera cerca de las paredes del canal, lo cual genera un aplanamiento del perfil de velocidad.

#### 1.2.2.2.6 Flujo turbulento.

Las fórmulas y los métodos generales incluidos bajo el título “flujo incompresible” se aplican sólo a una longitud diferencial del conducto, a través del cual se considera que la densidad es constante. Por ende, generalmente se usa la ecuación de Fanning en su forma diferencial:

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \frac{4fV^2}{2g_c D} = \frac{fV^2}{2g_c R_H} = \frac{fG^2}{2g_c \rho^2 R_H} \quad \text{Ec. 27}$$

Al sustituir esta última ecuación en la forma diferencial del balance de energía mecánica, se tiene

$$v \partial p + \frac{V \partial V}{g_c} = - \left( \frac{fV^2}{2g_c R_H} + \frac{g}{g_c} \text{sen } \theta \right) \partial x \quad \text{Ec. 28}$$

donde  $v = 1/\rho =$  volumen específico del fluido,  $(\text{sen } \theta) dx = dz =$  distancia vertical, a través de la cual el fluido se eleva cuando se desplaza a una distancia  $dx$  a lo largo de una tubería;  $W_e$  del balance de energía se iguala a cero, suponiendo que no hay ninguna bomba conectada a la línea. En ductos uniformes, la velocidad de masa  $G = V/v$  es constante, de manera que, si  $p$  se conoce como una función exclusiva de  $v$ ,  $v dp$  se escribe como  $\varphi(v)dv$ . En tal caso, cuando  $\text{sen } \theta$  es constante, las variables de la ecuación anterior son separables y se puede hacer la integración exacta, aunque pudieran requerirse procedimientos gráficos.

#### 1.2.2.2.7 Flujo isotérmico en conductos horizontales (para gases ideales).

Al integrar la última ecuación, para el caso de gases ideales, se obtiene la siguiente expresión

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{fLG^2 RT}{g_c R_H M} \left( 1 + \frac{2R_H}{fL} \ln \frac{p_1}{p_2} \right) \quad \text{Ec. 29}$$

En conductos de longitud apreciable, el último término entre paréntesis es generalmente despreciable a menos que la caída de presión sea muy grande. Por ejemplo, si  $L/D = 100$ ,  $(p_1 - p_2)/p_1$ , puede ser tan grande como 0,20 antes que el error introducido al omitir el último término sea tan grande como la incertidumbre del factor de fricción. Cuando se omite el último término, la ecuación se describe como sigue

$$p_1 - p_2 = \frac{fLG^2}{2g_c \rho_{prom} R_H} \quad \text{Ec. 30}$$

donde  $\rho_{prom} =$  densidad a la presión promedio  $(p_1 - p_2)/2$ . Para una tubería circular.

#### *1.2.2.2.8 Diámetro económico de la tubería: flujo turbulento.*

Al seleccionar el tamaño de tubería que va a utilizarse en un sistema de manejo de fluidos, se tiene con frecuencia una variedad de diámetros permisibles que comprenden dos o más tamaños estándar de tubería. En tales casos, la selección final deberá realizarse sobre una base económica, de modo que el último incremento de la inversión reduzca los costos de operación lo suficiente para producir la recuperación mínima requerida sobre la inversión. Cuando se trata de líneas de tuberías largas que se tienden a campo traviesa, utilizando tuberías de aleación de longitud y complejidad apreciable o tuberías con válvulas de control, conviene efectuar análisis detallados de la inversión y los costos de operación.

#### *1.2.2.2.9 Diámetro económico de la tubería: flujo laminar.*

Las líneas de tubería para el transporte de líquidos de gran viscosidad en plantas químicas o refinerías de petróleo, raramente se diseñan basándose en forma exclusiva en los aspectos económicos. Sucede más a menudo que el tamaño está condicionado por la caída de presión disponible, limitaciones del esfuerzo cortante o por consideraciones del tiempo de residencia. [4]

#### *1.2.2.2.10 Pérdidas de presión diversas.*

Las determinaciones experimentales de la resistencia de accesorios y válvulas usualmente se llevan a cabo midiendo la pérdida general por fricción en un sistema constituido de dos o más longitudes de tubería recta conectadas en serie por medio de un número apropiado de accesorios o válvulas idénticos. Para obtener la pérdida producida por estos elementos, la pérdida por fricción en una tubería recta se resta de la pérdida general o total por fricción. Existen tres convenios específicos ya establecidos para calcular la longitud de la tubería recta del sistema de prueba:

- 1) Se toma la longitud verdadera de la línea central de todo el sistema.
- 2) Se suman las longitudes de los tramos individuales de tubería que son verdaderamente rectos.

- 3) Se suman las distancias entre las intersecciones de las líneas centrales alargadas correspondientes a tuberías rectas sucesivas.

#### 1.2.2.2.11 Accesorios y válvulas.

Para flujo turbulento, la pérdida adicional por fricción producida por accesorios y válvulas se justifica expresando la pérdida ya sea como una longitud equivalente de tubería recta en diámetros de tubería,  $L_e/D$ , o como la cantidad de cargas de velocidad ( $K_l$ ), pérdidas en una tubería del mismo tamaño.  $K_l$  se define como sigue

$$K_l = \frac{\Delta F}{V^2 / 2g_c} \quad \text{Ec. 31}$$

donde  $\Delta F$ = pérdida adicional por fricción (pérdida total por fricción menos pérdida por fricción correspondiente a la longitud de la línea central de la tubería recta). Las cantidades  $L_e/D$  y  $K_l$  no son del todo comparables, pero ambas son exactas dentro de los límites de los datos disponibles o diferentes en detalles a los accesorios y válvulas comerciales existentes. Teóricamente,  $K_l$  deberá ser constante para todos los tamaños de un diseño de accesorios o válvulas dadas, si todos ellos fueran geoméricamente similares; sin embargo, raramente se logra esa similitud geométrica. Los datos indican que la resistencia  $K_l$  tiende a disminuir al incrementarse el tamaño del accesorio o la válvula.

Para líneas fuera de planta, la longitud de tubería recta aproximada puede ser estimada del plano de distribución. Debido a que los accesorios en líneas fuera de planta tienen usualmente una longitud equivalente comprendida entre 20% y 80% de la longitud real, se puede aplicar un factor multiplicador entre 1,2 y 1,8 para estimar longitudes de tuberías rectas. [2]

La tabla 3 muestra valores de longitudes equivalentes de tubería recta nueva para pérdida por fricción en válvulas y accesorios, en pies para acero al carbón, con rugosidad= 0,0018 in (para flujo completamente turbulento), según el diámetro de la tubería.

**Tabla 3: Longitud Equivalente de tubería recta, (ft).**

| TAMANO NOMINAL (PULGADAS)                | 1                 | 2                 | 3                 | 4                 | 6                   | 8                 | 10                | 12                | 14                | 16                | 18                | 20                | 24                | 30                | 36                | 42                | 48                | 54                | 60                | 66                | 72                | 84                | 96                | 108               | 120               |  |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|
| DIAMETRO INTERNO (PULGADAS)              | 1,049             | 2,067             | 3,068             | 4,026             | 6,065               | 7,981             | 10,02             | 12,0              | 13,25             | 15,25             | 17,25             | 19,25             | 23,25             | 29,25             | 35,25             | 41,25             | 47,25             | 53,25             | 59,25             | 65,125            | 71,125            | 83,125            | 95,0              | 107,0             | 119,0             |  |
| CALIBRE                                  |                   |                   |                   | 40                |                     |                   |                   |                   | 30                | 30                | 20                | 20                | 20                | 10                |                   |                   | 3/8" PARED        |                   |                   |                   | 7/16" PARED       |                   |                   | 1/2" PARED        |                   |  |
| ACCESORIOS DE BRIDAS                     |                   |                   |                   |                   |                     |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |                   |  |
| CODO 90° REGULAR                         | 2,0               | 4,1               | 6,1               | 8,1               | 12                  | 16                | 20                | 25                | 27                | 31                | 35                | 39                | 47                | 57                | 71                | 83                | 94                | 107               | 121               | 132               | 144               | 165               | 185               | 207               | 227               |  |
| CODO 90° RADIO LARGO                     | 1,6               | 3,1               | 4,6               | 5,8               | 8,6                 | 11                | 14                | 16                | 18                | 20                | 22                | 25                | 29                | 36                | 43                | 50                | 56                | 63                | 71                | 77                | 83                | 94                | 106               | 116               | 126               |  |
| CODO 45° REGULAR                         | 0,86              | 2,0               | 2,8               | 3,7               | 5,8                 | 7,9               | 10                | 12                | 13                | 16                | 18                | 20                | 24                | 31                | 37                | 45                | 51                | 58                | 67                | 73                | 80                | 93                | 106               | 120               | 132               |  |
| T" DE LINEA DE FLUJO                     | 1,7               | 2,8               | 3,9               | 5,5               | 8,4                 | 11                | 14                | 17                | 18                | 21                | 24                | 26                | 32                | 39                | 48                | 55                | 63                | 71                | 81                | 89                | 95                | 110               | 124               | 138               | 151               |  |
| T" DE RAMAL DE FLUJO                     | 5,2               | 10                | 15                | 20                | 30                  | 40                | 50                | 60                | 66                | 76                | 86                | 96                | 116               | 146               | 176               | 204               | 236               | 266               | 296               | 326               | 356               | 416               | 475               | 535               | 595               |  |
| REGULAR                                  | 3,4               | 6,9               | 10                | 14                | 21                  | 28                | 33                | 42                | 46                | 53                | 60                | 67                | 81                | 102               | 117               | 145               | 164               | 187               | 210               | 231               | 253               | 291               | 330               | 368               | 401               |  |
| RADIO LARGO                              | 2,7               | 5,1               | 7,4               | 9,6               | 14                  | 19                | 23                | 28                | 30                | 36                | 38                | 42                | 51                | 62                | 74                | 86                | 97                | 110               | 124               | 133               | 145               | 165               | 184               | 205               | 225               |  |
| VALVULA DE GLOBO                         | 35                | 70                | 105               | 135               | 200                 | 270               | 340               | 400               | 450               | 525               | 590               | 655               | 800               | 950               | 1190              | 1395              | 1590              | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 |  |
| VALVULA DE COMPUERTA                     | 1,0               | 2,0               | 2,7               | 3,5               | 5,5                 | 7,1               | 8,8               | 11                | 12                | 13                | 15                | 17                | 20                | 25                | 31                | 36                | 40                | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 |  |
| VALVULA ANGULAR                          | 18                | 35                | 50                | 67                | 100                 | 130               | 170               | 200               | 220               | 250               | 290               | 320               | 390               | 490               | 590               | 690               | 790               | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 |  |
| VALVULA DE RETENCION DESLIZANTE          | 12                | 23                | 35                | 45                | 68                  | 90                | 113               | 135               | 149               | 172               | 194               | 217               | 262               | 329               | 397               | 464               | 532               | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 | -                 |  |
| ENTRADA BIEN REDONDA                     | 0,6               | 0,36              | 0,59              | 0,82              | 1,4                 | 1,9               | 2,5               | 3,1               | 3,5               | 4,2               | 4,8               | 5,4               | 6,9               | 9,0               | 11                | 14                | 16                | 19                | 22                | 24                | 27                | 32                | 37                | 42                | 47                |  |
| ENTRADA LIGERA REDONDA                   | 0,92              | 2,1               | 3,2               | 4,6               | 8,3                 | 11                | 14                | 18                | 20                | 24                | 28                | 31                | 40                | 52                | 64                | 81                | 92                | 110               | 127               | 138               | 156               | 184               | 213               | 242               | 270               |  |
| ENTRADA FILAS RECTAS                     | 2,0               | 4,5               | 7,4               | 10                | 18                  | 24                | 31                | 39                | 44                | 53                | 60                | 68                | 86                | 113               | 138               | 175               | 200               | 238               | 275               | 300               | 338               | 400               | 463               | 525               | 586               |  |
| PROJ INT DE ENTRADA TUB                  | 3,1               | 7,0               | 12                | 16                | 27                  | 37                | 49                | 60                | 68                | 82                | 94                | 105               | 135               | 175               | 215               | 273               | 312               | 370               | 429               | 468               | 527               | 624               | 722               | 819               | 917               |  |
| SALIDA TUBERIA                           | 4,0               | 9,0               | 15                | 20                | 36                  | 48                | 62                | 78                | 88                | 106               | 120               | 136               | 172               | 226               | 276               | 350               | 400               | 476               | 550               | 600               | 676               | 800               | 926               | 1050              | 1176              |  |
| LIMITE DE FLUJO COMPLETAMENTE TURBULENTO | 7x10 <sup>3</sup> | 9x10 <sup>3</sup> | 1x10 <sup>4</sup> | 2x10 <sup>4</sup> | 2,5x10 <sup>4</sup> | 3x10 <sup>4</sup> | 4x10 <sup>4</sup> | 6x10 <sup>4</sup> | 9x10 <sup>4</sup> | 1x10 <sup>5</sup> | 1x10 <sup>5</sup> | 1x10 <sup>5</sup> | 2x10 <sup>5</sup> | 3x10 <sup>5</sup> | 4x10 <sup>5</sup> | 5x10 <sup>5</sup> | 5x10 <sup>5</sup> | 6x10 <sup>5</sup> | 7x10 <sup>5</sup> | 8x10 <sup>5</sup> | 9x10 <sup>5</sup> | 1x10 <sup>6</sup> | 1x10 <sup>6</sup> | 2x10 <sup>6</sup> | 2x10 <sup>6</sup> |  |
| FACTOR DE FRICCIÓN DE FANNING            | 0,0056            | 0,0047            | 0,0040            | 0,0041            | 0,0037              | 0,0035            | 0,0035            | 0,0032            | 0,00315           | 0,00305           | 0,003             | 0,0029            | 0,0028            | 0,0027            | 0,0026            | 0,0025            | 0,0024            | 0,0023            | 0,0022            | 0,00225           | 0,0022            | 0,00219           | 0,00215           | 0,00212           | 0,0021            |  |

\* Tomado del Manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA. Volumen 13-III. L-TP 1.5.

Cálculo Hidráulico de Tuberías. Procedimiento de Ingeniería.

### 1.2.3 BOMBEO DE LÍQUIDOS.

#### 1.2.3.1 PRINCIPIOS DEL BOMBEO DE LÍQUIDOS. [4]

La necesidad de bombear fluidos surge de la necesidad de transportar éstos de un lugar a otro a través de ductos o canales. El movimiento de un fluido a través de un ducto o canal se logra por medio de una transferencia de energía. Los medios comúnmente empleados para lograr flujo en los fluidos son: gravedad,

desplazamiento, fuerza centrífuga, fuerza electromagnética, transferencia de cantidad de movimiento (momento), impulso mecánico o combinaciones de estos medios. Después de la gravedad, el medio más empleado es la fuerza centrífuga.

#### *1.2.3.1.1 Desplazamiento.*

La descarga de un fluido de recipiente mediante desplazamiento parcial o total de su volumen interno con un segundo flujo o por medios mecánicos es el principio de funcionamiento de muchos dispositivos de transporte de fluidos. En este grupo se incluyen máquinas de diafragma y de pistón de movimiento alternativo, los tipos de engranajes y paletas giratorias, los compresores de pistón para fluidos, los depósitos ovalados para ácidos y los elevadores por acción de aire.

#### *1.2.3.1.2 Fuerza centrífuga.*

Cuando se utiliza fuerza centrífuga, ésta es proporcionada por medio de una bomba centrífuga o de un compresor. Aunque varía mucho el aspecto físico de los diversos tipos de compresores y bombas centrífugas la función básica de cada uno de ellos es siempre la misma, es decir, producir energía cinética mediante la acción de una fuerza centrífuga y, a continuación, convertir parcialmente esta energía en presión, mediante la reducción eficiente de la velocidad, del fluido en movimiento.

En general, los dispositivos centrífugos de transporte de fluidos tienen las características siguientes:

1. La descarga está relativamente libre de pulsaciones.
2. El diseño mecánico se presta a flujos elevados, lo que significa que las limitaciones de capacidad constituyen raramente un problema.
3. Pueden asegurar un desempeño eficiente a lo largo de un intervalo amplio de presiones y capacidades, incluso cuando funcionan a velocidad constante.
4. La presión de descarga es una función de la densidad del fluido.
5. Son dispositivos de velocidad relativamente baja y más económicos.

### 1.2.3.2 SELECCIÓN DE LA BOMBA.

Al escoger bombas para cualquier servicio, es necesario saber qué líquido se va a manejar, cuál es la carga dinámica total, las cargas de succión y descarga y, en la mayor parte de los casos, la temperatura, la viscosidad, la presión de vapor y la densidad relativa. La tarea de selección de bombas se complica con frecuencia, por la presencia de sólidos en el líquido y las características de corrosión del líquido que exigen materiales especiales de construcción. Los sólidos pueden acelerar la erosión y corrosión, tener tendencia a aglomerarse o pueden exigir un manejo delicado para evitar la degradación indeseable.

Debido a la gran variedad de tipos de bombas y la cantidad de factores que determinan la selección de cualquiera de ellas para una instalación específica, el diseñador debe eliminar primero todas las que no ofrezcan posibilidades razonables. La selección de los materiales de construcción de bombas está de acuerdo con las consideraciones sobre corrosión, erosión, seguridad del personal y contaminación del líquido. [4]

### 1.2.3.3 BOMBAS CENTRÍFUGAS.

Las ventajas primordiales de una bomba centrífuga son: la sencillez, el bajo costo inicial, el flujo uniforme (sin pulsaciones), el pequeño espacio necesario para su instalación, los bajos costos de mantenimiento, el funcionamiento silencioso y su capacidad de adaptación para su empleo con unidad motriz de motor eléctrico o de turbina.

Una bomba centrífuga, en su forma más simple, consiste en un impulsor que gira dentro de una carcasa. Los impulsores pueden tener ejes de rotación horizontales o verticales, para adaptarse al trabajo que se vaya a realizar. Por lo común, los impulsores resguardados o de tipo cerrado suelen ser más eficientes. Los impulsores de tipo abierto o semiabierto se emplean para líquidos viscosos o que contengan

materiales sólidos, así como también en muchas bombas pequeñas, para servicios generales. [4]

## **1.2.4 TUBERÍAS PARA PLANTAS DE PROCESOS.**

### **1.2.4.1 CÓDIGO PARA TUBERÍAS A PRESIÓN. [4]**

El código para tuberías a presión (ASME B31) consiste en cierto número de secciones que constituyen en forma colectiva el código. Las secciones se publican como documentos independientes por sencillez y conveniencia. Las secciones difieren sensiblemente unas de otras. El alcance y aplicación del Código B31.3 se refiere a todas aquellas tuberías dentro de los límites de las instalaciones dedicadas al procesamiento y manejo de productos petroquímicos y conexos, salvo aquellos proscritos por el código.

El *Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping Code* (ASME B31.3) es una sección de ASME B31, derivado de la fusión de los códigos de tuberías para plantas químicas (ASME B31.6) y refinerías de petróleo (ASME B31.3).

El *American National Standards Institute*, (ANSI), y el *American Petroleum Institute*, (API), han establecido normas dimensionales para los componentes de tuberías más utilizados. En las secciones del código ASME B31 es posible encontrar especificaciones sobre materiales de tuberías y accesorios y métodos de prueba de la *American Society for Testing and Materials*, (ASTM), especificaciones de la *American Welding Society*, (AWS), y normas de la *Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fitting Industry*, (MSS). Muchas de estas normas contienen relaciones de presión-temperatura que sirven como ayuda a los ingenieros en su trabajo de diseño. No obstante, debe tenerse en cuenta que el empleo de normas publicadas no elimina la necesidad de aplicar el criterio de ingeniería.

La introducción del código establece requisitos de ingeniería considerados como necesarios para el diseño seguro y la construcción de sistemas de tuberías.

Aunque la seguridad es la consideración básica del código, no es el factor que predomina en la especificación final de ningún sistema de tubería a presión.

Los diseñadores deben tener en cuenta que el código no es un manual de diseño y no se establece para evitar la necesidad de un criterio de ingeniería competente.

#### 1.2.4.2 MATERIALES PARA SISTEMAS DE TUBERÍAS. [4]

La selección de materiales que resistan al deterioro a consecuencia del uso está fuera del alcance del código ASME B31.3; no obstante, la experiencia ha ayudado a recopilar las siguientes consideraciones sobre los materiales:

- 1) Posible exposición al fuego con respecto a la pérdida de elasticidad, temperatura de degradación, punto de fusión o combustibilidad de la tubería o material de soporte.
- 2) Capacidad del aislamiento térmico para proteger la tubería del fuego.
- 3) Sensibilidad de la tubería a fallas quebradizas que puedan ocasionar una peligrosa fragmentación o falla al choque térmico cuando se expone al fuego.
- 4) Sensibilidad de los materiales de la tubería al agrietamiento por corrosión en áreas donde existe estancamiento (juntas roscadas) o efectos electrolíticos nocivos, cuando el metal es puesto en contacto con otro metal diferente.
- 5) La conveniencia de utilizar empaques, sellos, rellenos y lubricantes que sean compatibles con el fluido que se maneja.
- 6) El efecto refrigerante de pérdidas repentinas de presión en fluidos volátiles al determinar la temperatura mínima de empleo esperada.

#### *1.2.4.2.1 Precauciones sobre materiales específicos.*

Las siguientes son características que deben evaluarse cuando se utilicen materiales metálicos para la tubería:

1. Hierro: colado, maleable y alto silicio (14,5%). Su baja ductilidad y su sensibilidad a los choques térmicos y mecánicos.
2. Acero al carbono y aceros de baja e intermedias aleaciones:
  - La posibilidad de resquebrajamiento cuando se manejen fluidos alcalinos o cáusticos.
  - La posible degradación de carburos a grafito cuando se tenga una prolongada exposición a temperaturas superiores a 427°C. Esto se debe considerar para aleaciones de acero al carbono, acero-níquel, acero al carbono-manganeso, acero al manganeso-vanadio y acero al carbono-silicio.
  - La posible conversión de carburos en grafito cuando se tiene una prolongada exposición a temperaturas superiores a 468°C la aleación de acero al carbono-molibdeno, acero al manganeso-molibdeno-vanadio y acero al cromo-vanadio.
  - Las ventajas de utilizar acero al silicio-carbono (0,1% de silicio como mínimo) para temperaturas superiores a 480°C.
  - La posibilidad de ataque por hidrógeno cuando la tubería es expuesta a este elemento o a soluciones acuosas ácidas en ciertas condiciones de presión y temperatura.
  - La posibilidad de que la tubería se deteriore cuando se exponga a sulfuro de hidrógeno.
3. Acero de altas aleaciones (inoxidable)
  - La posibilidad de que la corrosión llegue a tener proporciones importantes cuando la tubería de aceros inoxidable austeníticos se exponga a medios como cloruros y haluros, ya sea externa o internamente. Lo anterior puede

ser el resultado de una selección o aplicación inadecuada del aislamiento térmico.

- La sensibilidad a la corrosión intergranular del acero inoxidable austenítico, después de estar expuesto a temperaturas entre 427 y 871°C, a menos que se establezca o se utilice acero al carbono de bajo grado.
  - La posibilidad de un ataque intercrystalino del acero inoxidable austenítico por contacto con zinc o plomo a temperaturas por encima de sus puntos de fusión, o con muchos compuestos de zinc y plomo a temperaturas elevadas similares.
  - La fragilidad del acero inoxidable ferrítico a temperatura ambiente, posterior al uso por encima de 370°C.
4. Níquel y aleaciones a base de Níquel.
- La sensibilidad al ataque superficial del níquel y aleaciones a base de níquel que no contengan cromo, cuando se expongan a pequeñas cantidades de azufre a temperaturas superiores a 315°C.
  - La sensibilidad al ataque superficial de las aleaciones a base de níquel, que contengan cromo, a temperaturas superiores a 595°C en condiciones reductoras y por encima de 760°C en condiciones oxidantes.
  - La posibilidad de un ataque por corrosión en forma de grietas a aleaciones de níquel-cobre en vapores de ácido fluorhídrico, si la aleación es sometida a gran esfuerzo o contiene residuos de soldadura o del molde.
5. Aluminio y aleaciones de aluminio.
- La compatibilidad de los componentes roscados con aluminio para prevenir la ligadura o atenuamiento en las uniones.
  - La posibilidad de corrosión a causa del concreto, mortero, cal, yeso y otros materiales alcalinos empleados en la construcción u otras estructuras.

- La posibilidad de que las aleaciones 5154, 5087, 5083 y 5456 sufran exfoliación o ataque intergranular, y que la temperatura superior sea de 65°C a fin de evitar tal deterioro.
6. Cobre y aleaciones de cobre.
    - La posibilidad de que las aleaciones de bronce se degraden en el contenido de zinc.
    - La sensibilidad a la corrosión por las aleaciones a base de cobre.
    - La posibilidad de formación de acetiluros inestables cuando se exponen a acetileno.
  7. Titanio y aleaciones de titanio: la posibilidad de que las tuberías de titanio y sus aleaciones sufran deterioro cuando la temperatura sea superior a 315°C.
  8. Zirconio y aleaciones de zirconio: la posibilidad de que se deteriore la tubería cuando la temperatura sea superior a 315°C.
  9. Tantalio: cuando la temperatura sea superior a 300°C existe la posibilidad de que el tantalio reaccione con todos los gases, excepto los inertes. Por debajo de esta temperatura, la tubería puede ser quebradiza a consecuencia del hidrógeno naciente (monoatómico, no molecular). El hidrógeno naciente se produce por acción galvánica o surge a consecuencia de la corrosión originada por algunos componentes químicos.

#### 1.2.4.3 SISTEMAS DE TUBERÍAS METÁLICAS DE ACERO AL CARBONO Y ACERO INOXIDABLE. [4]

Los sistemas de tuberías de metales ferrosos que incluyen los aceros maleables, al carbono e inoxidables, son los que más se utilizan y tienen mayor cobertura de parte de las normas internacionales.

#### *1.2.4.3.1 Tubos y tuberías.*

Se dividen en dos clases principales: soldados y sin costura. Las tuberías sin costura, como designación comercial, son las tuberías hechas mediante el forjado de un sólido circular, su perforación mediante la rotación simultánea y el paso obligado sobre una punta perforada y su reducción mediante el laminado y el estiramiento. Sin embargo, se producen también tubos y tuberías sin costura mediante la extrusión, el colado en moldes estáticos o centrífugos, la forja y la perforación. La tubería sin costura tiene la misma resistencia a lo largo de toda la pared. Las tuberías sin costura perforadas tienen con frecuencia la superficie interna excéntrica con relación a la externa, lo que da como resultado un espesor no uniforme en las paredes.

Las tuberías soldadas se hacen con bandas laminadas conformadas en cilindros y soldadas en las costuras por varios métodos. Se atribuye a las soldaduras del 60 al 100% de la resistencia de las paredes de la tubería, dependiendo de los procedimientos de soldadura e inspección. Se pueden obtener diámetros mayores y razones más bajas de espesores de las paredes respecto al diámetro en las tuberías soldadas que en las tuberías sin costura (aparte de las coladas). Se obtiene un espesor uniforme de las paredes. Las pruebas hidrostáticas no revelan tramos muy cortos de soldaduras completadas en forma parcial. Esto presenta la posibilidad de que se puedan desarrollar prematuramente fugas pequeñas cuando se manejen fluidos corrosivos o se exponga la tubería a la corrosión externa. Es preciso tomar en cuenta la soldadura en los procedimientos de desarrollo para el acodamiento, el abocinado y la expansión de las tuberías soldadas.

Las combinaciones de espesor adicional, tamaño adicional y espesor de pared se encuentran disponibles para la manufactura de tubos. Las clasificaciones más comunes de tubos son “a presión” y “mecánica”. El espesor de pared (medido) se especifica por la “pared media” o “pared mínima”. La pared mínima es más costosa que la pared media y, a consecuencia de las tolerancias más estrechas para espesor de pared y diámetro, la medición para ambos sistemas hace que la tubería a presión sea más costosa. Sin embargo, los tubos soldados de acero al carbono de pared media,

resistentes a la electricidad, con diámetro externo de  $2\frac{3}{8}$ ,  $2\frac{7}{8}$ ,  $3\frac{1}{2}$ ,  $4\frac{1}{2}$  in, obtenidos de bobinas sobre rodillos de formado progresivo y probadas electromagnéticamente más que a presión, compiten vigorosamente con las tuberías.

#### *1.2.4.3.2 Juntas.*

Las tuberías se deben unir a otras tuberías y otros componentes. El diseño óptimo requiere un trabajo de montaje mínimo y prevé la misma resistencia que posee la tubería para:

- 1) Presión interna en lo que se refiere a las fracturas y fugas.
- 2) Momentos de torsión que se producen al tender tramos largos de tuberías entre los soportes o debido a la dilatación térmica en las tuberías con acodamientos dobles.
- 3) Deformación axial por la presión interna que actúa sobre los cambios de dirección, llaves ciegas y válvulas cerradas o por la contracción térmica en los tramos rectos.
- 4) Fractura o fugas en el caso de que se produzca algún incendio.

Las juntas de tuberías ideales están libres de cambios en cualquier dimensión de pasaje del flujo o la dirección que incremente la caída de presión o impida el drenaje completo. Estará libre de hendiduras en las que se pueda acelerar la corrosión. Requerirá un trabajo mínimo para su desmontaje. Al efectuar la selección será preciso tomar en cuenta la frecuencia con la que se tendría que desmontar la junta. En términos generales, las juntas fáciles de desmontar son deficientes en alguno de los otros requisitos de las juntas ideales.

*Juntas soldadas:* La junta más utilizada en los sistemas de tuberías es la de soldadura por ensamble. En todos los metales dúctiles de tuberías que se pueden soldar hay codos, tes, tuberías, ramas laterales, reductores, tapones, válvulas, bridas y juntas de abrazadera en V en todos los espesores de paredes, con extremos preparados para la soldadura por ensamble. La resistencia de la junta igual a la tubería original (con excepción de las tuberías endurecidas para el trabajo que se templen mediante la

soldadura), el patrón de flujo sin distorsiones y la resistencia, generalmente íntegra a la corrosión, compensan ampliamente la necesaria alineación cuidadosa del trabajo competente y los equipos que se requieren.

*Soldaduras de bifurcaciones:* estas soldaduras eliminan la necesidad de adquirir tes y no requieren más metal de soldadura que estas últimas. Donde la bifurcación se acerque al tamaño del tramo principal, se necesita una preparación cuidadosa del extremo de la tubería ramificada y la del tramo principal se debilita debido a la soldadura.

#### *1.2.4.3.3 Codos y accesorios.*

Los cambios de dirección de los sistemas de tuberías requieren curvas y codos. Las curvas se pueden hacer en frío o en caliente. La pared exterior se adelgaza en una cantidad que varía con el procedimiento utilizado. Se requiere un templeado subsiguiente en algunos materiales. Para evitar las arrugas y el aplastamiento excesivo, es necesario el relleno con arena para el doblado en frío, dependiendo de las relaciones del diámetro exterior de la tubería respecto al radio de la línea central de la curva y al espesor de la pared de la tubería. Para curvas con un radio de eje correspondiente a cinco veces el diámetro nominal de la tubería, no se requiere soporte interno cuando el espesor de la pared sea al menos del 6% del diámetro exterior de la tubería.

Los codos se pueden formar mediante vaciado, forja o conformación en caliente o frío mediante trozos cortados de tubería o al soldar piezas de tuberías cortadas con un ángulo de inclinación. El flujo en las curvas y los codos es más turbulento que en las tuberías rectas, por lo que aumentan la corrosión y la erosión. Esto se puede contrarrestar al escoger un componente con mayor radio de curvatura, pared más gruesa o un contorno interior más liso, pero raramente resulta económico en los codos con ángulo de inclinación.

#### *1.2.4.3.4 Válvulas.*

Los cuerpos de las válvulas pueden manufacturarse en hierro colado, forjado, maquinado a partir de barras sólidas o fabricado a partir de placas soldadas. Se dispone de válvulas de acero con extremos roscados o casquillos de soldadura en los tamaños más pequeños. Las válvulas con extremos roscados de bronce y latón son muy utilizadas para servicio de fluidos a baja presión en sistemas de acero.

Las válvulas sirven no sólo para regular el flujo de fluidos, sino también para aislar equipos o tuberías para el mantenimiento, sin interrumpir otras unidades conectadas. El diseño de la válvula deberá evitar que los cambios de presión y temperatura y las deformaciones de las tuberías conectadas, distorsionen o establezcan una mala alineación en las superficies de sellado. Estas últimas deberán ser de material y diseño tales que la válvula permanezca hermética durante un periodo de servicio razonable.

*Válvulas de compuerta:* estas válvulas se diseñan en dos tipos. La compuerta de cuña, del tipo de asiento inclinado, es la que más se utiliza. La compuerta de cuña suele ser sólida, pero es posible que sea también flexible (cortada parcialmente en mitades por un plano en ángulo recto con la tubería) o dividida (cortada completamente por ese plano). Las cuñas flexibles y divididas minimizan el raspado de la superficie de sellado, al distorsionarse con mayor facilidad para coincidir con los asientos de mala alineación angular. En el tipo de asiento paralelo y disco doble, un dispositivo de plano inclinado montado entre los discos convierte la fuerza del vástago en fuerza axial, oprimiendo los discos contra los asientos, después que se sitúan en su posición adecuada para el cierre.

*Válvulas de globo:* éstas se diseñan con vástago ascendente de rosca interna o externa. Las válvulas pequeñas son generalmente del tipo de rosca interna, mientras que en los tamaños mayores se prefiere el de rosca externa. En la mayor parte de los diseños, los discos tienen la libertad de girar sobre los vástagos, esto evita las raspaduras entre el disco y el asiento.

*Válvulas angulares:* estas válvulas son similares a las de globo; se utilizan en ambos casos los mismos casquetes, vástagos y discos. Combinan un codo y una válvula de globo en un componente con ahorro importante de caída de presión. Las válvulas angulares bridadas son más fáciles de retirar y reemplazar que las de globo bridadas.

*Válvulas de diafragma:* estas válvulas se limitan a presiones de aproximadamente 50 psi. Los diafragmas reforzados con tela se pueden hacer de caucho natural, un hule sintético o cauchos naturales o sintéticos recubiertos con teflón. Estas válvulas son excelentes para los fluidos con sólidos en suspensión y se pueden instalar en cualquier posición.

*Llaves de macho o tapón:* estas válvulas se limitan a temperaturas por debajo de 260°C, puesto que la expansión diferencial entre el tapón y el cuerpo hace que se atore. El tamaño y la forma del orificio divide esas válvulas en tipos diferentes: venturi corto, orificio rectangular reducido, venturi largo, orificio rectangular completo y orificio redondo completo.

*Válvulas de bola:* estas válvulas se limitan a temperaturas que tienen pocos efectos sobre sus asientos de plástico. Puesto que el elemento sellador es una bola, su alineación con el eje del vástago no es esencial para el cierre hermético. En las válvulas de bola libre, la esfera se puede desplazar en sentido axial. El diferencial de presión a través de la válvula obliga a la bola en posición cerrada a oprimirse contra el asiento de corriente abajo y este último contra el cuerpo. En las válvulas de bola fija, la bola gira sobre extensiones del vástago y los cojinetes se sellan con anillos en O.

*Válvulas de mariposa:* estas válvulas ocupan menos espacio en la línea que cualquier otra válvula. Se logra un sellado relativamente hermético sin desgaste excesivo de los asientos ni un esfuerzo operacional de torsión demasiado grande mediante diversos métodos, como asientos elásticos, anillos de pistón sobre el disco e inclinación del vástago para limitar el contacto entre las porciones del disco más cercanas al vástago y el asiento del cuerpo, en unos cuantos grados de curvatura.

*Válvulas de retención de columpio:* estas válvulas se utilizan para evitar la inversión del flujo. El diseño normal es para emplearse solamente en línea horizontal donde la fuerza de gravedad sobre el disco sea máxima al comienzo del cierre y mínima al final.

#### 1.2.4.4 DISEÑO DE SISTEMAS DE TUBERÍAS.

##### *1.2.4.4.1 Seguridad.*

La seguridad se puede definir como la estipulación de medidas de protección que se requieren para asegurar una operación sin riesgos de un sistema propuesto de tubería. Entre las consideraciones generales a evaluar deberían contarse las siguientes:

- 1) Las características peligrosas del fluido a manejar.
- 2) La cantidad de fluido que se escapará a consecuencia de una falla en la tubería.
- 3) El efecto de una falla (por ejemplo, pérdidas de agua de enfriamiento) en la seguridad de toda la planta.
- 4) Evaluación de los efectos de una reacción con el medio ambiente.
- 5) El probable grado de exposición del personal de operación o mantenimiento.
- 6) La seguridad de la tubería, según los materiales de construcción, métodos de unión y el servicio que recibirá la tubería.

##### *1.2.4.4.2 Condiciones de diseño.*

Las definiciones de temperaturas, presiones y otros aspectos aplicables al diseño de sistemas de tuberías se muestran a continuación:

*Presión de diseño.* La presión de diseño de un sistema de tuberías no será menor que la presión en las condiciones conjuntas más severas de presión y temperatura para el espesor mayor o relación presión-temperatura requerida. [4]

*Temperatura de diseño.* La temperatura de diseño es la temperatura del material representativa para las condiciones conjuntas más severas de presión y temperatura. Cuando se trate de tubería metálica no aislada con fluido a una temperatura inferior a 38°C, la temperatura del metal será considerada como la temperatura del fluido.

Cuando un fluido se encuentre a una temperatura igual o superior a 38°C y la tubería no tenga aislamiento externo, la temperatura del metal será tomada como un porcentaje de la temperatura del fluido, a menos que se determine una temperatura más baja por experimentación o cálculo. Para tubería, válvulas roscadas y con extremos soldados, accesorios y otros componentes con un espesor de pared comparable al de esa tubería, el porcentaje será de 95%; para bridas, válvulas y accesorios bridados, será de 90%; para bridas con junta de solapa será de 85%; y para pernos, de 80%. [4]

*Influencias ambientales.* Cuando el enfriamiento provoque vacío en la línea, el diseño debe estipular algún rompedor de vacío o presión externa; también debe considerarse la expansión térmica de objetos atrapados entre las válvulas cerradas. [4]

La característica de ciertos servicios es la variación ocasional de la presión o temperatura, o ambas variables por debajo de los niveles de operación, pero no deben tomarse en cuenta estas variaciones si se han cumplido los criterios citados. Por otra parte, las condiciones más graves de presión y temperatura coincidentes durante la variación serán las que se empleen para establecer las condiciones de diseño.

Se deben satisfacer los siguientes criterios:

1. El sistema no debe tener componentes de hierro colado u otro metal no dúctil expuestos a presión.
2. Los esfuerzos nominales de presión no deben exceder el esfuerzo elástico a la temperatura especificada.
3. Los esfuerzos longitudinales combinados no deben exceder los límites establecidos en el código ASME.

4. El número de ciclos (variaciones) no debe exceder el valor 7000 durante la vida del sistema de tubería.
5. Las variaciones ocasionales por encima de lo establecido en las condiciones de diseño deben estar dentro de uno de los límites siguientes para el diseño de la presión:
  - a) Cuando la variación no persista un tiempo superior a 10 horas en cada ocasión y 100 horas por año, se podrá exceder la relación de presión o el esfuerzo permisible para la presión de diseño a la temperatura de la condición incrementada en un valor no mayor a 33%.
  - b) Cuando la variación no persista más de 50 horas en cada ocasión y 500 horas por año, se podrá exceder la relación de presión o el esfuerzo permisible para el diseño de presión a la temperatura de la condición incrementada en un valor no mayor al 20%.

*Efectos dinámicos.* El diseño de estos sistemas debe contar con prevenciones contra impacto (como choques hidráulicos), viento (cuando la tubería está expuesta a éste), terremotos, reacciones de descarga y vibraciones (de tuberías y soportes).

Las consideraciones respecto al peso deben incluir: cargas vivas (contenido, hielo y nieve), cargas muertas (tubería, válvulas, aislamiento, etc.) y cargas de prueba (fluidos de prueba). [4]

#### *1.2.4.4.3 Criterios de diseño: tuberías metálicas.*

El código ASME utiliza tres métodos diferentes para abordar el diseño:

1. Prevé la utilización de componentes dimensionalmente normalizados en sus relaciones de presiones y temperaturas.
2. Proporciona fórmulas de diseño y esfuerzos máximos.
3. Prohíbe la utilización de materiales, componentes o métodos de montaje en ciertas condiciones.

#### 1.2.4.4.4 Diseño de presión de componentes metálicos.

*Espesor de las paredes.* La evaluación del esfuerzo de presión externa de las tuberías es la misma que para los recipientes de presión; sin embargo, existe una diferencia importante cuando se establece una presión de diseño y un espesor de las paredes para la presión interna, como resultado del requisito del *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, que el ajuste de la válvula de purga no debe ser superior a la presión de diseño. Para los recipientes, esto quiere decir que el diseño es para una presión de 10% más o menos por encima de la presión de operación máxima esperada, con el fin de evitar las fugas de la válvula durante el funcionamiento normal. No obstante, en las tuberías la temperatura y la presión de diseño se consideran como la combinación máxima esperada de presión de operación y temperatura, que dan como resultado el espesor máximo. [4]

Bajo la normativa del código ASME B31.3 [1], para tuberías metálicas rectas con presiones internas, la fórmula para el espesor mínimo de pared que se requiere  $t_m$  se da a continuación y es aplicable para razones de  $D_o/t$  mayores de 6. Las ecuaciones más conservadoras de Barlow y Lamé pueden ser utilizadas también. La ecuación 32 incluye un factor  $Y$  que varía con el material y la temperatura para considerar la redistribución de esfuerzos perimetrales que se producen con flujo en estado estacionario a altas temperaturas y permite espesores ligeramente menores en este intervalo

$$t_m = \frac{PD_o}{2(SE + PY)} + c \quad \text{Ec. 32}$$

Donde  $P$ = presión interna máxima.

$D_o$ = diámetro exterior de la tubería.

$c$ = suma de la tolerancia mecánica y las tolerancias por erosión y corrosión.

$SE$ = esfuerzo permisible.

$S$ = esfuerzo básico permisible para los materiales, excluyendo juntas, materiales fundidos o factores de calidad de grado estructural.

$Y$ = coeficiente cuyos valores para materiales ferrosos dúctiles varían entre 0,4 y 0,7, para materiales ferrosos no dúctiles es de 0,4 y para materiales frágiles es 0, como el hierro colado.

Factor de calidad ( $E$ ), es uno o el producto de más de uno de los siguientes factores de calidad: factor de calidad de fundiciones ( $E_c$ ), factor de calidad de uniones ( $E_j$ ), y factor de calidad de grado estructural ( $E_s$ ) de 0,92.

Las válvulas deben estar de acuerdo con las normas aplicables que se dan en el código y con los límites permisibles de presión y temperatura que se establecen en él, sin que vayan más allá de las limitaciones de materiales o servicio que establece el código.

El espesor de los codos de tuberías se debe determinar como para las tuberías rectas, a condición de que la operación de doblado no dé como resultado una diferencia entre el diámetro máximo y el mínimo de más de 8 y 3% del diámetro exterior nominal de la tubería para presión interna y externa, respectivamente.

#### *1.2.4.4.5 Expansión térmica y flexibilidad de tuberías metálicas. [4]*

El código ASME B31.3 requiere que los sistemas de tuberías se diseñen para que tengan suficiente flexibilidad y evitar así que la expansión o la contracción térmica o el movimiento de soportes o terminales de la tubería provoquen alguna de las dificultades siguientes:

- Fallas en los soportes de las tuberías debidas a las fatigas o esfuerzos excesivos.
- Fugas en las juntas.
- Esfuerzos o distorsiones perjudiciales en las tuberías o en los equipos conectados (como bombas, turbinas o válvulas) debido a los excesivos empujes axiales o movimientos en las tuberías.

Deformaciones por desplazamiento. Las deformaciones se ocasionan por una tubería que se desplaza de su posición original.

1. Desplazamientos térmicos: un sistema de tuberías sufrirá cambios dimensionales a consecuencia de cambios en la temperatura. Si se restringe el movimiento libre con terminales, guías y anclajes, será desplazado de su posición original.
2. Desplazamientos por reacción: si las restricciones no son rígidas y existe un movimiento predecible de estos accesorios bajo carga, éste podría considerarse como desplazamiento de compensación.
3. Desplazamientos impuestos externamente: cuando externamente se crean movimientos de las restricciones, éstos impondrán un desplazamiento a la tubería, además de los relacionados con los efectos térmicos. Estos movimientos pueden originarse por causas como corrientes de aire o cambios de temperatura en equipos conectados.

Deformaciones de desplazamiento total. Los desplazamientos térmicos, los desplazamientos por reacción y los desplazamientos impuestos externamente, tienen efectos equivalentes sobre los sistemas de tuberías y deben considerarse en conjunto para determinar las deformaciones por desplazamiento total en un sistema de tuberías.

Las deformaciones por expansión se pueden considerar en tres formas: por doblez, torsión o compresión axial. En los primeros dos casos, el esfuerzo máximo ocurre en las fibras extremas de la sección transversal de la zona crítica. En el tercer caso, el área entera de la sección transversal será sometida al mismo esfuerzo en toda la longitud de la tubería.

La flexibilidad torsional o por doblez puede obtenerse por codos, abrazaderas o tuberías no alineadas; por tubería corrugada o juntas de expansión tipo fuelle o por otros dispositivos que permitan el movimiento rotacional. Estos dispositivos deben anclarse o conectarse de forma tal que resistan las fuerzas terminales de la presión del fluido, que tengan resistencia friccional al movimiento de la tubería y otras causas.

La flexibilidad axial puede obtenerse mediante juntas de expansión de los tipos deslizante o de fuelle, adecuadamente ancladas y orientadas para resistir las fuerzas terminales de la presión del fluido, y deben tener resistencia friccional al movimiento y otras causas.

Esfuerzos de desplazamiento. Los esfuerzos se pueden considerar como proporcionales a la deformación total que causan sólo si la deformación está uniformemente distribuida y no es excesiva en ningún punto. La distribución irregular de deformaciones (sistemas equilibrados) puede resultar de:

1. Tuberías de dimensiones pequeñas sometidas a un gran esfuerzo en serie con tubería relativamente rígida de grandes dimensiones.
2. La reducción local en tamaño o espesor de pared o empleo local de un material que tiene una fuerza elástica reducida.
3. Una configuración de recubrimiento en un sistema de tamaño uniforme, en el cual la expansión o contracción debe absorberse con una desalineación corta en la mayor parte de la tubería.

Si los esquemas desequilibrados de tubería no pueden evitarse, se deben aplicar métodos analíticos apropiados con objeto de asegurar la flexibilidad adecuada del sistema. Si el diseñador determina que un sistema no tiene una adecuada flexibilidad inherente, debe proporcionar flexibilidad adicional mediante la adición de codos, abrazaderas, tramos de tubería en S, juntas de torniquete, tubería corrugada, juntas de expansión de los tipos de fuelle o deslizante u otros dispositivos. También debe contarse con un anclaje adecuado.

Mientras que los esfuerzos resultantes de una deformación térmica tienden a disminuir con el tiempo, la diferencia algebraica de ese desplazamiento y la condición original, o cualquier condición anticipada del sistema con un mayor efecto opuesto que en la condición de desplazamiento extremo, que permanecerá constante durante cualquier ciclo de operación.

Muelle enfriado. El muelle enfriado es la deformación intencional que se crea en una tubería durante su ensamblaje con objeto de producir un esfuerzo y desplazamiento inicial deseado. Cuando una tubería se va a utilizar a una temperatura mayor a la cual se instala, el muelle enfriado es adecuado al hacer que la longitud de la tubería sea ligeramente más corta que la obtenida en el diseño. El muelle enfriado es benéfico, pues ayuda a equilibrar la magnitud del esfuerzo en condiciones de desplazamiento inicial y extremo.

Requisitos para el análisis. No es necesario realizar un análisis formal de la flexibilidad requerida en sistemas que:

- a. Son copias de instalaciones que se encuentran operando bien o tienen sustituciones poco significativas de sistemas que cuentan con una historia de servicio satisfactoria.
- b. Pueden ser juzgados rápidamente con una adecuada comparación con sistemas ya analizados.
- c. Son de dimensión uniforme y no tienen más de dos puntos de fijación ni tienen restricciones intermedias, además de caer dentro de los límites de la ecuación empírica siguiente:

$$\frac{Dy}{(L_2 - U)^2} \leq K_2 \quad \text{Ec. 33}$$

Donde  $y$  = resultante de la deformación por desplazamiento total a ser absorbida por el sistema.

$L_2$  = longitud desarrollada de la tubería entre anclajes.

$U$  = distancia de anclajes, línea recta entre anclajes.

$K_2$  = 0,03 para unidades inglesas.

- Todos los sistemas que no cumplan estos criterios serán analizados por métodos de análisis simplificados, aproximados o completos, que sean adecuados para cada caso específico.

- Los métodos de aproximación o simplificación sólo pueden ser aplicados en el intervalo de configuraciones para las que se ha demostrado su adaptabilidad.
- Entre los métodos de análisis aceptables, se cuentan los métodos analíticos y de gráficas, que proporcionan una evaluación de las fuerzas, momentos y esfuerzos causados por las deformaciones por desplazamiento.
- El análisis tomará en cuenta los factores de intensificación de esfuerzo para cualquier componente diferente de la tubería recta. Se debe tener en cuenta la flexibilidad extra de ese componente.

Cuando se calcula la flexibilidad de un sistema de tubería entre puntos de anclaje, el sistema debe tratarse como un todo. Deberá reconocerse la importancia de todas las partes de la línea y las restricciones introducidas con el propósito de reducir momentos y fuerzas en el equipo o pequeñas ramificaciones, y también las restricciones introducidas por la fricción de soportes. Es necesario considerar todos los desplazamientos dentro del intervalo de temperaturas, determinado por las condiciones de operación y fuera de servicio.

#### *1.2.4.4.6 Soportes de tuberías.*

Las cargas transmitidas por las tuberías a los equipos conectados y los elementos de soporte incluyen: peso, efectos inducidos por la temperatura y la presión, vibraciones, el viento, los sismos, los choques, la expansión y contracción térmica. El diseño de soportes y restricciones se basa en cargas que actúan de modo concurrente, suponiendo que no se ejerzan simultáneamente los sismos y el viento.

Los soportes elásticos y de tipo de esfuerzo constante se deben diseñar para las condiciones máximas de carga incluyendo las de prueba, a menos que se proporcionen soportes temporales. [4]

El código señala además que los elementos de soporte de tuberías deben:

- 1) Evitar las interferencias excesivas para la expansión y la contracción térmica de la tubería que, de otro modo, tiene la flexibilidad adecuada.
- 2) Ser de índole tal que no contribuyan a que se produzcan fugas en las juntas o un pandeo excesivo de las tuberías que requiera drenaje.
- 3) Diseñarse para evitar los esfuerzos, la resonancia o la desconexión debido a las variaciones de la carga con la temperatura, y que los esfuerzos longitudinales combinados que se ejercen sobre la tubería no sobrepasen lo permitido en el código.
- 4) Ser de índole tal que se evite una liberación completa de la carga sobre la tubería en el caso de una mala alineación o la falla de algún resorte, la transferencia de pesos o las cargas adicionales debidas a las pruebas durante la instalación.
- 5) Ser de acero o hierro forjado.
- 6) Ser de acero de aleación o protegerse de la temperatura, en los lugares en que se sobrepasen los límites de temperatura adecuados para el acero al carbono.
- 7) No ser hierro colado excepto para bases de rodillos, rodillos, bases de anclaje, etc., principalmente bajo cargas de compresión.
- 8) No ser de hierro maleable ni nodular, con excepción de las abrazaderas de tuberías, las abrazaderas de vigas, las bridas de soportes, los sujetadores, las bases y los anillos giratorios.
- 9) No ser de madera, excepción hecha de los soportes sometidos primordialmente a compresión, donde la temperatura de la tubería se encuentre al nivel del ambiente o por debajo de él.
- 10) Tener roscas para ajustes atornillados que se conformen a las especificaciones del Código ASME B1.1

#### *1.2.4.4.7 Golpe de Ariete [6]*

El golpe de ariete se puede presentar en una tubería que conduzca un líquido cuando se tiene un frenado o una aceleración en el flujo; por ejemplo, el cambio de abertura de una válvula en la línea. Al cerrarse rápidamente una válvula en la tubería durante el escurrimiento, el flujo a través de la válvula se reduce, lo cual incrementa la carga del lado aguas arriba de la válvula, iniciándose así un pulso de alta presión que se propaga en dirección contraria a la del escurrimiento. Este pulso de presión hace que la velocidad del flujo disminuya. La presión en el lado aguas abajo de la válvula se reduce y la onda de presión disminuida viaja en el sentido del escurrimiento, disminuyendo también la velocidad del flujo. Si el cierre de la válvula es suficientemente rápido y si la presión permanente original es suficientemente baja, se puede formar una bolsa de vapor aguas abajo de la válvula; cuando esto ocurre, la cavidad de vapor puede eventualmente reducirse en forma violenta y producir una onda de alta presión que se propaga en la dirección aguas abajo.

La fuerza del golpe de ariete es directamente proporcional a la longitud de la tubería, ya que las ondas de sobrepresión se cargarán de más energía, e inversamente proporcional al tiempo durante el cual se cierra la válvula: cuanto menos dura el cierre, más fuerte será el golpe.

El problema del golpe de ariete es uno de los más complejos de la hidráulica, y es resuelto generalmente mediante modelos matemáticos, que permiten simular el comportamiento del sistema. Este fenómeno es muy peligroso, ya que la sobrepresión generada puede llegar entre 60 y 100 veces a la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en los accesorios instalados en los extremos.

Para evitar los golpes de ariete causados por el cierre de válvulas, hay que estrangular gradualmente la corriente de fluido, es decir, cortándola con lentitud utilizando para ello, por ejemplo, válvulas de rosca. Cuanto más larga es la tubería, tanto más deberá durar el cierre.

Sin embargo, cuando la interrupción del flujo se debe a causas incontrolables como por ejemplo, la parada brusca de una bomba eléctrica, se utilizan tanques neumáticos con cámara de aire comprimido, torres piezométricas, o válvulas que puedan absorber la onda de presión.

#### 1.2.4.5 FABRICACIÓN, MONTAJE E INSTALACIÓN.

##### *1.2.4.5.1 Soldadura.*

Los requisitos del código referente a la fabricación son más detallados para la soldadura que para otros métodos de unión, ya que la soldadura no sólo se utiliza para unir dos tuberías extremo a extremo, sino que sirve también para fabricar accesorios que reemplazan a los accesorios sin costura, como codos y juntas de solapa de punta redonda. Los requisitos del código para el proceso de soldado son esencialmente los mismos que los de la sección IX del *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, excepto que los procesos de soldado no se restringen, el agrupamiento del material debe estar de acuerdo al apéndice A del Código ASME y las posiciones de la soldadura corresponder a la posición de la tubería. [4]

##### *1.2.4.5.2 Doblado y formación.*

La tubería puede doblarse en cualquier radio para el cual la superficie del arco de la curvatura esté libre de grietas y pandeos. Está permitido el empleo de dobleces estriados o corrugados. El doblado puede efectuarse mediante cualquier método en frío o en caliente, siempre que se cumplan las características del material que se está doblando y el radio de la tubería doblada esté dentro. [4]

Algunos materiales requieren un tratamiento térmico una vez que ya se han doblado, lo que dependerá de la severidad del doblado. En el código se explican detalladamente los requisitos que deben cumplirse para este tratamiento.

#### *1.2.4.5.3 Precalentamiento y tratamiento térmico.*

Estos tratamientos sirven para prevenir o corregir los defectos nocivos de las altas temperaturas o gradientes térmicos severos, inherentes a la unión por soldadura de los metales. Además de esto, puede ser necesario someter el material a tratamiento térmico, con objeto de corregir los efectos de esfuerzo creados durante el doblado o formado de los metales. [4]

### 1.3 PROPIEDADES PRINCIPALES DE LA HERRAMIENTA: PIPESIM®2003 [5]

#### *1.3.1 Diseño y Análisis de tuberías y facilidades.*

El entendimiento detallado de la termo-hidráulica del sistema de producción es crítico para el diseño de líneas de flujo y los cálculos del mismo. PIPESIM®, software de análisis de sistema de producción, proporciona un instrumento completo para analizar sistemas complejos de tubería con flujo multifásico.

Con sus módulos interconectados, este programa permite construir un modelo completamente integrado del sistema de producción entero, conectando con simuladores de yacimiento y de proceso, tales como el ECLIPSE®, software de simulación de yacimiento y HYSYS®, simulador de procesos de AspenTech.

#### *1.3.2 Modelaje de flujo multifásico*

El programa incorpora todas las correlaciones actuales de flujo multifásico utilizados en la industria, tanto empíricas como mecánicas, para predecir el régimen de flujo, la pérdida de presión y retención de líquidos. Esto permite diseñar y operar el sistema de producción y distribución con confianza.

Este simulador produce mapas detallados de régimen de flujo en la tubería a las condiciones de operación, incorporando todos los ángulos de inclinación. PIPESIM® utiliza las velocidades superficiales in-situ del gas y líquido para identificar el patrón de flujo en cada nodo del sistema, permitiendo determinar el hold-up y la distribución de presión en el sistema de tuberías.

Predecir slugs, su tamaño y frecuencia, permite optimizar el diseño de tuberías y facilidades de procesamiento. El simulador OLGA-S<sup>®</sup> y los modelos de TUFFP se pueden utilizar para identificar estas características críticas del flujo hidrodinámico tipo slug. El programa predice también la ocurrencia de flujo slug en inclinaciones de la tubería.

### *1.3.3 Modelos de Fluido*

El modelaje exacto del líquido producido es crítico para la comprensión del comportamiento del sistema; por lo tanto, el simulador ofrece la elección entre correlaciones standard de petróleo negro o una gama de modelos composicionales EOS.

### *1.3.4 Certeza del tipo de flujo*

PIPESIM<sup>®</sup> predice la formación de hidratos e incluye la habilidad de modelar los efectos de inhibidores de hidratos. Modelando el perfil de la temperatura de la línea de flujo, puede diseñar el sistema en torno a estos problemas.

Dicho software incluye también rutinas de cálculo para determinar los límites erosivos de la velocidad de la tubería, permitiendo diseñar operaciones seguras en la misma.

### *1.3.5 Diseño de equipos de superficie*

El programa incluye los modelos de los equipos de superficie comunes, para determinar su impacto en el diseño del sistema. Además, las opciones sofisticadas de sensibilidades en el simulador se pueden utilizar también para diseñar sistemas variando los parámetros claves del sistema, permitiendo así la determinación de los tamaños óptimos de tubería y equipos a ser utilizados.

Los módulos contienen los siguientes equipos:

- Separadores
- Bombas y motores auxiliares de propulsión multifásicos
- Compresores y expansores
- Calentadores y enfriadores
- Estranguladores

### *1.3.6 Módulo de Análisis de redes de tubería*

Para un análisis completo del sistema, PIPESIM<sup>®</sup> ofrece opciones para modelar redes complejas que pueden incluir lazos, líneas paralelas y by-pass. El algoritmo robusto de la solución puede modelar la unión, distribución e inyección de la red.

Explica detalladamente la termo-hidráulica del sistema que es crítica para el diseño de la línea de flujo y el régimen de flujo, especialmente para sistemas multifásicos complejos. Esto dará las herramientas para emprender el análisis típico de la red, incluyendo:

- Identificar embotellamientos de la producción y limitaciones
- Valorar los beneficios de nuevos pozos, tuberías adicionales, compresión, etc.
- Calcular la capacidad de manejo desde el campo hasta el sistema de retención
- Predecir los perfiles de presión y temperatura por redes complejas de flujo
- Planificar el desarrollo de campo
- Resolver redes de fondo encontradas en pozos multilaterales.

Una vez construida la red de producción, se pueden introducir los elementos de tiempo para analizar el impacto del desempeño del yacimiento en la estrategia de desarrollo del campo.

PIPESIM<sup>®</sup> permite:

- Modelar flujo multifásico desde el yacimiento a través de las facilidades de producción, hasta su punto de entrega.
- Dirigir redes complejas de producción y captar las interacciones entre pozos, tuberías y equipos de proceso
- Realizar un análisis completo de sensibilidades en cualquier punto del sistema hidráulico usando múltiples parámetros
- Simular el sistema de producción del campo para mejorar la producción, tomar mejores decisiones y obtener precios más competitivos.
- Conexión con el simulador de procesos HYSYS<sup>®</sup> para un análisis integrado desde la cara de la arena hasta las facilidades de procesamiento.

## CAPÍTULO II

### DESARROLLO DEL DISEÑO

#### 2.1 CONDICIONES DE DISEÑO

##### 2.1.1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Tomando como referencia las hojas de seguridad e higiene industrial de PDVSA, de cada uno de los fluidos involucrados en el proyecto, así como también las propiedades de los fluidos suministradas por cada una de las empresas mixtas, se logra hacer un cuadro resumen con la información de cada uno de estos productos químicos. Ver anexos 1, 2 y 3.

**Tabla 4: Propiedades de los fluidos.**

|                                    | METANOL<br>Metor                 | METANOL<br>SuperMetanol   | MTBE                                | ISO-OCTANO                                  |
|------------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|---|
|                                    | CH <sub>3</sub> OH               | CH <sub>3</sub> OH  | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O    | C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>              |
|                                    | Alcohol<br>metílico              | Alcohol<br>metílico   | Metil terbutil éter                 | 2,2,4 trimetil<br>pentano                   |
| Gravedad específica @45°C          | 0,76                             | 0,765   | 0,716                               | 0,662                                       |
| Gravedad específica @CS            | 0,796                            | 0,796   | 0,747                               | 0,696                                       |
| Viscosidad dinámica (cP) @45°C     | 0,42                             | 0,42  | 0,27                                | 0,38  |
| Peso Molecular                     | 32,05                            | 32,05   | 88,14                               | 114,22                                      |
| Punto de ebullición (°C) @ 14,7psi | 64,8                             | 64,8  | 55                                  | 99,3  |
| Presión de vapor (psia) @45°C      | 4,1                              | 4,1   | 8,3                                 | 1,7   |
| Punto de fusión (°C)               | -97,8                            | -97,8   | -109                                | -107,365                                    |
| Punto de ignición (°C)             | 470                              | 470   | 224                                 | 410   |
| Calor de fusión (cal/g)            | 23,7                             | 23,7  | -                                   | 19,278                                      |
| Forma y color                      | Líquido incoloro                 |   | Líquido incoloro                    | Líquido incoloro                            |
| Solubilidad                        | en agua<br>en alcohol<br>en éter | Soluble en todas las proporciones<br>Soluble en todas las proporciones<br>Soluble en todas las proporciones | Ligeramente soluble<br>Soluble<br>- | Insoluble<br>Ligeramente soluble<br>Soluble |
| Límites de inflamabilidad (%)      | inferior<br>superior             | 6,7<br>36,5   | 1,6<br>15,1                         | -<br>-                                      |

## 2.1.2 CONFIGURACIÓN DE LAS BOMBAS.

A partir de la información suministrada por las empresas mixtas, acerca del sistema de bombeo con el cual cuenta cada una de estas empresas, se pudo resumir el siguiente cuadro:

**Tabla 5. Sistema de Bombeo.**

|   | METANOL<br>Metor | METANOL<br>SuperMetanol | MTBE<br>Super Octanos | ISO-OCTANO<br>Super Octanos |
|---|------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| $P_{descarga}$ bombas (psig)                  | 133,7            | 135                     | 135                   | 135                         |
| $P_{min}$ entrada brazo de carga (psig)       | 70               | 70                      | 70                    | 70                          |
| $P_{descarga}$ brazo de carga (psig)          | 20               | 20                      | 20                    | 20                          |
| Flujo de diseño (m <sup>3</sup> /h)           | 2500             | 1000                    | 1000                  | 1000                        |
| Flujo mínimo (m <sup>3</sup> /h)              | 1000             | 500                     | 500                   | 500                         |
| Cantidad de bombas*                           | 1 de 2           | 2 de 2                  | 2 de 3                | 2 de 3                      |
| Descripción de las bombas                     | p-801 A/B        | p-6201 A/B              | 900-p-1 A/B/C         | 900-p-1 A/B/C               |
| $P_{operación}$ (psig)                        | 133,7            | 135                     | 135                   | 135                         |
| $P_{máx}$ de descarga (psig)                  | 171              | 171                     | 171                   | 171                         |
| $P_{máx}$ de operación (psig)                 | 250              | 250                     | 250                   | 250                         |
| Temperatura de operación (°C)                 | 45               | 45                      | 45                    | 45                          |
| Potencia (KW)                                 | 720,4            | 320                     | 350                   | 350                         |
| Cabezal (m)                                   | 110              | 120                     | 120                   | 120                         |
| Eficiencia (%)                                | 81               | 79,5                    | 79,5                  | 79,5                        |
| Presión requerida en el brazo de carga (psig) | 70 – 100         | 70 – 100                | 71 – 86               | 71 – 86                     |

\* Se refiere a la cantidad de bombas en uso referente a la cantidad de bombas disponibles en la planta.

### 2.1.3 CONDICIONES AMBIENTALES DEL COMPLEJO PETROQUÍMICO JOSE.

El proyecto se encuentra ubicado dentro del Complejo Petroquímico José Antonio Anzoátegui, en la costa este de Venezuela, en Jose, Estado Anzoátegui. Las condiciones ambientales que más afectan los cálculos del siguiente trabajo se presentan en la tabla 6.

**Tabla 6: Condiciones Ambientales del Complejo Jose.**

|                                       |                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Temperatura máxima (°C)               | 45                               |
| Temperatura promedio anual (°C)       | 34                               |
| Temperatura mínima extrema (°C)       | 15 bulbo seco<br>24 bulbo húmedo |
| Presión atmosférica promedio (psi)    | 14,6923                          |
| Promedio de elevación del terreno (m) | 7,5                              |

### 2.1.4 CONFIGURACIÓN DE LAS TUBERÍAS

La configuración de las tuberías para este proyecto se decidió dividir en 3 tramos: la tubería principal de 20" ó 24" (de mayor diámetro y longitud), la tubería de 16" y la tubería de 12". Luego que la tubería principal se ubica dentro del límite de batería del muelle, el diámetro se debe disminuir gradualmente hasta conseguir las 12" necesarias para el despacho a través de los brazos de carga, los cuales según las características del muelle y normativas de seguridad deben ser de este diámetro específico.

A partir de la información suministrada por las empresas mixtas, acerca de las condiciones operacionales de los fluidos a través del sistema de tuberías, se seleccionó la tubería más apropiada para este proyecto, ya que se cumple con los requisitos de seguridad necesarios. Los datos recolectados se muestran en las tablas 7, 8 y 9.

**Tabla 7: Características de las Tuberías Principales (24” y 20”)**

|  |          | METANOL<br>Metor                                 | METANOL<br>SuperMetanol                          | MTBE<br>Super Octanos                            | ISO-OCTANO<br>Super Octanos                      |
|--|----------|--|--|--|--|
| <i>Piping Class</i>                          |          | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 |
|  |          | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. |
|  |          | ASTM-A53   | ASTM-A53   | ASTM-A53   | ASTM-A53   |
|  |          | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  |
|  |          | Grado B  | Grado B  | Grado B  | Grado B  |
|  |          | Cédula estándar (20,ST)                          | Cédula estándar (20,ST)                          | Cédula estándar (20,ST)                          | Cédula estándar (20,ST)                          |
|  |          | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            |
| Diámetro nominal (in)                        |          | 24   | 20   | 20   | 20   |
| Diámetro exterior (in)                       |          | 24   | 20   | 20   | 20   |
| Diámetro interno (in)                        |          | 23,25  | 19,25  | 19,25  | 19,25  |
| Espesor de la pared (in)                     |          | 0,375  | 0,375  | 0,375  | 0,375  |
| Área de corte transversal (in <sup>2</sup> ) | en metal | 27,83  | 23,12  | 23,12  | 23,12  |
|  | de flujo | 2,948  | 2,0211   | 2,0211   | 2,0211   |
| Longitud de superficie (in)                  | exterior | 6,283  | 5,236  | 5,236  | 5,236  |
|  | interior | 6,09   | 5,04   | 5,04   | 5,04   |
| Longitud de la tubería (ft)                  |          | 10932  | 11394  | 12398  | 14557  |
| Aspereza de la superficie (in)               |          | 0,0018   | 0,0018   | 0,0018   | 0,0018   |
| Presión de diseño (in)                       |          | 225  | 225  | 209,3  | 209,3  |
| Presión de operación (in)                    |          | 133,7  | 135  | 135  | 135  |
| Temperatura de diseño (°C)                   |          | 70   | 67   | 70   | 70   |
| Temperatura de operación (°C)                |          | 45   | 45   | 45   | 45   |

El tipo de tuberías aplicables al proyecto son: API 5L, ASTM A-106 y ASTM A-53; todas en acero al carbono y con rangos tanto de temperatura como de presión aceptables en el proyecto. Estas tuberías cumplen con los requisitos necesarios, además de estar incluidas dentro del tipo de tubería (*piping class*) aplicable a las plantas y al Muelle Petroquímico. Partiendo de esto, se escoge la tubería A-53 por ser ésta la de uso permitido en el área del Muelle Petroquímico y por ser compatible con las de uso en las plantas. Para trayectorias dentro de los linderos

de las plantas de las empresas mixtas se hará uso de la tubería que estipule la normativa de seguridad de dicha planta.

**Tabla 8: Características de las Tuberías de 16”**

|  | METANOL<br>Metor                                 | METANOL<br>SuperMetanol                          | MTBE<br>Super Octanos                            | ISO-OCTANO<br>Super Octanos                      |
|--|--|--|--|--|
| <i>Piping Class</i>                          | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 |
|  | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. |
|  | ASTM-A53   | ASTM-A53   | ASTM-A53   | ASTM-A53   |
|  | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  |
|  | Grado B  | Grado B  | Grado B  | Grado B  |
|  | Cédula estándar (30,ST)                          | Cédula estándar (30,ST)                          | Cédula estándar (30,ST)                          | Cédula estándar (30,ST)                          |
|  | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            |
| Diámetro nominal (in)                        | 16   | 16   | 16   | 16   |
| Diámetro exterior (in)                       | 16   | 16   | 16   | 16   |
| Diámetro interno (in)                        | 15,25  | 15,25  | 15,25  | 15,25  |
| Espesor de la pared (in)                     | 0,375  | 0,375  | 0,375  | 0,375  |
| Área de corte transversal (in <sup>2</sup> ) | en metal   | 18,41  | 18,41  | 18,41  |
|  | de flujo   | 1,268  | 1,268  | 1,268  |
| Longitud de superficie (ft)                  | exterior   | 4,189  | 4,189  | 4,189  |
|  | interior   | 3,99   | 3,99   | 3,99   |
| Longitud de la tubería (ft)                  | 1640   | 1640   | 1640   | 1640   |
| Aspereza de la superficie (in)               | 0,0018   | 0,0018   | 0,0018   | 0,0018   |
| Presión de diseño (psig)                     | 225  | 225  | 209,3  | 209,3  |
| Presión de operación (psig)                  | 133,7  | 135  | 135  | 135  |
| Temperatura de diseño (°C)                   | 70   | 67   | 70   | 70   |
| Temperatura de operación (°C)                | 45   | 45   | 45   | 45   |

La selección del tipo de costura de la tubería se realizó sujeto al *piping class* manejado en el Muelle Petroquímico, así como al de cada una de las plantas, siendo recomendable el tipo E, correspondiente a tubería con costura soldada con resistencia eléctrica (ERW), solamente para el tramo que abarca el corredor en las calles C y F

(ver figura 1). Al pasar el límite de batería del muelle, la especificación debe cambiar a tubería sin costura (Tipo S), por ser ésta la manejada en el *piping class* del Muelle Petroquímico. Dicha divergencia afecta este estudio únicamente para el cálculo del espesor mínimo requerido.

**Tabla 9: Características de las Tuberías de 12”**

|  |          | METANOL<br>Metor                                 | METANOL<br>SuperMetanol                          | MTBE<br>Super Octanos                            | ISO-OCTANO<br>Super Octanos                      |
|--|----------|--|--|--|--|
| <i>Piping Class</i>                          |          | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 | Acero al carbono                                 |
|  |          | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. | Tubería con costura (ERW) y Tubería sin costura. |
|  |          | ASTM-A53   | ASTM-A53   | ASTM-A53   | ASTM-A53   |
|  |          | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  | Tipo E y Tipo S                                  |
|  |          | Grado B  | Grado B  | Grado B  | Grado B  |
|  |          | Cédula estándar (ST, 40S)                        | Cédula estándar (ST, 40S)                        | Cédula estándar (ST, 40S)                        | Cédula estándar (ST, 40S)                        |
|  |          | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            | <i>Rating</i> 150 lbf                            |
| Diámetro nominal (in)                        |          | 12   | 12   | 12   | 12   |
| Diámetro exterior (in)                       |          | 12,75  | 12,75  | 12,75  | 12,75  |
| Diámetro interno (in)                        |          | 12   | 12   | 12   | 12   |
| Espesor de la pared (in)                     |          | 0,375  | 0,375  | 0,375  | 0,375  |
| Área de corte transversal (in <sup>2</sup> ) | en metal | 14,58  | 14,58  | 14,58  | 14,58  |
|  | de flujo | 0,7854   | 0,7854   | 0,7854   | 0,7854   |
| Longitud de superficie (ft)                  | exterior | 3,338  | 3,338  | 3,338  | 3,338  |
|  | interior | 3,14   | 3,14   | 3,14   | 3,14   |
| Longitud de la tubería (ft)                  |          | 164  | 164  | 164  | 164  |
| Aspereza de la superficie (in)               |          | 0,0018   | 0,0018   | 0,0018   | 0,0018   |
| Presión de diseño (psig)                     |          | 225  | 225  | 209,3  | 209,3  |
| Presión de operación (psig)                  |          | 133,7  | 135  | 135  | 135  |
| Temperatura de diseño (°C)                   |          | 70   | 67   | 70   | 70   |
| Temperatura de operación (°C)                |          | 45   | 45   | 45   | 45   |

Las tuberías son grado B, lo cual indica que se trata de tuberías de color negro (material acero al carbono) que necesitarán recubrimiento y galvanizado antes de ser usadas.

La cédula es estándar, se escogió debido a que se mantiene un margen por encima del espesor mínimo requerido, dichos cálculos se presentan a continuación.

El *rating* de la tubería de acuerdo al *piping class* manejado en el Muelle Petroquímico es de 150 lbf. Este valor está sujeto a cambios, debido a que para la fecha de elaboración de este Trabajo Especial de Grado, aún no se había realizado el estudio de golpe de ariete, factor importante en la delimitación de presión que deberá soportar la tubería.

La cantidad y descripción de cada uno de los accesorios y válvulas que serán empleados en las líneas han sido suministrados por las empresas mixtas, y podrán estar sujetos a cambios durante la fase de construcción del proyecto.

La tabla 10 resume las longitudes equivalentes, mostradas en la tabla 3, de los componentes a ser instalados en las configuraciones de tuberías involucradas en el proyecto.

**Tabla 10: Longitudes equivalentes de diversos accesorios.**

| Tipo de accesorio o válvula     | 24"     | 20"     | 16"     | 12"     |
|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                 | Le [ft] | Le [ft] | Le [ft] | Le [ft] |
| Unión                           | 4       | 3       | 3       | 2       |
| Codo 90° regular                | 47      | 39      | 31      | 25      |
| Codo 90° radio largo            | 29      | 25      | 20      | 16      |
| Codo 45° regular                | 24      | 20      | 16      | 12      |
| "T" de línea de flujo           | 32      | 26      | 21      | 17      |
| "T" de ramal de flujo           | 60      | 76      | 96      | 116     |
| Válvula de globo                | 400     | 525     | 655     | 800     |
| Válvula de compuerta            | 11      | 13      | 17      | 20      |
| Válvula angular                 | 200     | 250     | 320     | 390     |
| Válvula de retención deslizante | 135     | 172     | 217     | 262     |
| Entrada de filos rectos         | 39      | 53      | 68      | 86      |
| Salida tubería                  | 78      | 106     | 136     | 172     |
| Reductor de diámetro            | 97      | 80      | 62      | 45      |

## 2.2 DISEÑO DE LAS TUBERÍAS

### 2.2.1 CONFIGURACIÓN DE LAS TUBERÍAS.

Se emplea el software PIPESIM<sup>®</sup> para la simulación del sistema de transporte del proyecto, debido a que es éste un programa con la capacidad para la simulación de equipos de superficie, así como es capaz de trabajar con los fluidos involucrados en este proyecto. La licencia del software se obtuvo de la empresa PDVSA, a través de la intranet de la misma, la cual se encontraba a disposición de los empleados de Pequiven, para el término de este Trabajo Especial de Grado.

#### 2.2.1.1 *Metor*

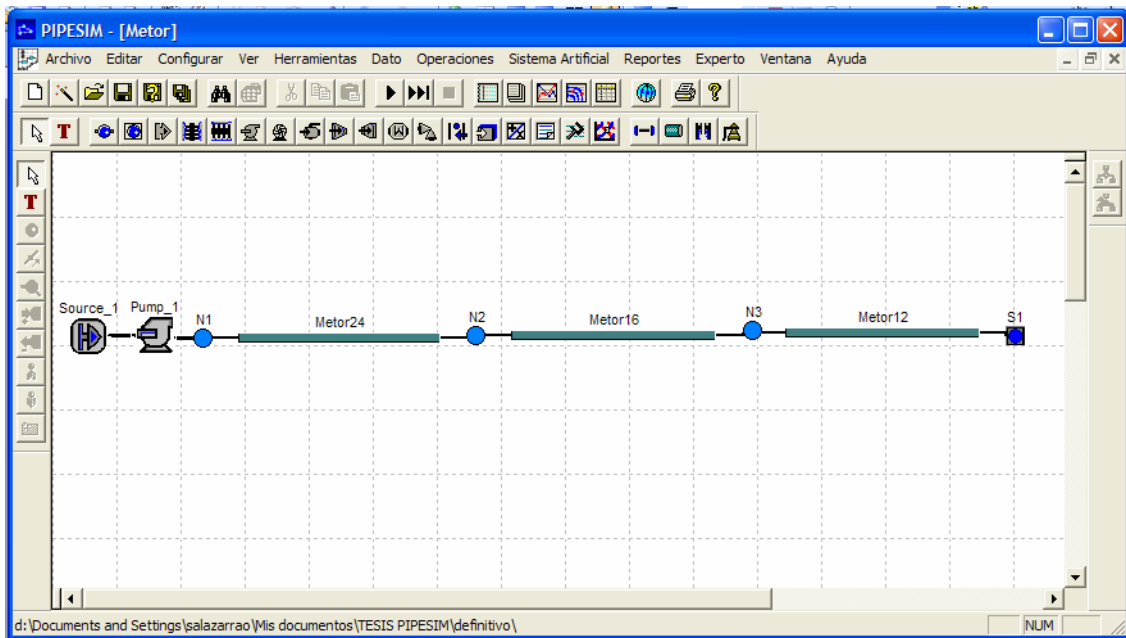
Se procedió a la configuración de las tuberías en PIPESIM<sup>®</sup> siguiendo el esquema mostrado en la figura 6. Este diseño se tomará como referencia para las demás plantas:

1. Se coloca una fuente (*source*) de donde proviene el fluido, el cual viene representado por el tanque de almacenamiento de cada una de las plantas; en este caso en específico las propiedades que lo describen son:

Temperatura: 45°C

Presión: 0 psig.

Se supone que el fluido no se encuentra presurizado dentro del tanque debido a que se encuentra a condiciones ambientales. La temperatura es de 45 °C, porque éste es el valor máximo que se podría conseguir en condiciones ambientales extremas, y ha sido la temperatura de diseño estipulada.



**Figura 6: Esquema gráfico de la configuración de las tuberías de Metor.**

2. El tipo de fluido se incluye como “composicional”, debido a que el metanol se encuentra preestablecido dentro del programa como un fluido acuoso (soluble en agua) y se agrega con una molaridad al 100%, a través de la tubería sólo fluirá metanol líquido; la inclusión del fluido se muestra en la figura 7.

3. Se añade a la configuración la bomba centrífuga, de la cual se tiene la hoja de especificaciones (*data sheet*) por parte de la empresa, la información es incluida en la siguiente ventana (ver Figura 8).

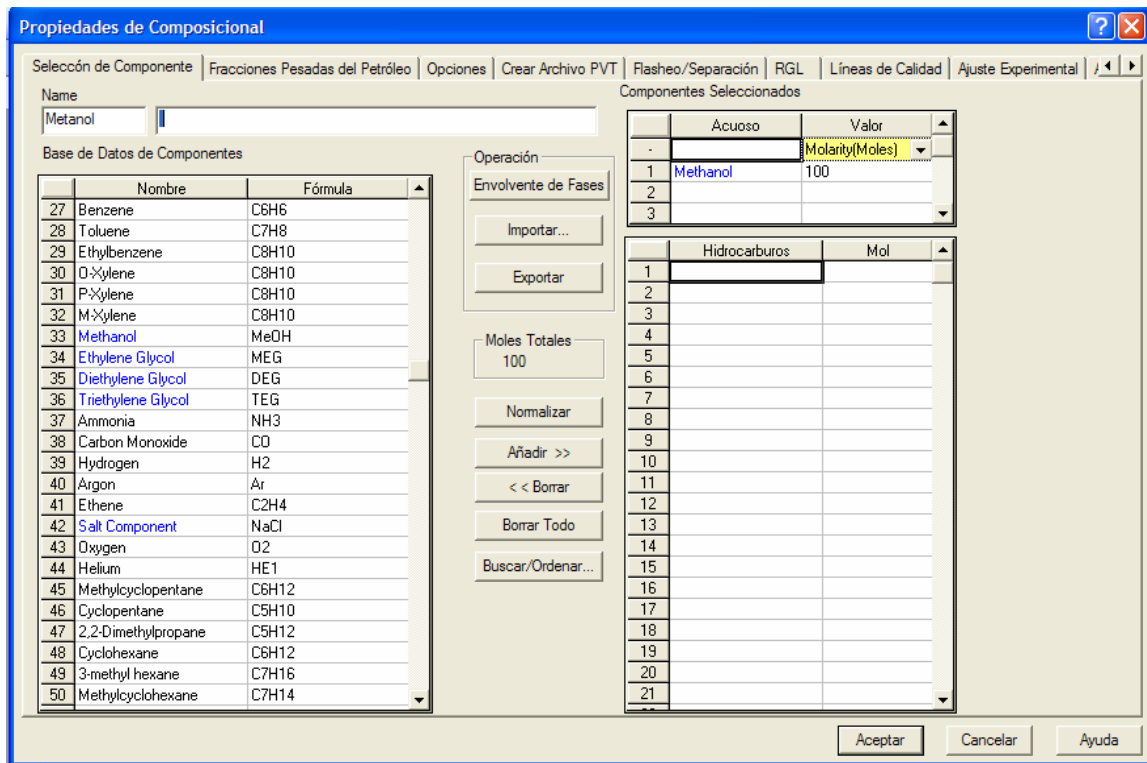


Figura 7: Datos de la configuración del fluido (Metor).

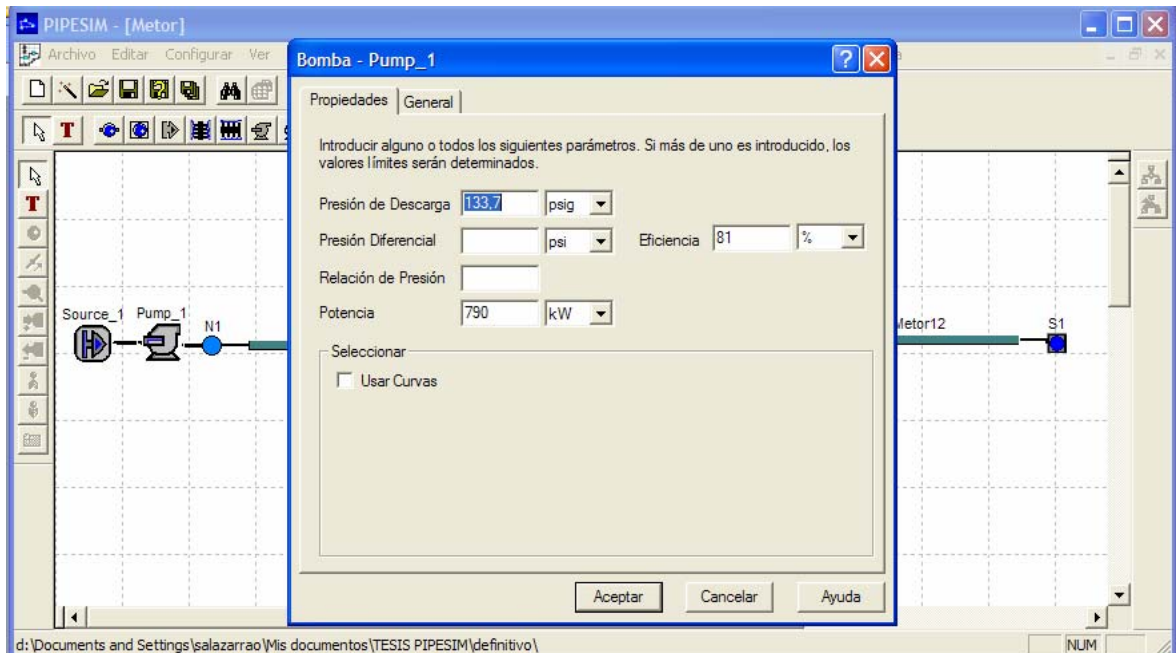
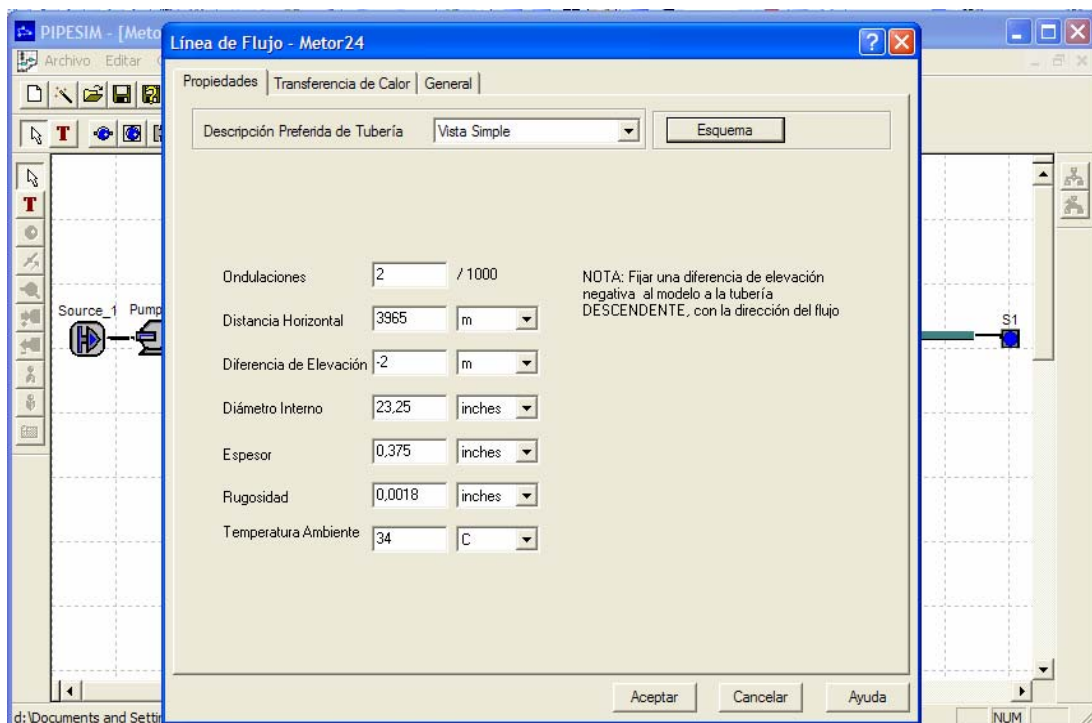


Figura 8: Datos de la configuración del sistema de bombeo de Metor.

4. Se incorpora la línea de 24", la cual es ingresada a la configuración como una línea de flujo; ésta se conecta a la bomba a través de un nodo. Se utilizan estos conectores para la unión de los elementos, y no representan cambio alguno a las propiedades. Los datos necesarios para agregar la línea de flujo son señalados en la figura 9.



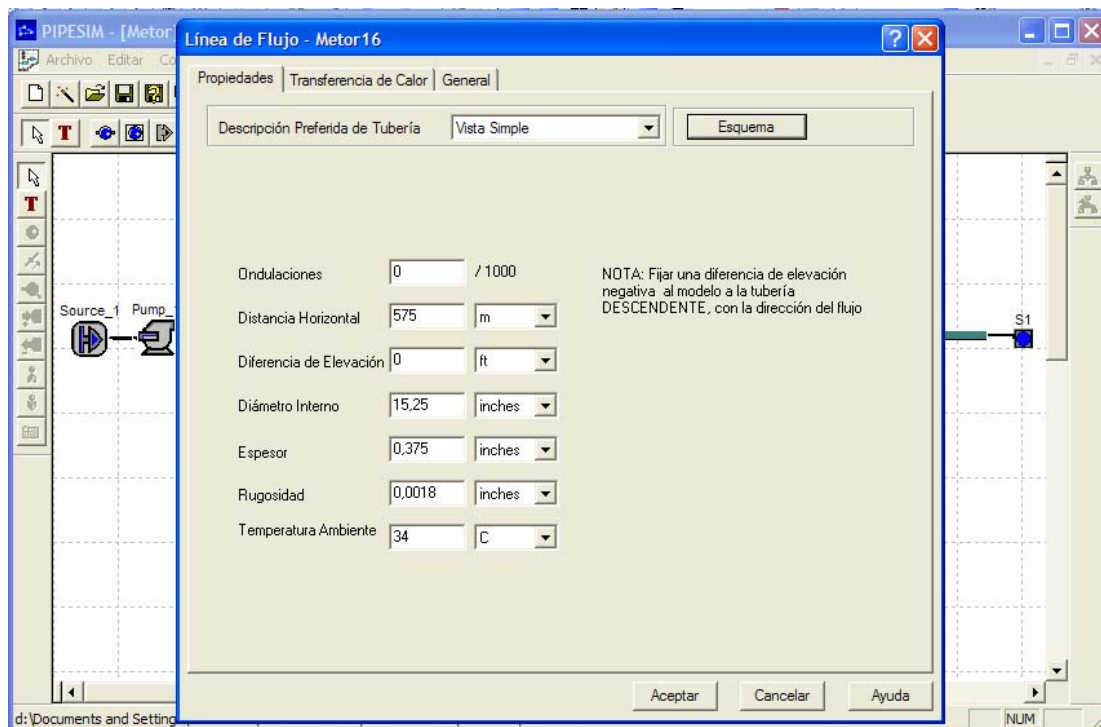
**Figura 9: Datos de la configuración de la línea de 24" de Metor.**

Se colocan 2 ondulaciones por cada mil metros de recorrido, debido a que éste es el número de ondulaciones (altibajos) promedio que presentará el recorrido de la tubería. La diferencia de altura es de 2 m, debido a que la altitud de la planta se encuentra por encima del nivel del muelle en un margen cercano a este valor. La distancia horizontal es la correspondiente al recorrido total de la tubería más la longitud equivalente correspondiente a las válvulas y accesorios. La rugosidad es la

correspondiente al acero al carbono, y la temperatura ambiente es la temperatura promedio reportada en el área.

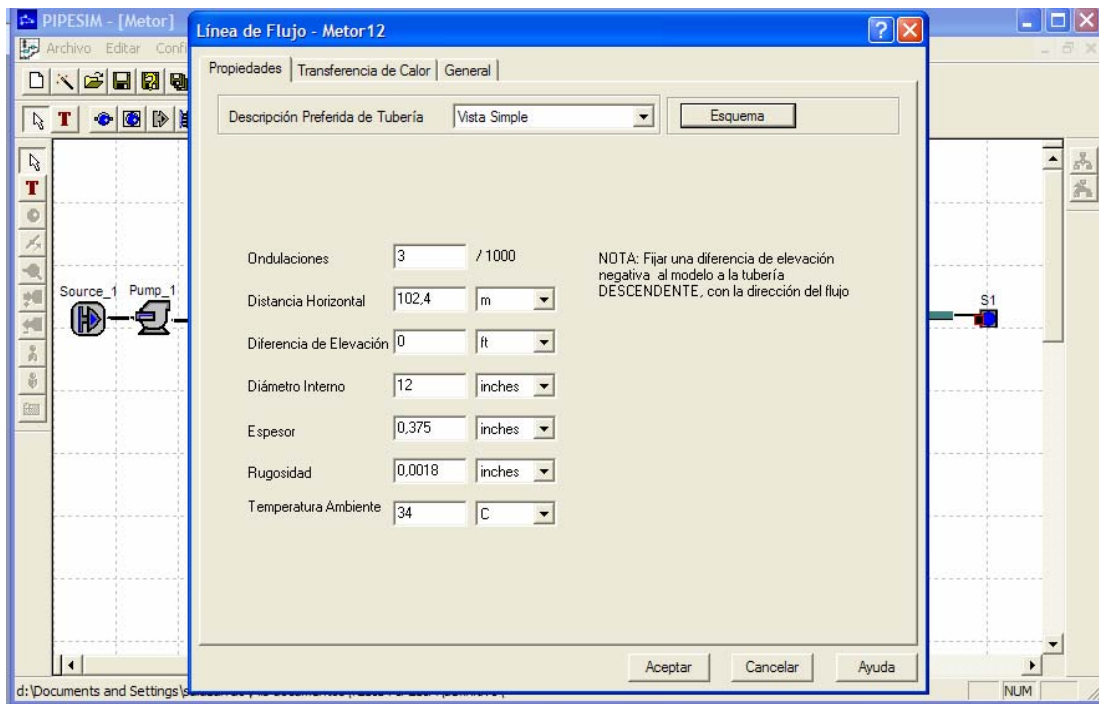
Se incluye como dato que la tubería no tiene recubrimiento y estará rodeada por aire, con lo cual se establece un valor de transferencia de calor entre la tubería y el aire de 20 BTU/h ft<sup>2</sup> °F (dicho valor se encuentra predeterminado en el simulador para estas condiciones).

5. Se agrega la línea de 16", también como una línea de flujo, la cual presenta las características mostradas en la figura 10. Las ondulaciones serán 0, ya que esta línea se encontrará sobre la plataforma del muelle donde no tendrá altibajos, así como tampoco presentará diferencia de altitud en el recorrido. Se prevé con una longitud de 500m, a la cual se debe agregar la longitud equivalente representativa de los accesorios dispuestos en la configuración.



**Figura 10: Datos de la configuración de la línea de 16" de Metor.**

6. Se añade la línea de 12” y tubería final de la configuración. A la salida de ésta, la presión deberá ser al menos 70 psig, para que el fluido pueda hacer el recorrido a través del brazo de carga y atracar al buque con una presión de 20 psig, debido a que éstas son las especificaciones del brazo de carga que será empleado en el muelle. Esta tubería, a diferencia de la de 16”, sí presenta ondulaciones, ya que este último tramo tiene un recorrido tortuoso con diferencias pequeñas de altura. La longitud total de tubería es de 50m, aproximadamente, a los cuales se agrega la longitud equivalente de los accesorios dispuestos en esta tubería. En la figura 11 se pueden observar las propiedades de la línea de 12”.



**Figura 11: Datos de la configuración de la línea de 12” de Metor.**

7. El punto final de la configuración es un nodo frontera, que en este caso en específico, vendrá representado por el inicio del brazo de carga, punto donde la presión deberá ser de 70 psig.

### 2.2.1.2 SuperMetanol

Tomando como base la configuración de tuberías de Metor, se genera un modelo con la misma cantidad y disposición de elementos. A continuación se presenta de forma resumida el diseño de las tuberías de la planta Supermetanol haciendo uso de PIPESIM<sup>®</sup>, donde sólo se reseñan las características que difieren del modelo de metanol de Metor:

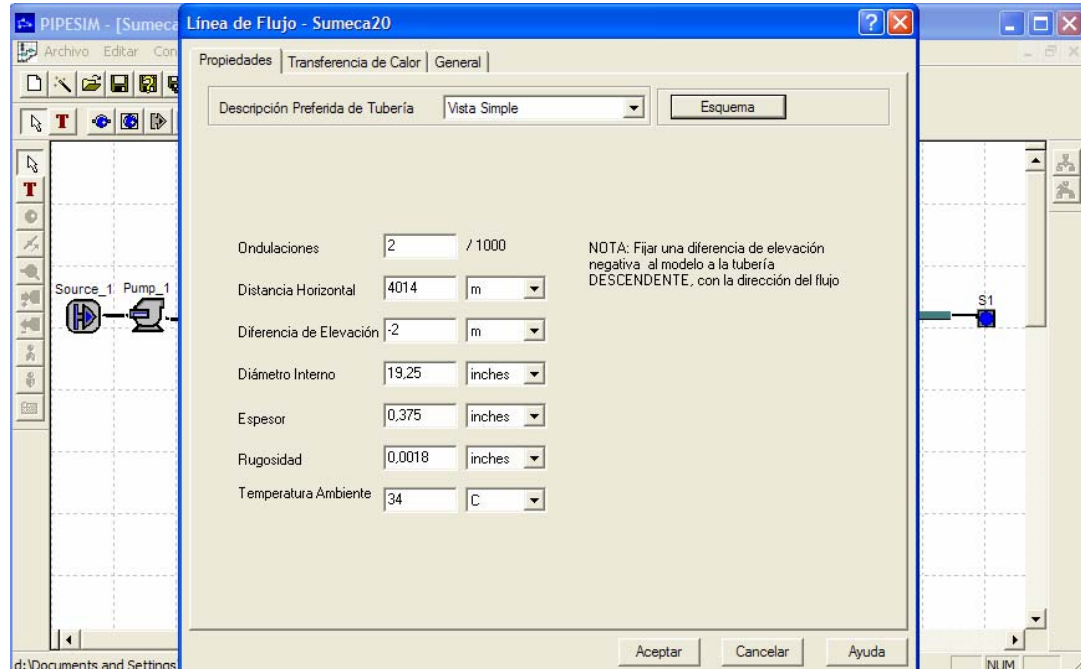
- La bomba centrífuga de la cual se tiene la hoja de especificaciones por parte de la empresa, presenta la siguiente información:

Presión diferencial: 135 psi.

Potencia: 650 kW (resultante del accionamiento de ambas bombas).

Eficiencia: 79,5 %.

- La línea de 20" se ingresa a la configuración con los datos señalados en la figura 12.



**Figura 12: Datos de la configuración de la línea de 20" de SuperMetanol.**

- Las líneas de 16" y 12" tienen las mismas características en todas las configuraciones, estos tramos de tubería se encuentran sobre la plataforma del muelle ubicados sobre el mismo *pipe rack*, de esta manera que las tuberías estarán una junto a la otra; por ende, tendrán las mismas especificaciones.

### 2.2.1.3 MTBE de Super Octanos

La configuración de tuberías de Super Octanos presenta la misma disposición de elementos que la de Metor, a continuación se presenta de forma resumida el diseño de las tuberías haciendo uso de PIPESIM<sup>®</sup>

1. Las propiedades que describen las condiciones del *source* son iguales al caso de Metor.

2. El tipo de fluido se incluye como *black oil*, esto debido a que el simulador no contempla el Metil Terbutil Éter como un fluido preestablecido en sus lineamientos. Para incluir el fluido como petróleo negro, se ingresan los siguientes valores:

Corte de agua: 0 %

GOR (Relación gas-petróleo): 0 scf/STB

Gravedad específica del gas: 0,4

Gravedad específica del agua: 1

Gravedad API: 55,1755

Además, se agrega la información de la viscosidad del fluido, ingresando 2 pares de valores de viscosidad y la temperatura correspondiente; como se ve en la figura 13.

3. Se añade a la configuración la bomba centrífuga, de la cual también se tiene la hoja de información por parte de la empresa. La información incluida es la siguiente:

Presión diferencial: 135 psi.

Potencia: 700 kW.

Eficiencia: 79,5 %.

DEFAULT - Propiedades "Black Oil"

Propiedades "Black Oil" | Datos de Viscosidad (Opcional) | Calibración Avanzada de Datos (Opcional) | Contaminantes (O) |

Viscosidad del Crudo Muerto

Correlación: User's Data

| Temperatura | Viscosidad |
|-------------|------------|
| 40 C        | 0,256 cP   |
| 20 C        | 0,32 cP    |

API = 55

Método de Cálculo de la Viscosidad de Líquido

Límite de % de Agua: 60 %

Fija igual a la Viscosidad del crudo a la del agua <= límite de agua, viscosidad del agua > límite de agua

Relación de Volúmenes de las viscosidades del crudo y agua

Usa la Correlación de Woelflin a porcentajes del agua <= límite de agua, y fija igual a la viscosidad del agua > límite de agua

Viscosidad del Crudo Vivo: Chew & Connally

Viscosidad del Crudo Bajosaturado: Vasquez & Beggs

Aceptar Cancelar Ayuda

**Figura 13: Datos de viscosidad para la configuración de MTBE de Super Octanos.**

4. Luego se incorpora la línea de 20", la cual se ingresa a la configuración como una línea de flujo. Los datos necesarios para la inclusión de la línea principal de 20" se presentan en la Figura 14.

5. Al igual que para la configuración de Metor, se agregan las líneas de 16" y 12", las cuales tienen las mismas características en todas las configuraciones.

The screenshot shows a software window titled "Línea de Flujo - MTBE20" with a blue header bar. Below the header, there are tabs for "Propiedades", "Transferencia de Calor", and "General". The "General" tab is active. At the top, there is a dropdown menu for "Descripción Preferida de Tubería" set to "Vista Simple" and a button labeled "Esquema".

The main area contains several input fields and dropdown menus for pipe properties:

- Ondulaciones: 3 / 1000
- Distancia Horizontal: 4379 m
- Diferencia de Elevación: -2 m
- Diámetro Interno: 19.25 inches
- Espesor: 0.375 inches
- Rugosidad: 0.0018 inches
- Temperatura Ambiente: 34 C

On the right side, there is a note: "NOTA: Fijar una diferencia de elevación negativa al modelo a la tubería DESCENDENTE, con la dirección del flujo". At the bottom, there are three buttons: "Aceptar", "Cancelar", and "Ayuda".

**Figura 14: Datos de la configuración de la línea de 20” de MTBE de Super Octanos.**

#### 2.2.1.4 IsoOctano de Super Octanos

Tomando como base la configuración de MTBE de la misma planta, se presenta de forma resumida el diseño de las tuberías haciendo uso de PIPESIM<sup>®</sup>.

Las propiedades divergentes entre este caso y MTBE, básicamente son los datos ingresados para la caracterización del fluido y las propiedades de la línea de 20”. De esta manera se hace referencia sólo a estos valores, los cuales son:

- El tipo de fluido se incluye como *black oil* para lo cual se ingresaron los siguientes valores:

Corte de agua: 0 %

GOR (Relación gas-petróleo): 0 scf/STB

Gravedad específica del gas: 0,4

Gravedad específica del agua: 1

Gravedad API: 73,5724

- Se agrega información adicional de la viscosidad del fluido, ingresando 2 pares de valores de viscosidad y la temperatura correspondiente; que para este caso son las siguientes:

| Temperatura (°C) | Viscosidad (cP) |
|------------------|-----------------|
| 40               | 0,46            |
| 20               | 0,55            |

- La configuración de la línea de 20” se muestra en la figura 15.

Línea de Flujo - ISOCT20

Propiedades | Transferencia de Calor | General

Descripción Preferida de Tubería Vista Simple Esquema

Ondulaciones 3 / 1000

Distancia Horizontal 5084 m

Diferencia de Elevación -2 m

Diámetro Interno 19,25 inches

Espesor 0,375 inches

Rugosidad 0,0018 inches

Temperatura Ambiente 34 C

NOTA: Fijar una diferencia de elevación negativa al modelo a la tubería DESCENDENTE, con la dirección del flujo

Aceptar Cancelar Ayuda

**Figura 15: Datos de la configuración de la línea de 20” de IsoOctano de Super Octanos.**

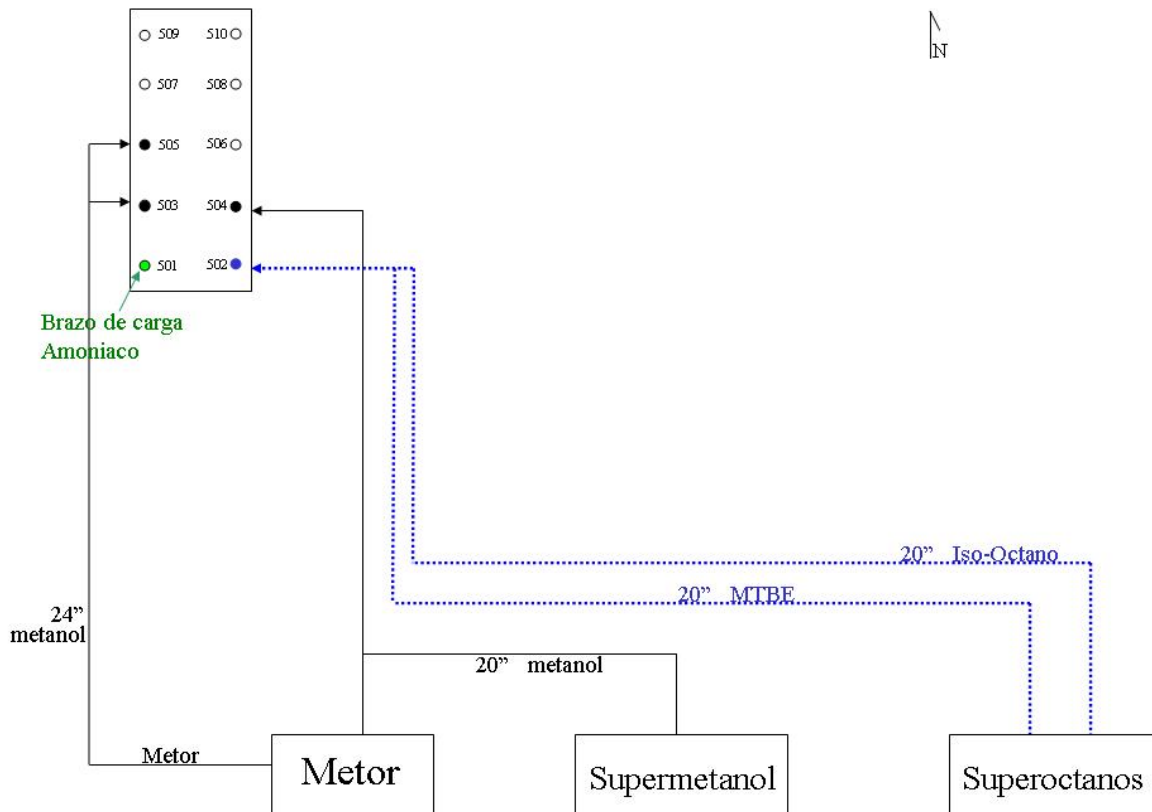
## **2.3 REVISIÓN DEL MODELO DE OCUPACIÓN DEL MUELLE**

### **2.3.1 CONFIGURACIÓN DE LOS BRAZOS DE CARGA EN LA PLATAFORMA DISPUESTA PARA EL PROYECTO.**

El proyecto “Facilidades para el Despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano a través del Muelle Petroquímico de Jose” busca reubicar el despacho de productos de las empresas mixtas (Metor, Supermetanol y Super Octanos), en la actualidad despachados a través del Muelle Criogénico propiedad de PDVSA ubicado en el Complejo Industrial José Antonio Anzoátegui.

El estudio ocupacional del Muelle Petroquímico de Jose se adjudicó a una compañía privada; sin embargo, es requerimiento del presente Trabajo Especial de Grado, hacer una breve revisión a dicho Muelle para disponer de un estimado de tiempo requerido para el embarque de buques, si se bombea el producto a la máxima carga que permita la configuración de cada una de las líneas. Para la realización de este objetivo, la información recolectada para la evaluación de la ocupación del muelle, está basada según el promedio mensual de despacho actual a través del muelle de PDVSA y el despacho mensual a través del Muelle Petroquímico.

Se anexa un modelo rudimentario donde se presenta la disposición de los brazos de carga, los cuales serán habilitados para despacho de cada uno de los productos involucrados con el proyecto del cual es parte este trabajo (ver Figura 16).



**Figura 16: Modelo Esquemático de la disposición de los Brazos De Carga en el Muelle Petroquímico Jose.**

Los brazos de carga que se empleen en el proyecto, preferiblemente deberán ser de las mismas características y dimensiones, de ser posible de la misma marca, para facilitar las labores de mantenimiento y obtención de repuestos. Deberán tener un diámetro de 12” y tener facilidad para retorno de vapores, debido a que así lo contemplan las normativas gubernamentales. Las principales características con las cuales deben cumplir los brazos de carga que se ubicarán en las posiciones M-502, M-503, M-504 y M-505 del Muelle Petroquímico se presentan en la tabla 11.

**Tabla 11: Características de los brazos de carga.**

| Posición   | M-503 / M-505          | M-504                  | M-502         | M-502         |
|--|------------------------|------------------------|---------------|---------------|
| Producto   | Metanol                | Metanol                | MTBE          | Iso-Octano    |
| Procedencia                                      | Metor y/o Supermetanol | Supermetanol y/o Metor | Super Octanos | Super Octanos |
| Diámetro (in)                                    | 12                     | 12                     | 12            | 12            |
| Tasa de flujo (m <sup>3</sup> /h)                | 2500                   | 2000                   | 2000          | 2000          |
| Temperatura de operación (°C)                    | 45                     | 45                     | 45            | 45            |
| Gravedad específica @45°C                        | 0,76                   | 0,765                  | 0,716         | 0,662         |
| Viscosidad @45°C (cP)                            | 0,42                   | 0,42                   | 0,27          | 0,38          |
| Presión de vapor @45°C (psia)                    | 4,1                    | 4,1                    | 8,3           | 1,7           |
| Presión requerida en la entrada (psig)           | 70                     | 70                     | 70            | 70            |
| Presión de descarga (psig)                       | 20                     | 20                     | 20            | 20            |
| Presión de descarga de las bombas (psig)         | 133,7                  | 135                    | 135           | 135           |
| Presión máxima de operación de las bombas (psig) | 170                    | 170                    | 170           | 170           |

Se obtuvo información de la disposición de ventanas operacionales empleadas por las empresas mixtas involucradas en el proyecto, según un reporte mensual de despacho a través del Muelle Criogénico. Se presenta la información mencionada en la tabla 12, la cual hace referencia al despacho de los productos y las capacidades de los buques a cargar, esto en un período de tiempo de un mes.

**Tabla 12: Programación Mensual de Ventanas Muelle No 9.**

| Ventanas     | Empresa                  | Producto | Volumen [TM] |
|--------------|--------------------------|----------|--------------|
| 1 - 2 - 3    | Supermetanol             | Metanol  | 15.000       |
| 3 - 4 - 5    | Metor                    | Metanol  | 21.000       |
| 6 - 7 - 8    | Metor                    | Metanol  | 13.100       |
| 8 - 9 - 10   | Super Octanos            | MTBE     | 21.000       |
|              | Metor                    | Metanol  | 17.000       |
| 11 - 12 - 13 | Supermetanol             | Metanol  | 15.000       |
| 13 - 14 - 15 | Supermetanol             | Metanol  | 15.000       |
| 16 - 17 - 18 | Metor                    | Metanol  | 15.000       |
| 18 - 19 - 20 | Metor                    | Metanol  | 10.000       |
|              | Supermetanol             | Metanol  | 10.000       |
| 21 - 22 - 23 | Super Octanos            | MTBE     | 24.000       |
| 24 - 25 - 26 | Ventana de Mantenimiento |          |              |
| 27 - 28 - 29 | Super Octanos            | MTBE     | 11.000       |
| 29 - 30 - 31 | Supermetanol             | Metanol  | 10.000       |

De igual forma se conoce la producción mensual de la empresa FertiNitro a través de la Plataforma de líquidos del Muelle Petroquímico, si se unen el promedio de producciones mensuales de cada empresa se tienen los siguientes datos:

Metor: 70 MTMM

Supermetanol: 52,5 MTMM

Super Octanos: 40 MTMM

FertiNitro: 33,6 MTMM

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS

#### 3.1 SELECCIÓN DEL ESPESOR DE PARED

Según la ecuación 32, de la sección 2.4.4.4, para tuberías metálicas rectas con presiones internas, la fórmula para el espesor mínimo de pared que se requiere  $t_m$  es aplicable para relaciones  $D_o/t$  mayores de 6.

Se realiza el cálculo típico para las tuberías de 20", tomando  $t$  como 1,969", el cual es el espesor con mayor magnitud que se puede conseguir en el mercado, la relación  $D_o/t = 10,157$ ; siendo mayor de 6, se realizan los cálculos utilizando la ecuación 32 sin inconvenientes.

Para el cálculo de los espesores mínimos, los datos son obtenidos de las especificaciones ASME B31.3 y de las condiciones operacionales del proyecto. La presión máxima corresponde a la presión máxima de resistencia de las tuberías. A continuación se muestra el cálculo típico para las tuberías con costura de 20"

$$P= 250\text{psig}$$

$$S= 20.000 \text{ psig}$$

$$D_o= 20''$$

$$Y= 0,4$$

$$c= 0,065$$

$$E= 0,85$$

$$t_m = \frac{PD_o}{2(SE + PY)} + c = \frac{250 \text{ psig} \times 20 \text{ in}}{2(20.000 \text{ psig} \times 0,85 + 250 \text{ psig} \times 0,4)} + 0,065 \text{ in} \Rightarrow 0,2112 \text{ in}$$

$$t_m = 0,21 \text{ in} \Rightarrow 5,36 \text{ mm}$$

Al valor de espesor (5,36mm) se debe aplicar la tolerancia correspondiente a esta tubería, que se lee en la norma ASME B31.3 y es de 12,5% para todos los casos, con lo cual el valor del espesor estaría entre 4,69 – 6,04 mm correspondiente a un *Schedule 10* (6,35mm) siendo éste el valor más cercano a dicho espesor. Como

medida preventiva se aplica un factor de seguridad al diseño, correspondiente a las pérdidas de espesor por corrosión y erosión, así como pérdidas mecánicas producto del efecto de golpe de ariete, que pueda sufrir la tubería. De esta manera se toma cédula estándar para todas las tuberías, ya que todos los valores de espesores mínimos se encuentran por debajo del *schedule* estándar comercial. A continuación se muestran los resultados para cada una de las líneas con costura (Tabla 13) y se compararon con los espesores de tubería con cédula estándar. La Tabla 14 reseña estos mismos cálculos para tubería sin costura.

**Tabla 13: Espesores mínimos de las líneas con costura.**

| Diámetro                                    | 24"             | 20"               | 16"               | 12"               |
|---|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Presión máxima (psig)                       | 250             | 250               | 250               | 250               |
| Diámetro externo (in)                       | 24              | 20                | 16                | 12,75             |
| A (in)                                      | 0,065           | 0,065             | 0,065             | 0,065             |
| S (Psig)                                    | 20000           | 20000             | 20000             | 20000             |
| Y (-)                                       | 0,4             | 0,4               | 0,4               | 0,4               |
| E (-)                                       | 0,85            | 0,85              | 0,85              | 0,85              |
| $t_m$ (in)                                  | 0,24            | 0,211             | 0,182             | 0,158             |
| Espesor mínimo aceptable (in)               | $0,24 \pm 0,03$ | $0,211 \pm 0,026$ | $0,182 \pm 0,023$ | $0,158 \pm 0,020$ |
| Espesor de tubería con cédula estándar (in) | 0,375           | 0,375             | 0,375             | 0,375             |

**Tabla 14: Espesores mínimos de las líneas sin costura.**

| Diámetro                                    | 24"                | 20"                | 16"               | 12"               |
|---|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Presión máxima (psig)                       | 250                | 250                | 250               | 250               |
| Diámetro externo (in)                       | 24                 | 20                 | 16                | 12,75             |
| A (in)                                      | 0,065              | 0,065              | 0,065             | 0,065             |
| S (psig)                                    | 20000              | 20000              | 20000             | 20000             |
| Y (-)                                       | 0,4                | 0,4                | 0,4               | 0,4               |
| E (-)                                       | 1                  | 1                  | 1                 | 1                 |
| $t_m$ (in)                                  | 0,214              | 0,189              | 0,165             | 0,144             |
| Espesor mínimo aceptable (in)               | $0,214 \pm 0,0267$ | $0,189 \pm 0,0236$ | $0,165 \pm 0,020$ | $0,144 \pm 0,018$ |
| Espesor de tubería con cédula estándar (in) | 0,375              | 0,375              | 0,375             | 0,375             |

La costura en las tuberías no influye en los cálculos hidráulicos, debido a que la soldadura con resistencia eléctrica no genera aporte de material a la tubería, lo que indica que no habrá variación del espesor debido a la costura. Las tuberías principales serán las únicas con costura, por ser éstas las únicas presentes en el corredor de tubería ubicado en las calles C y F. Las longitudes de cada uno de los tramos con y sin costura son los siguientes:

**Tabla 15: Longitudes de tubería con y sin costura.**

| Longitudes de tubería | METANOL<br>Metor | METANOL<br>Supermetanol | MTBE<br>Super Octanos | ISO-OCTANO<br>Super Octanos |
|-----------------------|------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Con costura (m)       | 1153             | 1293                    | 1599                  | 2257                        |
| Sin costura (m)       | 2180             | 2180                    | 2180                  | 2180                        |

### **3. 2 CÁLCULO DE LA CAÍDA DE PRESIÓN DEBIDO A LA FRICCIÓN EN LAS TUBERÍAS.**

Para obtener la caída de presión en las tuberías, se realizaron los cálculos en primer lugar haciendo uso de la ecuación de Fanning, considerando condiciones isotérmicas, que a pesar de ser un método más laborioso, permite el conocimiento descriptivo de cada uno de los parámetros, así como la procedencia de los valores utilizados en este diseño. Esto es provechoso en caso de presentarse cualquier divergencia del diseño en etapas futuras del proyecto. Una vez realizados los cálculos con la ecuación de Fanning, se procede a la simulación del diseño con el software PIPESIM<sup>®</sup>, que genera valores de caída de presión de cada una de las líneas, entre otros resultados.

### 3.2.1 ECUACIÓN DE FANNING

Para el cálculo de la caída de presión debido a la fricción se usó la ecuación de Fanning en unidades de campo. Se realizó el cálculo tipo para la tubería de 24" de Metor, tal como se muestra a continuación:

$$\Delta p = 1.14644 \times 10^{-5} \frac{f \cdot \rho \cdot q^2 \cdot L}{d^5}$$

Donde  $\rho$  (g/cc)= 0,753  
 $q$  (bbl/d)= 377389  
 $L$  (ft)= 10932  
 $d$  (in)= 23,25

Para el cálculo del factor de fricción de Fanning, primero es necesario el cálculo del Número de Reynolds, el cual queda:

$$N_{Re} = \frac{d \cdot V \cdot \rho}{\mu}$$

donde:  $d$  (m)= 0,59  
 $V$  (m/s)= 2,5353  
 $\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>)= 752,56  
 $\mu$  (Pa.s)= 4,2x10<sup>-4</sup>

De donde el  $N_{Re} = 2,7 \times 10^6$ , lo cual indica que se presenta flujo turbulento ( $N_{Re} > 4000$ ) y para el cálculo del factor de fricción de Fanning se debe emplear la ecuación de Colebrook (Ec.9).

$$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{N_{Re} \sqrt{f_f}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -2 \log \left( \frac{1,8 \times 10^{-3}}{3,7 \times 23,25} + \frac{2,51}{2,7 \times 10^6 \sqrt{f_f}} \right)$$

$$f_f = 0,0122$$

Para obtener el factor de fricción de Fanning haciendo uso de la ecuación de Colebrook, se realizan iteraciones a partir de un valor inicial, el cual se puede tomar directamente del diagrama de Moody. De acuerdo a la figura 4, el valor de factor de fricción de Darcy que se lee correspondiente para  $N_{Re} = 2,7 \times 10^6$  y  $\varepsilon/D = 7,7 \times 10^{-5}$ , es

$f_D=0,003$ , lo cual representa un factor de fricción de Fanning de 0,012, ya que el factor de fricción de Darcy representa 4 veces el factor de fricción de Fanning.

Una vez calculado este valor, se procede al cálculo de la pérdida de presión debido a la fricción, haciendo uso de la ecuación de Fanning, quedando:

$$\Delta p = 1,14644 \times 10^{-5} \frac{f \cdot \rho \cdot q^2 \cdot L}{d^5}$$

$$\Delta p = 1,14644 \times 10^{-5} \frac{0,0122 * 0,753 * 377389^2 * 10932}{23,25^5}$$

$$\Delta p = 24,07 \text{ psi}$$

Para este caso la caída de presión es de 24 psi, es decir, la presión con la cual llega el fluido al término del recorrido de la tubería de 24" es 24 psi menor que al salir de la bomba. Para los tramos de tubería subsiguientes (16" y 12") los cálculos se hacen de forma análoga. Se debe tener en cuenta la pérdida por fricción que sufre el fluido al pasar a través de cada uno de los dispositivos de control a lo largo de la tubería. En este caso, se han tomado valores de longitud equivalente según el tipo de accesorio, los cuales se adicionan a la longitud de cada una de las tuberías para luego calcular la pérdida de presión debido a la fricción.

Para el cálculo de las pérdidas de presión debido a la fricción en los accesorios y válvulas, como se vió en el Capítulo II, se hará uso de la tabla 3 y se tomarán las longitudes equivalentes de cada accesorio señaladas en la Tabla 10. Dicho valor de longitud equivalente se agrega a las longitudes de las líneas y se calcula la caída de presión en cada una de éstas.

Hasta la fecha ha sido entregada la siguiente información de la cantidad y tipo de accesorios correspondientes a cada una de las líneas (Tablas 16 y 17), de donde se pueden obtener las longitudes equivalentes que se adicionan a las longitudes totales de tubería, en cada una de las configuraciones.

La pérdida de presión en las tuberías debido a la aceleración se desprecia por haberse corroborado flujo turbulento en todas las tuberías; de igual forma, la caída de

presión debido a la fuerza potencial se desprecia en estos cálculos iniciales, debido a que la pérdida de altura de la tubería total se estima de 2m, lo cual es poco representativo en un recorrido total de más de 4 Km en cada uno de los casos.

**Tabla 16: Cantidad de accesorios y longitudes equivalentes correspondientes a las líneas de Metor y SuperMetanol.**

| Tipo de accesorio o válvula     | Metor |     |     | Supermetanol |     |     |
|---------------------------------|-------|-----|-----|--------------|-----|-----|
|                                 | 24"   | 16" | 12" | 20"          | 16" | 12" |
| Unión                           |       |     |     |              |     |     |
| Codo 90° regular                |       |     |     |              |     |     |
| Codo 90° radio largo            | 57    |     |     | 53           |     |     |
| Codo 45° regular                | 12    |     |     | 8            |     |     |
| "T" de línea de flujo           |       |     |     |              |     |     |
| "T" de ramal de flujo           |       |     |     |              |     |     |
| Válvula de globo                |       |     |     |              |     |     |
| Válvula de compuerta            |       |     |     |              |     |     |
| Válvula angular                 |       |     |     |              |     |     |
| Válvula de retención deslizante |       |     |     |              |     |     |
| Entrada de filos rectos         | 1     |     |     | 1            |     |     |
| Salida tubería                  |       |     | 1   |              |     | 1   |
| Reductor de diámetro            | 1     | 1   |     | 1            | 1   |     |
| Longitud Equivalente Total [ft] | 2077  | 62  | 172 | 1618         | 62  | 172 |

**Tabla 17: Cantidad de accesorios y longitudes equivalentes correspondientes a las líneas propiedad de Super Octanos.**

| Tipo de accesorio o válvula     | MTBE |     |     | Iso-Octano |     |     |
|---------------------------------|------|-----|-----|------------|-----|-----|
|                                 | 20"  | 16" | 12" | 20"        | 16" | 12" |
| Unión                           |      |     |     |            |     |     |
| Codo 90° regular                |      |     |     |            |     |     |
| Codo 90° radio largo            | 57   |     |     | 60         |     |     |
| Codo 45° regular                | 12   |     |     | 16         |     |     |
| "T" de línea de flujo           |      |     |     |            |     |     |
| "T" de ramal de flujo           |      |     |     |            |     |     |
| Válvula de globo                |      |     |     |            |     |     |
| Válvula de compuerta            |      |     |     |            |     |     |
| Válvula angular                 |      |     |     |            |     |     |
| Válvula de retención deslizante |      |     |     |            |     |     |
| Entrada de filos rectos         | 1    |     |     | 1          |     |     |
| Salida tubería                  |      |     | 1   |            |     | 1   |
| Reductor de diámetro            | 1    | 1   |     | 1          | 1   |     |
| Longitud Equivalente Total [ft] | 1798 | 62  | 172 | 1953       | 62  | 172 |

A continuación se presentan tablas con el resumen del cálculo de cada uno de estos parámetros aplicados a cada una de las líneas (Tablas 18, 19 y 20).

**Tabla 18: Resumen de los cálculos de caída de presión en las Tuberías Principales**

|   | METANOL<br>Metor          | METANOL<br>Supermetanol    | MTBE<br>Super Octanos      | ISO-OCTANO<br>Super Octanos |
|---|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Diámetro de la tubería, D (in)                  | 24                        | 20                         | 20                         | 20                          |
| Longitud de la tubería, L (ft)                  | 10932                     | 11394                      | 12398                      | 14557                       |
| Longitud Equivalente accesorios (ft)            | 2077                      | 1618                       | 1798                       | 1953                        |
| Longitud <sub>total</sub> de la tubería, L (ft) | 13009                     | 13012                      | 14196                      | 16510                       |
| P <sub>descarga</sub> bombas (psig)             | 133,7                     | 135                        | 135                        | 135                         |
| Flujo de diseño (m <sup>3</sup> /h)             | 2500                      | 2000                       | 2000                       | 2000                        |
| <b>NUMERO DE REYNOLDS</b>                       | <b>2,7x10<sup>6</sup></b> | <b>2,6 x10<sup>6</sup></b> | <b>3,8 x10<sup>6</sup></b> | <b>2,5 x10<sup>6</sup></b>  |
| f <sub>f</sub> (Ec de Colebrook)                | 0,0122                    | 0,0125                     | 0,0123                     | 0,0125                      |
| <b>Δp (psi)</b>                                 | <b>28,64</b>              | <b>48,75</b>               | <b>49,00</b>               | <b>53,65</b>                |
| <b>Presión final (psia)</b>                     | <b>119,76</b>             | <b>100,95</b>              | <b>100,70</b>              | <b>96,05</b>                |

**Tabla 19: Resumen de los cálculos de caída de presión en las Tuberías de 16”**

|   | METANOL<br>Metor          | METANOL<br>SuperMetanol    | MTBE<br>Super Octanos      | ISO-OCTANO<br>Super Octanos |
|---|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Diámetro de la tubería, D (in)                  | 16                        | 16                         | 16                         | 16                          |
| Longitud de la tubería, L (ft)                  | 1640                      | 1640                       | 1640                       | 1640                        |
| Longitud Equivalente accesorios (ft)            | 62                        | 62                         | 62                         | 62                          |
| Longitud <sub>total</sub> de la tubería, L (ft) | 1702                      | 1702                       | 1702                       | 1702                        |
| P <sub>descarga</sub> bombas (psig)             | 133,7                     | 135                        | 135                        | 135                         |
| Flujo de diseño, Q (m <sup>3</sup> /h)          | 2500                      | 2000                       | 2000                       | 2000                        |
| <b>NUMERO DE REYNOLDS</b>                       | <b>4,1x10<sup>6</sup></b> | <b>3,3 x10<sup>6</sup></b> | <b>4,8 x10<sup>6</sup></b> | <b>3,2 x10<sup>6</sup></b>  |
| f <sub>f</sub> (Ec de Colebrook)                | 0,0127                    | 0,0128                     | 0,0127                     | 0,0128                      |
| <b>Δp (psi)</b>                                 | <b>32,34</b>              | <b>20,97</b>               | <b>19,42</b>               | <b>18,18</b>                |
| <b>Presión final (psia)</b>                     | <b>87,42</b>              | <b>79,97</b>               | <b>81,28</b>               | <b>77,88</b>                |

**Tabla 20: Resumen cálculo de caída de presión en las Tuberías de 12”**

|   | METANOL<br>Metor          | METANOL<br>SuperMetanol    | MTBE<br>Super Octanos      | ISO-OCTANO<br>Super Octanos |
|---|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Diámetro de la tubería, D (in)                  | 12,75                     | 12,75                      | 12,75                      | 12,75                       |
| Longitud de la tubería, L (ft)                  | 164                       | 164                        | 164                        | 164                         |
| Longitud Equivalente accesorios (ft)            | 172                       | 172                        | 172                        | 172                         |
| Longitud <sub>total</sub> de la tubería, L (ft) | 336                       | 336                        | 336                        | 336                         |
| P <sub>descarga</sub> bombas (psig)             | 133,7                     | 135                        | 135                        | 135                         |
| Flujo de diseño, Q (m <sup>3</sup> /h)          | 2500                      | 2000                       | 2000                       | 2000                        |
| <b>NUMERO DE REYNOLDS</b>                       | <b>5,2x10<sup>6</sup></b> | <b>4,2 x10<sup>6</sup></b> | <b>6,1 x10<sup>6</sup></b> | <b>4 x10<sup>6</sup></b>    |
| f <sub>f</sub> (Ec de Colebrook)                | 0,0132                    | 0,0133                     | 0,0132                     | 0,0133                      |
| <b>Δp (psi)</b>                                 | <b>21,93</b>              | <b>14,19</b>               | <b>13,19</b>               | <b>12,29</b>                |
| <b>Presión final (psia)</b>                     | <b>65,49</b>              | <b>65,78</b>               | <b>68,09</b>               | <b>65,58</b>                |

Se debe tomar en consideración que en las especificaciones de los brazos de carga que estipula Pequiven, la presión de descarga de la tubería al brazo de carga debe ser de 70 psig (84,7 psia), y dado que ninguna de las configuraciones genera este valor de presión, se debe tener en cuenta que el flujo de diseño no será alcanzado,

porque por debajo de esta presión no se lograría el despacho de los productos debido a que los brazos de carga no serán capaces de levantar el fluido la altura necesaria para cargar los buques.

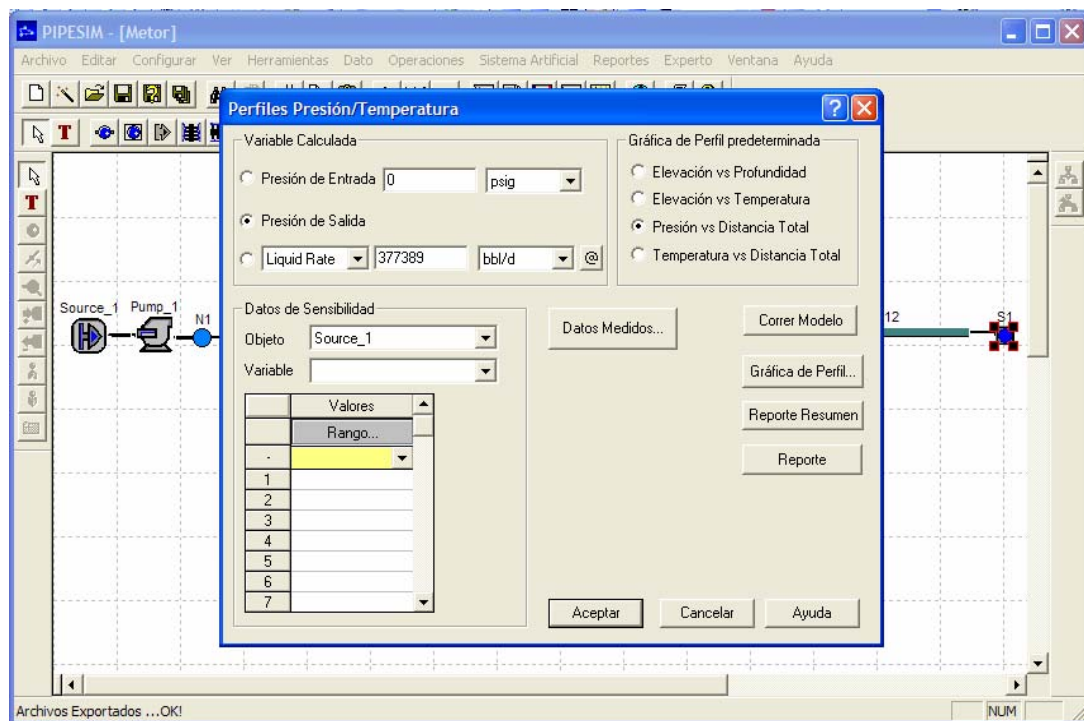
Teniendo como base estos valores de presión esperados para la descarga de las líneas hasta los brazos de carga, se procede a la simulación con el software PIPESIM®.

### 3.2.2 PIPESIM®

Posterior al cálculo de la caída de presión utilizando la ecuación de Fanning, se realizan las simulaciones en PIPESIM® de las configuraciones establecidas anteriormente. A continuación se reseñan por separado cada una de éstas.

#### 3.2.2.1 *Metor*

Luego de ingresar las propiedades del modelo, se procede a la simulación de éste, ingresando presión de entrada y flujo a desplazar (Figura 17).



**Figura 17: Datos a ingresar para la corrida del modelo de la tubería de Metor.**

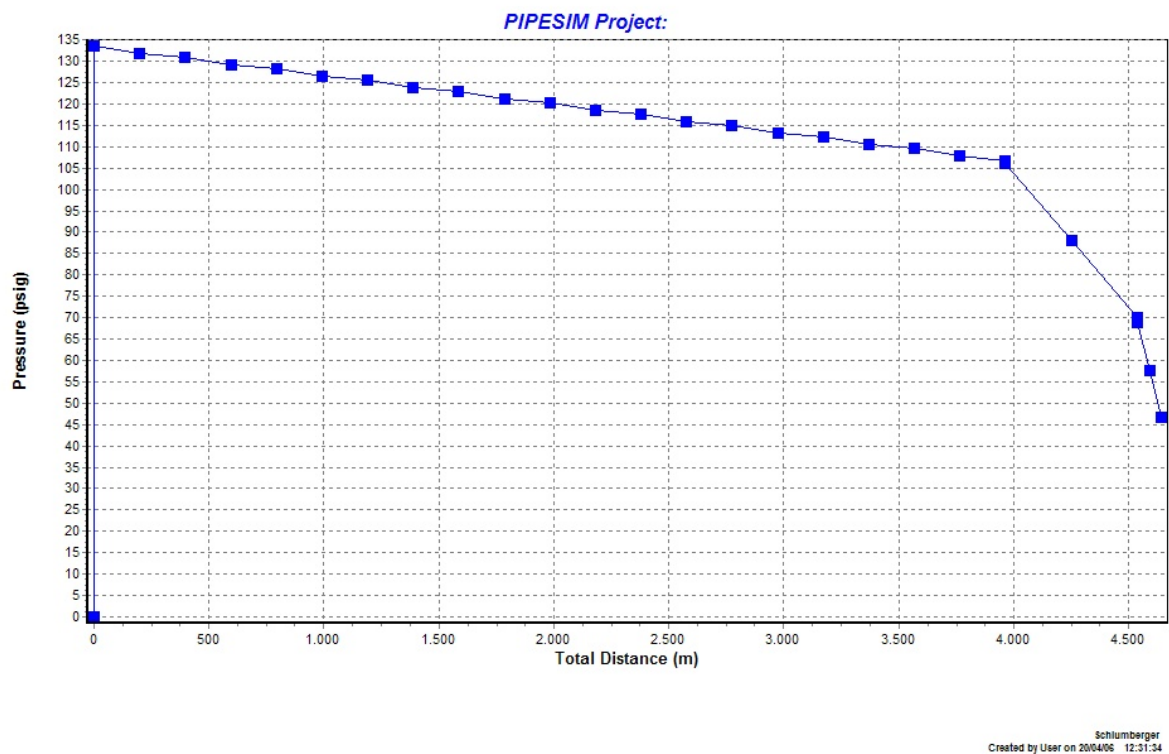
A continuación se resumen en una tabla los principales resultados generados en la simulación del programa:

**Tabla 21: Resultados de la corrida en PIPESIM<sup>®</sup> de la configuración de Metor.**

|   | <i>L</i> | <i>P</i> | <i>T</i> | <i>v</i> | <i>q</i> | <i>P</i>              | fase    | $\mu$ | $N_{Re}$         |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------|---------|-------|------------------|
|   | (ft)     | (psia)   | (F)      | (ft/s)   | (bbl/d)  | (lb/ft <sup>3</sup> ) |         | (cP)  | $\times 10^{-6}$ |
| Linea de Flujo Metor24                  |          |          |          |          |          |                       |         |       |                  |
| 1                                       | 0,0      | 148,28   | 113,18   | 8,319    | 377433   | 47,953                | LÍQUIDO | 0,411 | 2,799            |
| 2                                       | 650,4    | 146,50   | 112,61   | 8,316    | 377287   | 47,971                | LÍQUIDO | 0,413 | 2,786            |
| 3                                       | 1300,8   | 145,58   | 112,07   | 8,313    | 377142   | 47,990                | LÍQUIDO | 0,415 | 2,774            |
| 4                                       | 1951,3   | 143,80   | 111,54   | 8,310    | 377004   | 48,007                | LÍQUIDO | 0,416 | 2,762            |
| 5                                       | 2601,7   | 142,88   | 111,02   | 8,307    | 376868   | 48,025                | LÍQUIDO | 0,418 | 2,750            |
| 6                                       | 3252,1   | 141,10   | 110,52   | 8,304    | 376738   | 48,041                | LÍQUIDO | 0,420 | 2,739            |
| 7                                       | 3902,6   | 140,18   | 110,03   | 8,301    | 376610   | 48,057                | LÍQUIDO | 0,422 | 2,728            |
| 8                                       | 4553,0   | 138,40   | 109,56   | 8,298    | 376488   | 48,073                | LÍQUIDO | 0,423 | 2,718            |
| 9                                       | 5203,4   | 137,48   | 109,10   | 8,296    | 376367   | 48,088                | LÍQUIDO | 0,425 | 2,708            |
| 10                                      | 5853,8   | 135,70   | 108,65   | 8,293    | 376252   | 48,103                | LÍQUIDO | 0,426 | 2,699            |
| 11                                      | 6504,3   | 134,78   | 108,21   | 8,291    | 376139   | 48,118                | LÍQUIDO | 0,428 | 2,689            |
| 12                                      | 7154,7   | 133,00   | 107,79   | 8,288    | 376030   | 48,132                | LÍQUIDO | 0,429 | 2,680            |
| 13                                      | 7805,1   | 132,09   | 107,38   | 8,286    | 375924   | 48,145                | LÍQUIDO | 0,430 | 2,672            |
| 14                                      | 8455,5   | 130,30   | 106,98   | 8,284    | 375822   | 48,158                | LÍQUIDO | 0,432 | 2,664            |
| 15                                      | 9106,0   | 129,39   | 106,60   | 8,281    | 375721   | 48,171                | LÍQUIDO | 0,433 | 2,656            |
| 16                                      | 9756,4   | 127,61   | 106,22   | 8,279    | 375625   | 48,184                | LÍQUIDO | 0,434 | 2,648            |
| 17                                      | 10407,0  | 126,70   | 105,85   | 8,277    | 375530   | 48,196                | LÍQUIDO | 0,436 | 2,640            |
| 18                                      | 11057,0  | 124,91   | 105,50   | 8,275    | 375440   | 48,207                | LÍQUIDO | 0,437 | 2,633            |
| 19                                      | 11708,0  | 124,00   | 105,15   | 8,273    | 375351   | 48,219                | LÍQUIDO | 0,438 | 2,626            |
| 20                                      | 12358,0  | 122,22   | 104,82   | 8,271    | 375266   | 48,230                | LÍQUIDO | 0,439 | 2,620            |
| 21                                      | 13008,0  | 121,31   | 104,49   | 8,269    | 375182   | 48,240                | LÍQUIDO | 0,440 | 2,613            |
| Linea de Flujo Metor16<br>(nuevo datum) |          |          |          |          |          |                       |         |       |                  |
| 22                                      | 0        | 120,72   | 104,49   | 1,922    | 375183   | 48,240                | LÍQUIDO | 0,440 | 3,984            |
| 23                                      | 943,24   | 102,51   | 104,24   | 1,922    | 375166   | 48,243                | LÍQUIDO | 0,441 | 3,979            |
| 24                                      | 1886,5   | 84,29    | 104,00   | 1,922    | 375150   | 48,245                | LÍQUIDO | 0,441 | 3,975            |
| Linea de Flujo Metor12<br>(nuevo datum) |          |          |          |          |          |                       |         |       |                  |
| 25                                      | 0        | 83,28    | 104,00   | 3,104    | 375153   | 48,244                | LÍQUIDO | 0,441 | 5,052            |
| 26                                      | 167,98   | 71,97    | 104,00   | 3,104    | 375182   | 48,241                | LÍQUIDO | 0,441 | 5,054            |
| 27                                      | 335,96   | 61,00    | 103,99   | 3,105    | 375210   | 48,237                | LÍQUIDO | 0,441 | 5,056            |

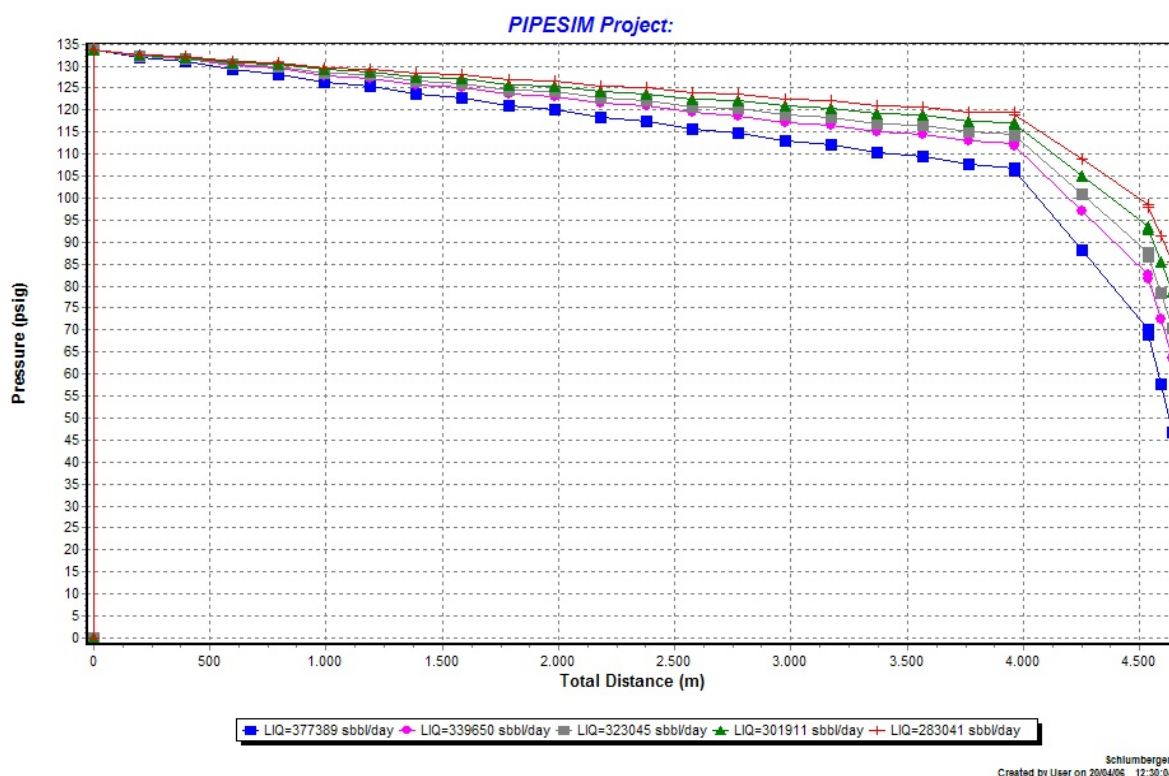
Para el Metanol, tanto en esta configuración como para la de Supermetanol, se hicieron pruebas de selección entre los modelos de viscosidad: Pedersen y LBC (Lohrenz-Bray-Clark), siendo Pedersen el que mejor se ajusta al modelo de viscosidad del metanol a pesar de ser usado generalmente para gas natural y petróleo.

Se puede apreciar en los resultados de la corrida, que el sistema tiene una presión final de 46,3 psig (61,0 psia). De igual forma, en la figura 18 se observa que la presión en la salida de la tubería de 12" no alcanza 70 psig, por lo que se somete el modelo a un análisis de sensibilidad variando el flujo de despacho para asegurar la presión mínima requerida de descarga al brazo de carga.



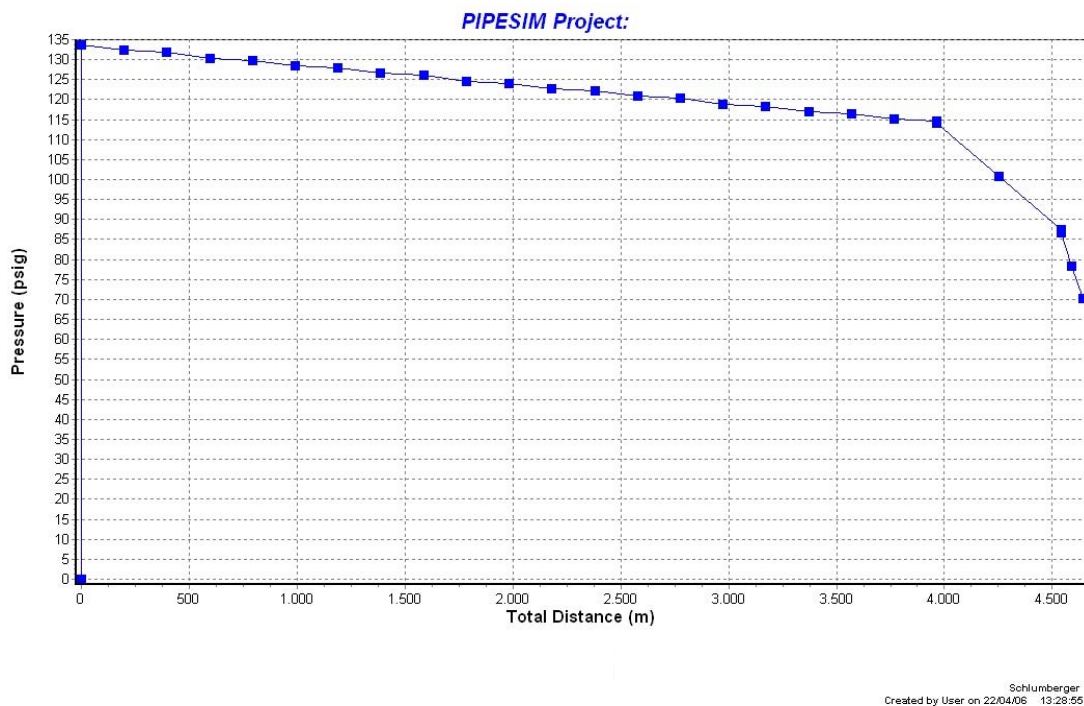
**Figura 18: Gráfica Presión vs Distancia (Metor)  $q= 2500\text{m}^3/\text{h}$**

El análisis de sensibilidad se realiza para flujos de 2500, 2250, 2140, 2000 y 1875 m<sup>3</sup>/h; lo que corresponde en barriles diarios a: 377389, 339650, 323045, 301911 y 283041. En la figura 19 se puede apreciar que se consigue una presión final cercana a 70psig con un flujo de 2140 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 19: Análisis de sensibilidad con variación de flujo (Metor)**

Se toma el flujo de 2140 m<sup>3</sup>/h como el óptimo para el despacho de Metanol desde la planta Metor. A continuación se muestra el perfil presión-distancia en este caso (figura 20).



**Figura 20: Gráfica Presión vs Distancia (Metor)  $q=2140 \text{ m}^3/\text{h}$ .**

### 3.2.2.2 Supermetanol

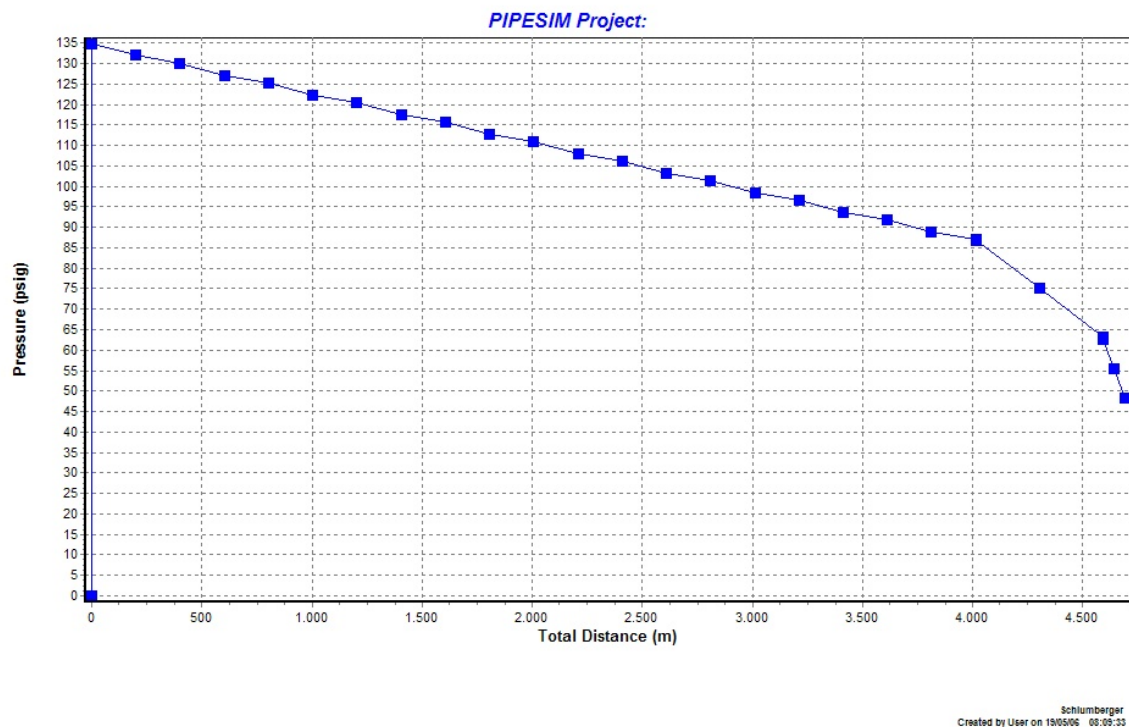
Luego de ingresar las propiedades del modelo en el simulador, se procede a correr dicho modelo, ingresando presión de entrada y flujo a desplazar en el caso de Supermetanol los datos son: Presión de entrada: 0 psig, Flujo: 301911 bbl/d.

Se reseñan en la tabla 22 los principales resultados necesarios para el estudio, de la configuración de Supermetanol.

**Tabla 22: Resultados de la corrida en PIPESIM® de la configuración de Supermetanol.**

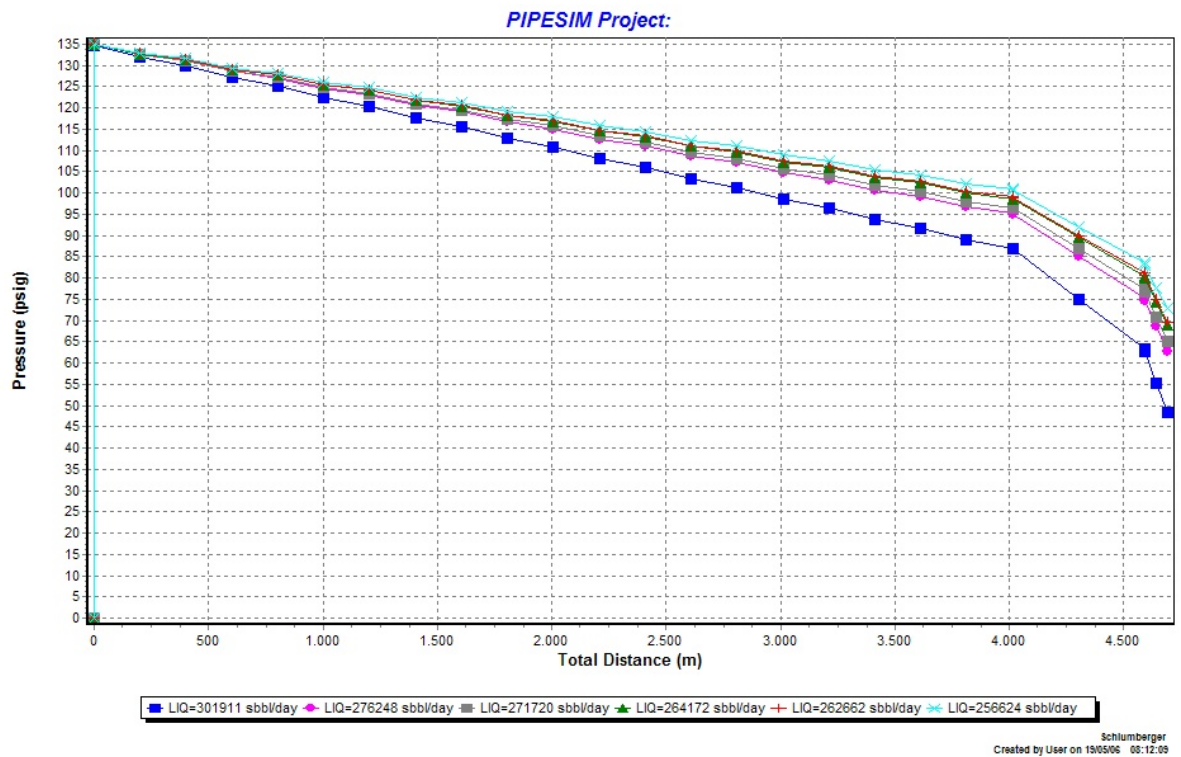
|  | $L$     | $P$    | $T$    | $v$    | $q$     | $\rho$                | Fase    | $\mu$ | $N_{Re}$         |
|--|---------|--------|--------|--------|---------|-----------------------|---------|-------|------------------|
|  | (ft)    | (psia) | (F)    | (ft/s) | (bbl/d) | (lb/ft <sup>3</sup> ) |         | (cP)  | $\times 10^{-6}$ |
| Linea de Flujo Sumeca20                  |         |        |        |        |         |                       |         |       |                  |
| 1  | 0,0     | 149,47 | 113,20 | 9,708  | 301947  | 47,952                | LÍQUIDO | 0,411 | 2,705            |
| 2  | 658,5   | 146,64 | 112,61 | 9,705  | 301826  | 47,972                | LÍQUIDO | 0,413 | 2,692            |
| 3  | 1316,9  | 144,69 | 112,03 | 9,701  | 301708  | 47,991                | LÍQUIDO | 0,415 | 2,679            |
| 4  | 1975,4  | 141,86 | 111,48 | 9,697  | 301594  | 48,009                | LÍQUIDO | 0,417 | 2,667            |
| 5  | 2633,9  | 139,91 | 110,94 | 9,693  | 301483  | 48,026                | LÍQUIDO | 0,418 | 2,656            |
| 6  | 3292,3  | 137,08 | 110,41 | 9,690  | 301377  | 48,043                | LÍQUIDO | 0,420 | 2,645            |
| 7  | 3950,8  | 135,13 | 109,91 | 9,687  | 301272  | 48,060                | LÍQUIDO | 0,422 | 2,634            |
| 8  | 4609,3  | 132,30 | 109,41 | 9,683  | 301173  | 48,076                | LÍQUIDO | 0,424 | 2,624            |
| 9  | 5267,7  | 130,35 | 108,94 | 9,680  | 301075  | 48,091                | LÍQUIDO | 0,425 | 2,614            |
| 10                                       | 5926,2  | 127,53 | 108,47 | 9,677  | 300981  | 48,106                | LÍQUIDO | 0,427 | 2,605            |
| 11                                       | 6584,6  | 125,58 | 108,03 | 9,674  | 300890  | 48,121                | LÍQUIDO | 0,428 | 2,596            |
| 12                                       | 7243,1  | 122,75 | 107,59 | 9,672  | 300802  | 48,135                | LÍQUIDO | 0,430 | 2,587            |
| 13                                       | 7901,6  | 120,80 | 107,17 | 9,669  | 300716  | 48,149                | LÍQUIDO | 0,431 | 2,578            |
| 14                                       | 8560,0  | 117,98 | 106,75 | 9,666  | 300634  | 48,162                | LÍQUIDO | 0,432 | 2,570            |
| 15                                       | 9218,5  | 116,03 | 106,36 | 9,664  | 300554  | 48,175                | LÍQUIDO | 0,434 | 2,563            |
| 16                                       | 9877,0  | 113,21 | 105,97 | 9,661  | 300477  | 48,187                | LÍQUIDO | 0,435 | 2,555            |
| 17                                       | 10535,0 | 111,26 | 105,60 | 9,659  | 300402  | 48,199                | LÍQUIDO | 0,436 | 2,548            |
| 18                                       | 11194,0 | 108,44 | 105,23 | 9,656  | 300330  | 48,211                | LÍQUIDO | 0,437 | 2,541            |
| 19                                       | 11852,0 | 106,49 | 104,88 | 9,654  | 300259  | 48,222                | LÍQUIDO | 0,439 | 2,534            |
| 20                                       | 12511,0 | 103,67 | 104,54 | 9,652  | 300192  | 48,233                | LÍQUIDO | 0,440 | 2,528            |
| 21                                       | 13169,0 | 101,72 | 104,21 | 9,650  | 300126  | 48,243                | LÍQUIDO | 0,441 | 2,521            |
| Linea de Flujo Sumeca16<br>(nuevo datum) |         |        |        |        |         |                       |         |       |                  |
| 22                                       | 0,00    | 101,48 | 104,21 | 1,538  | 300126  | 48,243                | LÍQUIDO | 0,441 | 3,183            |
| 23                                       | 943,24  | 89,74  | 103,87 | 1,537  | 300079  | 48,251                | LÍQUIDO | 0,442 | 3,176            |
| 24                                       | 1886,50 | 78,00  | 103,54 | 1,537  | 300034  | 48,258                | LÍQUIDO | 0,443 | 3,170            |
| Linea de Flujo Sumeca12<br>(nuevo datum) |         |        |        |        |         |                       |         |       |                  |
| 25                                       | 0,00    | 77,36  | 103,54 | 2,483  | 300036  | 48,258                | LÍQUIDO | 0,443 | 4,028            |
| 26                                       | 167,98  | 70,03  | 103,52 | 2,483  | 300046  | 48,256                | LÍQUIDO | 0,442 | 4,029            |
| 27                                       | 335,96  | 63,03  | 103,49 | 2,483  | 300055  | 48,255                | LÍQUIDO | 0,442 | 4,029            |

Se puede apreciar en los resultados de la corrida, que el sistema tiene una presión final de 48,34 psig (63,03 psia). En la figura 21, gráfica Presión vs Distancia, la presión en la salida de la tubería de 12" no alcanza 70 psig, por lo que se somete el modelo a un análisis de sensibilidad variando el flujo de despacho para asegurar la presión mínima requerida de descarga al brazo de carga (Figura 22).



**Figura 21: Gráfica Presión vs Distancia (Supermetanol)  $q=2000\text{m}^3/\text{h}$**

El análisis de sensibilidad se realizó para flujos de 2000, 1830, 1800, 1750, 1740 y 1700  $\text{m}^3/\text{h}$ ; lo que corresponde en barriles diarios a: 301911, 276248, 271720, 264172, 262662 y 256624. En la figura 22, se puede apreciar que se consigue un valor de presión final más aproximado a 70 psig con un flujo de 1740  $\text{m}^3/\text{h}$ .



**Figura 22: Análisis de sensibilidad con variación de flujo (Supermetanol)**

### 3.2.2.3 MTBE de Super Octanos

Luego de ingresar las propiedades de la configuración, se procede a correr el modelo, ingresando presión de entrada y flujo a desplazar:

Presión de entrada: 0 psig.

Flujo: 301911 bbl/d.

A continuación se resumen en una tabla los principales resultados generados en la corrida del simulador:

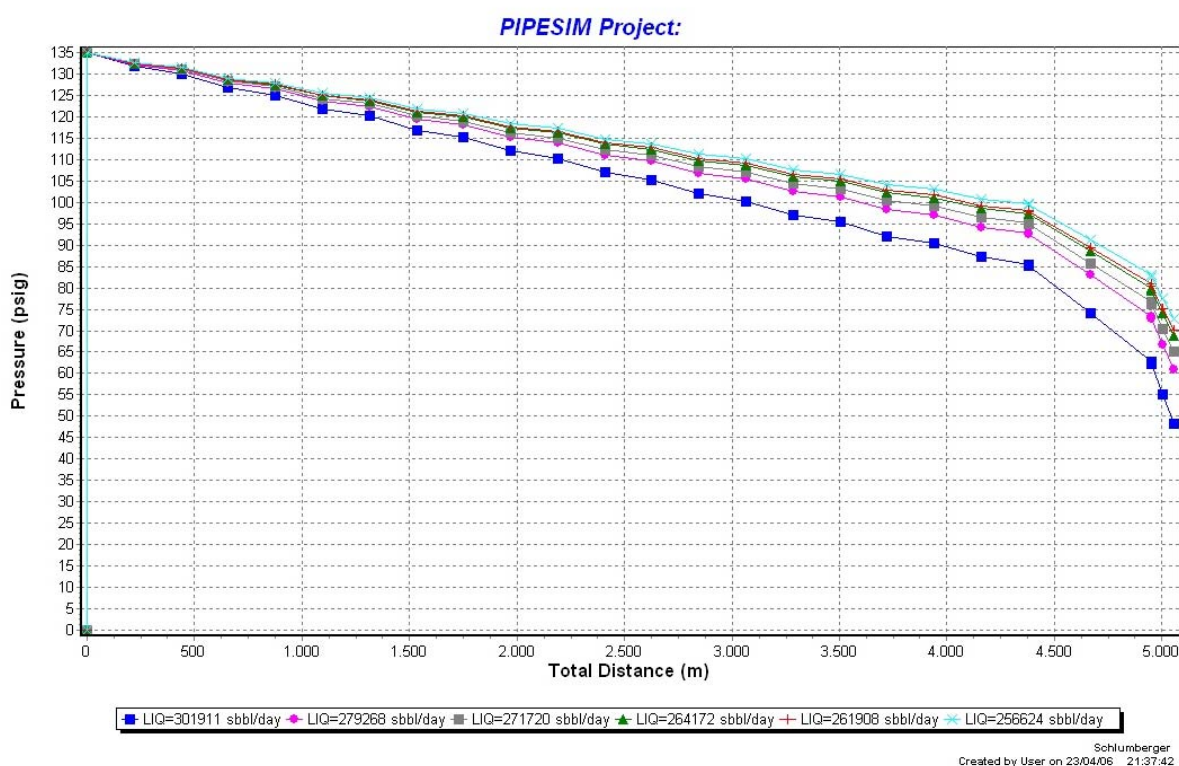
Tabla 23: Resultados de la corrida en PIPESIM<sup>®</sup> de la configuración de MTBE.

|  | $L$     | $P$    | $T$    | $v$    | $q$     | $\rho$                | Fase    | $\mu$ | $N_{Re}$         |
|--|---------|--------|--------|--------|---------|-----------------------|---------|-------|------------------|
|  | (ft)    | (psia) | (F)    | (ft/s) | (bbl/d) | (lb/ft <sup>3</sup> ) |         | (cP)  | $\times 10^{-6}$ |
| Linea de Flujo MTBE20                  |         |        |        |        |         |                       |         |       |                  |
| 1                                      | 0,0     | 149,70 | 113,31 | 9,708  | 301937  | 46,353                | LÍQUIDO | 0,250 | 4,291            |
| 2                                      | 718,3   | 146,52 | 112,33 | 9,705  | 301838  | 46,368                | LÍQUIDO | 0,251 | 4,274            |
| 3                                      | 1436,7  | 144,73 | 111,39 | 9,702  | 301743  | 46,383                | LÍQUIDO | 0,252 | 4,257            |
| 4                                      | 2155,0  | 141,55 | 110,50 | 9,699  | 301654  | 46,397                | LÍQUIDO | 0,253 | 4,243            |
| 5                                      | 2873,4  | 139,77 | 109,66 | 9,696  | 301568  | 46,410                | LÍQUIDO | 0,254 | 4,227            |
| 6                                      | 3591,7  | 136,59 | 108,86 | 9,694  | 301489  | 46,422                | LÍQUIDO | 0,255 | 4,214            |
| 7                                      | 4310,0  | 134,80 | 108,10 | 9,691  | 301412  | 46,434                | LÍQUIDO | 0,256 | 4,201            |
| 8                                      | 5028,4  | 131,63 | 107,37 | 9,689  | 301340  | 46,445                | LÍQUIDO | 0,256 | 4,189            |
| 9                                      | 5746,7  | 129,84 | 106,68 | 9,687  | 301271  | 46,456                | LÍQUIDO | 0,257 | 4,176            |
| 10                                     | 6465,1  | 126,67 | 106,03 | 9,685  | 301206  | 46,466                | LÍQUIDO | 0,258 | 4,166            |
| 11                                     | 7183,4  | 124,88 | 105,41 | 9,683  | 301144  | 46,475                | LÍQUIDO | 0,259 | 4,155            |
| 12                                     | 7901,7  | 121,71 | 104,82 | 9,681  | 301087  | 46,484                | LÍQUIDO | 0,259 | 4,145            |
| 13                                     | 8620,1  | 119,93 | 104,26 | 9,679  | 301031  | 46,493                | LÍQUIDO | 0,260 | 4,135            |
| 14                                     | 9338,4  | 116,75 | 103,72 | 9,677  | 300979  | 46,501                | LÍQUIDO | 0,260 | 4,127            |
| 15                                     | 10057,0 | 114,97 | 103,22 | 9,676  | 300929  | 46,508                | LÍQUIDO | 0,261 | 4,118            |
| 16                                     | 10775,0 | 111,80 | 102,74 | 9,674  | 300883  | 46,516                | LÍQUIDO | 0,261 | 4,111            |
| 17                                     | 11493,0 | 110,01 | 102,28 | 9,673  | 300838  | 46,523                | LÍQUIDO | 0,262 | 4,103            |
| 18                                     | 12212,0 | 106,84 | 101,84 | 9,671  | 300797  | 46,529                | LÍQUIDO | 0,262 | 4,096            |
| 19                                     | 12930,0 | 105,06 | 101,43 | 9,670  | 300757  | 46,535                | LÍQUIDO | 0,263 | 4,089            |
| 20                                     | 13648,0 | 101,89 | 101,04 | 9,669  | 300721  | 46,541                | LÍQUIDO | 0,263 | 4,083            |
| 21                                     | 14367,0 | 100,11 | 100,67 | 9,668  | 300685  | 46,546                | LÍQUIDO | 0,263 | 4,077            |
| Linea de Flujo MTBE16<br>(nuevo datum) |         |        |        |        |         |                       |         |       |                  |
| 22                                     | 0,0     | 99,87  | 100,67 | 1,541  | 300685  | 46,546                | LÍQUIDO | 0,263 | 5,146            |
| 23                                     | 943,2   | 88,66  | 100,36 | 1,540  | 300672  | 46,548                | LÍQUIDO | 0,263 | 5,149            |
| 24                                     | 1886,5  | 77,44  | 100,06 | 1,540  | 300665  | 46,549                | LÍQUIDO | 0,263 | 5,151            |
| Linea de Flujo MTBE12<br>(nuevo datum) |         |        |        |        |         |                       |         |       |                  |
| 25                                     | 0,00    | 76,82  | 100,06 | 2,488  | 300667  | 46,549                | LÍQUIDO | 0,263 | 6,547            |
| 26                                     | 167,98  | 69,84  | 100,06 | 2,488  | 300686  | 46,546                | LÍQUIDO | 0,263 | 6,555            |
| 27                                     | 335,96  | 63,07  | 100,06 | 2,488  | 300708  | 46,543                | LÍQUIDO | 0,263 | 6,562            |

Tanto para MTBE como para el Iso-Octano, estos fluidos se incluyeron al simulador como *black oil*, para lograr un comportamiento de viscosidad cercano al

teórico, se ingresaron valores de temperatura y viscosidad dentro del rango de operación del proyecto.

Se puede apreciar en los resultados de la corrida, que el sistema tiene una presión final de 48,37 psig (63,07 psia). Debido a que no se alcanza, con el flujo de diseño, 70 psig a la salida de la tubería de 12", se somete el modelo a un análisis de sensibilidad, variando el flujo de despacho para asegurar la presión mínima requerida de descarga al brazo de carga (Figura 23).



**Figura 23: Análisis de sensibilidad con variación de flujo (MTBE)**

El análisis de sensibilidad se realizó para flujos de 2000, 1850, 1800, 1750, 1735 y 1700 m<sup>3</sup>/h; lo que corresponde en barriles diarios a: 301911, 279268, 271720, 261908, 262662 y 256624. En la figura 23, se puede apreciar que se consigue una presión final más cercana a 70 psig con un flujo de 1735 m<sup>3</sup>/h.

## 3.2.2.4 Iso-Octano de Super Octanos

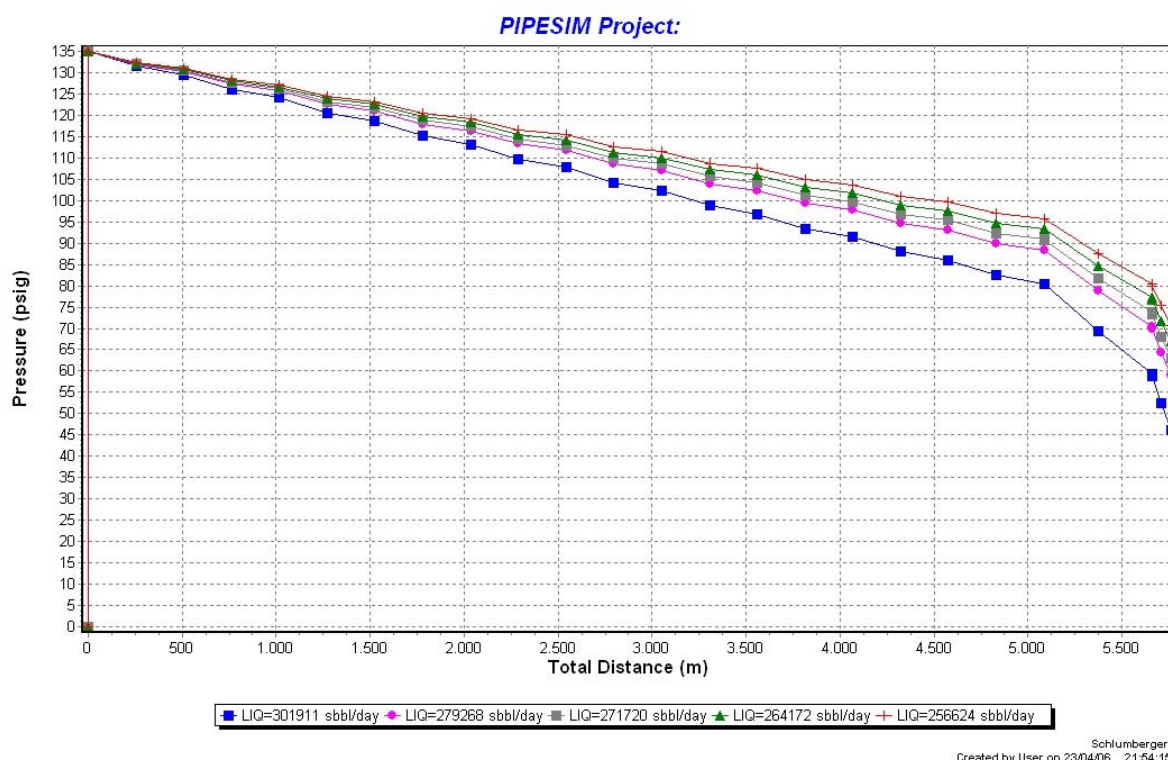
Se realiza la corrida del modelo con los mismos datos de entrada utilizados en la configuración de MTBE. Se resumieron en la tabla 24 los principales resultados.

**Tabla 24: Resultados de la corrida en PIPESIM® de la configuración de IsoOctano.**

|   | $L$     | $P$    | $T$    | $v$    | $q$     | $\rho$                | Patrón de flujo | $\mu$ | $N_{Re}$         |
|---|---------|--------|--------|--------|---------|-----------------------|-----------------|-------|------------------|
|   | (ft)    | (psia) | (F)    | (ft/s) | (bbl/d) | (lb/ft <sup>3</sup> ) | (PI-SS)         | (cP)  | $\times 10^{-6}$ |
| Linea de Flujo IsoOctano20                  |         |        |        |        |         |                       |                 |       |                  |
| 1   | 0,0     | 149,70 | 113,34 | 9,708  | 301940  | 42,283                | LÍQUIDO         | 0,454 | 2,159            |
| 2   | 834,0   | 146,23 | 112,09 | 9,704  | 301816  | 42,300                | LÍQUIDO         | 0,456 | 2,151            |
| 3   | 1668,0  | 144,24 | 110,92 | 9,700  | 301697  | 42,317                | LÍQUIDO         | 0,457 | 2,142            |
| 4   | 2502,0  | 140,78 | 109,82 | 9,697  | 301588  | 42,332                | LÍQUIDO         | 0,459 | 2,135            |
| 5   | 3336,0  | 138,79 | 108,80 | 9,694  | 301485  | 42,347                | LÍQUIDO         | 0,461 | 2,128            |
| 6   | 4170,0  | 135,32 | 107,83 | 9,691  | 301391  | 42,360                | LÍQUIDO         | 0,462 | 2,121            |
| 7   | 5003,9  | 133,34 | 106,93 | 9,688  | 301301  | 42,373                | LÍQUIDO         | 0,463 | 2,115            |
| 8   | 5837,9  | 129,87 | 106,09 | 9,685  | 301219  | 42,384                | LÍQUIDO         | 0,464 | 2,110            |
| 9   | 6671,9  | 127,89 | 105,30 | 9,682  | 301141  | 42,395                | LÍQUIDO         | 0,466 | 2,104            |
| 10  | 7505,9  | 124,42 | 104,55 | 9,680  | 301070  | 42,405                | LÍQUIDO         | 0,467 | 2,099            |
| 11  | 8339,9  | 122,44 | 103,86 | 9,678  | 301002  | 42,415                | LÍQUIDO         | 0,468 | 2,094            |
| 12  | 9173,9  | 118,98 | 103,20 | 9,676  | 300940  | 42,423                | LÍQUIDO         | 0,469 | 2,090            |
| 13  | 10008,0 | 116,99 | 102,59 | 9,674  | 300881  | 42,432                | LÍQUIDO         | 0,470 | 2,086            |
| 14  | 10842,0 | 113,53 | 102,02 | 9,672  | 300829  | 42,439                | LÍQUIDO         | 0,470 | 2,083            |
| 15  | 11676,0 | 111,54 | 101,49 | 9,671  | 300777  | 42,446                | LÍQUIDO         | 0,471 | 2,079            |
| 16  | 12510,0 | 108,08 | 100,98 | 9,669  | 300732  | 42,453                | LÍQUIDO         | 0,472 | 2,076            |
| 17  | 13344,0 | 106,10 | 100,51 | 9,668  | 300688  | 42,459                | LÍQUIDO         | 0,473 | 2,073            |
| 18  | 14178,0 | 102,64 | 100,07 | 9,667  | 300650  | 42,464                | LÍQUIDO         | 0,473 | 2,070            |
| 19  | 15012,0 | 100,65 | 99,66  | 9,665  | 300612  | 42,470                | LÍQUIDO         | 0,474 | 2,068            |
| 20  | 15846,0 | 97,19  | 99,27  | 9,664  | 300580  | 42,474                | LÍQUIDO         | 0,474 | 2,066            |
| 21  | 16680,0 | 95,21  | 98,90  | 9,663  | 300548  | 42,479                | LÍQUIDO         | 0,475 | 2,063            |
| Linea de Flujo IsoOctano16<br>(nuevo datum) |         |        |        |        |         |                       |                 |       |                  |
| 22  | 0,0     | 94,99  | 98,90  | 1,540  | 300548  | 42,479                | LÍQUIDO         | 0,475 | 2,605            |
| 23  | 943,2   | 83,99  | 98,65  | 1,540  | 300555  | 42,478                | LÍQUIDO         | 0,474 | 2,607            |
| 24  | 1886,5  | 74,10  | 98,42  | 1,540  | 300568  | 42,476                | LÍQUIDO         | 0,474 | 2,609            |
| Linea de Flujo IsoOctano12<br>(nuevo datum) |         |        |        |        |         |                       |                 |       |                  |
| 25  | 0,00    | 73,53  | 98,42  | 2,487  | 300571  | 42,476                | LÍQUIDO         | 0,474 | 3,316            |
| 26  | 167,98  | 67,08  | 98,42  | 2,487  | 300602  | 42,471                | LÍQUIDO         | 0,474 | 3,319            |
| 27  | 335,96  | 60,82  | 98,42  | 2,488  | 300639  | 42,466                | LÍQUIDO         | 0,473 | 3,323            |

Se puede apreciar en los resultados de la corrida, que el sistema tiene una presión final de 46,12 psig (60,82 psia). Debido a que no se alcanza los 70 psig a la salida de la tubería de 12", se somete el modelo a un análisis de sensibilidad, variando el flujo de despacho para asegurar la presión mínima requerida de descarga al brazo de carga (Figura 24).

El análisis de sensibilidad se realiza para flujos de 2000, 1850, 1800, 1750 y 1700 m<sup>3</sup>/h; lo que corresponde en barriles diarios a: 301911, 279268, 271720, 264172 y 256624. En la figura 24, se nota que el valor de flujo con una presión final cercana a 70 psig es de 1700 m<sup>3</sup>/h.



**Figura 24: Análisis de sensibilidad con variación de flujo (IsoOctano)**

### 3.3 COMPARACIÓN ENTRE MODELOS

Para realizar la comparación entre modelos se agruparon en tablas los resultados correspondientes a las caídas de presión de cada uno de los modelos separados por tramos y luego se calculó el porcentaje de desviación entre los valores.

**Tabla 25: Cuadro comparativo entre valores de caída de presión de Metor.**

| <b>METANOL<br/>Metor</b>            | <b>Ec de Fanning</b> | <b>Pipesim</b> | <b>Porcentaje de<br/>desviación (%)</b> |
|-------------------------------------|----------------------|----------------|---|
| $\Delta p$ tubería principal (psia) | 28,64                | 26,97          | 6,21                                    |
| Pfinal tubería principal (psia)     | 119,86               | 121,31         | 1,20                                    |
| $\Delta p$ tubería 16" (psia)       | 32,34                | 37,02          | 12,64                                   |
| Pfinal tubería 16" (psia)           | 87,52                | 84,29          | 3,83                                    |
| $\Delta p$ tubería 12" (psia)       | 21,93                | 23,29          | 5,84                                    |
| Pfinal tubería 12" (psia)           | 65,59                | 61,00          | 7,52                                    |

**Tabla 26: Cuadro comparativo entre valores de caída de presión de Supermetanol.**

| <b>METANOL<br/>Supermetanol</b>     | <b>Ec de Fanning</b> | <b>Pipesim</b> | <b>Porcentaje de<br/>desviación (%)</b> |
|-------------------------------------|----------------------|----------------|---|
| $\Delta p$ tubería principal (psia) | 48,75                | 47,75          | 2,10                                    |
| Pfinal tubería principal (psia)     | 100,95               | 101,72         | 0,76                                    |
| $\Delta p$ tubería 16" (psia)       | 20,97                | 23,72          | 11,58                                   |
| Pfinal tubería 16" (psia)           | 79,97                | 78,00          | 2,53                                    |
| $\Delta p$ tubería 12" (psia)       | 14,19                | 14,97          | 5,20                                    |
| Pfinal tubería 12" (psia)           | 65,78                | 63,03          | 4,37                                    |

**Tabla 27: Cuadro comparativo entre valores de caída de presión de MTBE.**

| <b>MTBE<br/>Super Octanos</b>       | <b>Ec de Fanning</b> | <b>Pipesim</b> | <b>Porcentaje de<br/>desviación (%)</b> |
|-------------------------------------|----------------------|----------------|---|
| $\Delta p$ tubería principal (psia) | 49,00                | 49,59          | 1,18                                    |
| Pfinal tubería principal (psia)     | 100,70               | 100,11         | 0,59                                    |
| $\Delta p$ tubería 16" (psia)       | 19,42                | 22,67          | 14,35                                   |
| Pfinal tubería 16" (psia)           | 81,28                | 77,44          | 4,96                                    |
| $\Delta p$ tubería 12" (psia)       | 13,19                | 14,37          | 8,23                                    |
| Pfinal tubería 12" (psia)           | 68,09                | 63,07          | 7,96                                    |

**Tabla 28: Cuadro comparativo entre valores de caída de presión de IsoOctano.**

| <b>IsoOctano<br/>Super Octanos</b>  | <b>Ec de Fanning</b> | <b>Pipesim</b> | <b>Porcentaje de<br/>desviación (%)</b> |
|-------------------------------------|----------------------|----------------|---|
| $\Delta p$ tubería principal (psia) | 53,65                | 54,49          | 1,55                                    |
| Pfinal tubería principal (psia)     | 96,05                | 95,21          | 0,89                                    |
| $\Delta p$ tubería 16" (psia)       | 18,18                | 21,11          | 13,89                                   |
| Pfinal tubería 16" (psia)           | 77,88                | 74,1           | 5,10                                    |
| $\Delta p$ tubería 12" (psia)       | 12,29                | 13,28          | 7,43                                    |
| Pfinal tubería 12" (psia)           | 65,58                | 60,82          | 7,83                                    |

Debido a que la operación de las configuraciones empleando los flujos de diseño no permiten que se mantenga la condición limitante, que la presión en la entrada al brazo de carga sea de 70 psig, se hace un cuadro comparativo entre estos valores, como se muestra en la tabla 29.

**Tabla 29: Cuadro comparativo entre modelos.**

|   | METANOL<br>Metor | METANOL<br>SuperMetanol | MTBE<br>Super Octanos | ISO-OCTANO<br>Super Octanos |
|---|------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Flujo de diseño (m <sup>3</sup> /h)                   | 2500             | 2000                    | 2000                  | 2000                        |
| Flujo óptimo (m <sup>3</sup> /h)                      | 2140             | 1740                    | 1735                  | 1700                        |
| Porcentaje comparativo entre los valores de flujo (%) | 16,82            | 14,94                   | 15,27                 | 17,65                       |

#### **5.4 CAPACIDAD DE DESPACHO DURANTE LA VENTANA OPERACIONAL DE CADA UNA DE LAS PLANTAS.**

En el Muelle Criogénico, sólo se dispone de un brazo para el despacho de los productos de las 3 empresas mixtas, con la implementación del proyecto tratado en este trabajo, se espera una mayor holgura para la carga de los productos a través del Muelle Petroquímico, así como también se podrá despachar mayor cantidad de productos al mismo tiempo, ya que cada producto tendrá un brazo individual. De esta forma, habrá la posibilidad de utilizar hasta 4 brazos al mismo tiempo para cargar en dos buques diferentes, ya que sólo se dispone de la plataforma este y la oeste para el despacho de productos, pero se pueden cargar 2 tipos de productos en el mismo buque.

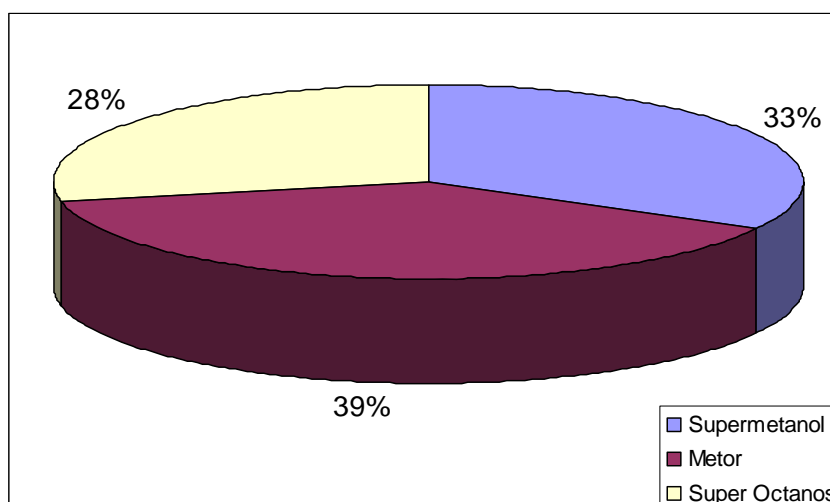
Se debe tener en cuenta que la empresa FertiNitro también despacha sus productos (amoníaco) a través del Brazo de Carga M-501, ubicado en la plataforma de líquidos al igual que los brazos M-502, M-503, M-504 y M-505, como se pudo observar en la Figura 16 (Modelo Esquemático de la disposición de los Brazos De Carga en el Muelle Petroquímico Jose).

Se pueden cuantificar las posibilidades de carga de la mayor cantidad de productos simultáneamente en 12 casos diferentes, como se muestra en la tabla 30.

**Tabla 30: Posibilidades de carga simultánea a través del Muelle Petroquímico.**

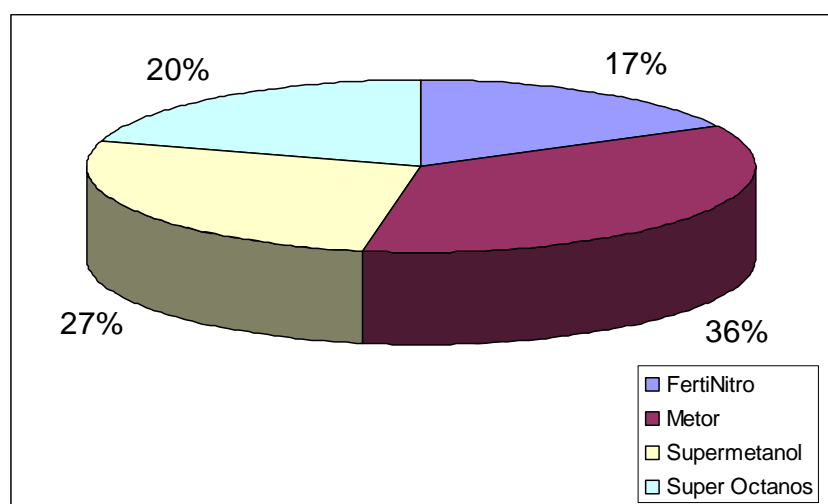
| <b>Caso</b> | <b>Lado Oeste</b>           | <b>Lado Este</b>           |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|
| <b>1</b>    | Metor M-505<br>Metor M-503  | Metor M-504<br>Soca M-502  |
| <b>2</b>    | Metor M-505<br>Metor M-503  | Sumeca M-504<br>Soca M-502 |
| <b>3</b>    | Metor M-505<br>Metor M-503  | Metor M-504                |
| <b>4</b>    | Metor M-505<br>Metor M-503  | Sumeca M-504               |
| <b>5</b>    | Metor M-505<br>Metor M-503  | Soca M-502                 |
| <b>6</b>    | Sumeca M-505                |                            |
| <b>7</b>    | Sumeca M-505<br>Metor M-503 |                            |
| <b>8</b>    | FertiNitro M-501            | Sumeca M-504<br>Soca M-502 |
| <b>9</b>    |                             | Metor M-504<br>Soca M-502  |
| <b>10</b>   |                             | Soca M-502                 |
| <b>11</b>   |                             | Sumeca M-504               |
| <b>12</b>   |                             | Metor M-504                |

Con los datos recopilados en la tabla 11, se obtiene la siguiente distribución porcentual según el despacho de cada una de las plantas involucradas en el proyecto:



**Figura 25: Distribución porcentual actual de la ocupación mensual del Muelle Criogénico.**

Debido a que se tiene conocimiento de los volúmenes despachados en buques por FertiNitro actualmente en el Muelle Petroquímico y el despachado por Metor, Supermetanol y Super Octanos por el Muelle Criogénico, se hace una proyección del porcentaje de producción mensual de despachos para el año 2008 del Muelle Petroquímico, cuando el proyecto se encuentre en operación. De esta forma la ocupación se puede decir que tendrá la distribución mostrada en la Figura 26.



**Figura 26: Distribución porcentual de uso del Muelle Petroquímico a futuro.**

La ventana operacional con la cual contarán las plantas para el despacho de sus productos será al igual que en la actualidad de 72 horas, contando con hasta 32 horas para el despacho. De acuerdo a las velocidades máximas de despacho calculadas anteriormente, se recrea un tiempo estimado de despacho al buque de cada uno de los productos en la tabla 31.

Se escogen capacidades de buques aproximadas, debido a que de acuerdo a la Tabla 12, cada buque presenta capacidades diferentes, además que podrían cargar menor cantidad de productos de lo que su capacidad total permite, dependiendo de las técnicas de negociación que sean empleadas en la venta de los productos.

**Tabla 31: Tiempos mínimos para carga de buques.**

|                               | METANOL<br>Metor | METANOL<br>Supermetanol | MTBE<br>Super Octanos | ISO-OCTANO<br>Super Octanos |
|-------------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Flujo (m <sup>3</sup> /h)     | 2140             | 1740                    | 1735                  | 1700                        |
| Flujo másico (TM/h)           | 1610,5           | 1318,1                  | 1230,1                | 1114,4                      |
| Buque de 10 MTM<br>Tiempo (h) | 6,21             | 7,59                    | 8,13                  | 8,97                        |
| Buque de 15 MTM<br>Tiempo (h) | 9,31             | 11,38                   | 12,19                 | 13,46                       |
| Buque de 20 MTM<br>Tiempo (h) | 12,42            | 15,17                   | 16,26                 | 17,95                       |
| Buque de 25 MTM<br>Tiempo (h) | 15,52            | 18,97                   | 20,32                 | 22,43                       |

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

La selección de tuberías principales se realizó de acuerdo al *piping class* utilizado en el Muelle Petroquímico, pero debido a las altas exigencias de seguridad de dicho muelle, las cuales no son necesarias en las áreas externas al Muelle, se hizo la salvedad de permitir el uso de tubería con costura fuera del límite de batería del Muelle. De esta forma la tubería seleccionada para ser usada en el proyecto es: ASTM A-53, grado B, cédula estándar y con *rating* 150 lbf de resistencia, hasta que se obtengan los resultados del estudio de golpe de ariete, del cual podría resultar que el *rating* necesario para las tuberías sea de 300 lbf. Desde el punto de salida de las plantas hasta el límite de batería del Muelle, se utilizará tubería tipo E (soldada con resistencia eléctrica), y una vez dentro de los linderos del Muelle, las tuberías deberán ser sin costura (Tipo S), al igual que las válvulas y los accesorios. Las tablas 7, 8 y 9 muestran las características de cada una de las líneas.

La selección de tubería con cédula estándar se realizó conforme a que el cálculo de los espesores mínimos requeridos en cada una de las líneas, reporta valores de hasta 50% por debajo de la cédula mínima comercial (*Schedule 10*). Luego de aplicar un factor de seguridad riguroso se toma como alternativa tolerante la cédula estándar en cada una de las líneas (ver tablas 13 y 14).

El valor mínimo de presión requerido en el punto final de la tubería de 12" es de 70 psig. Dicho valor es necesario para que el fluido recorra el brazo de carga y descargue al buque con una presión de 20 psig.

El valor de caída de presión a lo largo de las tuberías está supeditado a la presión de descarga de las bombas de cada planta que, para todos los casos, se tomó la reseñada en la hoja de especificaciones de cada bomba como presión de operación.

El cálculo de caída de presión en las líneas es un valor aproximado debido a la carencia de información definitiva acerca de las válvulas y accesorios que serán implementados en las líneas. Para la fecha de culminación de este Trabajo Especial

de Grado, las empresas mixtas aún no tenían bien especificado los elementos de control que se aplicarán a las líneas, incluyendo así el tipo de válvulas que serán empleados. Los valores de caída de presión que se reportan en el punto final de la tubería de 12" son mayores a los que se debería esperar para el momento de ejecución del proyecto.

El cálculo de la caída de presión, primeramente se realizó mediante el uso de la ecuación de Fanning, utilizando el número de Reynolds para el cálculo del factor de fricción. Estos valores de caída de presión se calcularon para cada uno de los tramos de tubería, reportándose en las tablas 18, 19 y 20.

El segundo método de cálculo de la caída de presión, se realizó mediante la corrida en PIPESIM<sup>®</sup> de cada uno de los casos por separado, de acuerdo al fluido que transportaría cada línea y la planta que manejaría dicho fluido. Debido a que PIPESIM<sup>®</sup> es un simulador de producción de petróleo, se estudió la manera de incluir Metanol, MTBE e Iso-Octano al programa.

Para el modelaje del comportamiento de viscosidad del metanol, se empleó Pedersen, siendo éste el que mejor se adaptaba al teórico. Los modelos de viscosidad utilizados para MTBE e Iso-Octano, a diferencia del Metanol, se generaron a partir de 2 pares de valores de viscosidad y temperatura ingresados por el usuario, con lo cual el modelo de viscosidad se asemeja al teórico en el rango de temperatura utilizado, el cual es cercano al de operación del proyecto.

Para todas las configuraciones el valor de presión en el punto final de las tuberías de 12", manejando el flujo de diseño, se encuentra por debajo de 70psig con un margen de hasta 25 psi (como se reporta en las tablas 25, 26, 27 y 28), tanto en los cálculos con la ecuación de Fanning como los generados por el simulador.

Se compararon los valores de presión reportados en cada una de las corridas, y se pudo apreciar la similitud de éstos con los calculados con la ecuación de Fanning, se puede apreciar que la divergencia entre valores de presión reportados en las tablas 26, 27, 28 y 29 no es significativa, los valores más distantes reportan un

desviación de hasta 14%. Los valores generados por el simulador se consideraron con mayor exactitud, debido a que el simulador hace cálculos de los valores de viscosidad y presión a cada uno de los intervalos, en los cuales se separa la longitud total de la tubería, lo cual no se hace en la ecuación de Fanning.

Los valores finales de presión correspondientes a Metanol, MTBE e Iso-Octano, presentan porcentajes de divergencia menores al 8%, lo que se puede atribuir al hecho que los fluidos son ingresados a un simulador de hidrocarburos, lo cual trae consecuencias, ya que la viscosidad del fluido, a pesar de presentar valores cercanos a los teóricos, fueron calculados con correlaciones para petróleo.

Debido a que los valores generados por el simulador al final de la tubería de 12" son inferiores a 70 psig (operando con el flujo de diseño), se realizaron análisis de sensibilidad a cada una de las líneas variando los valores del flujo de salida de la bomba. Es debido a este factor limitante que los flujos de diseño no son alcanzados en las configuraciones, como se muestra en la tabla 29. Los flujos que operarán las líneas para mantener la condición limitante se encuentran entre 15 y 18% por debajo del flujo de diseño.

Los valores de flujo conseguidos al aplicar el análisis de sensibilidad a las líneas se encuentran por encima del que se espera al momento de ejecutar el proyecto, debido a que no se incluye la pérdida de presión debido a las válvulas que serán conectadas a las líneas. Los valores de flujo obtenidos en este análisis no deberán ser tomados como valores reales, sino como valores máximos de operación de las configuraciones.

Referente a la ocupación del muelle se puede notar que aún para el caso más desfavorable, el despacho de Iso-Octano a un buque de gran tamaño (menor velocidad de flujo), el tiempo de carga es menor a 24 horas, como se puede observar en la tabla 31. Según experiencias actuales, se conoce que los tiempos de despacho se encuentran entre 15 y 32 horas, dependiendo de la capacidad de los buques y de la velocidad de bombeo. La tasa máxima de bombeo hacia el Muelle Criogénico en la

actualidad es de 1000 m<sup>3</sup>/h; con la implementación de este proyecto se optimizarán los tiempos de despacho.

En cuanto a las necesidades de ocupación de cada usuario (Metor, Supermetanol, Super Octanos y FertiNitro) en el Muelle Petroquímico, se observa que es Metor quien tendrá la mayor necesidad de ocupación. Supermetanol y Super Octanos seguirán en cuanto al nivel de necesidad y será FertiNitro quien menos requiera del uso del Muelle, ya que esta última empresa tiene despachos mensuales de uno a dos buques, y las otras plantas tienen despachos de 4 ó 5 buques mensuales. En la figura 26 se aprecian los porcentajes de distribución de cada una de las plantas, esperados en el momento cuando entre en vigencia el uso del Muelle Petroquímico de Jose para el despacho de Metanol, MTBE e Iso-Octano.

## CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones resultantes del estudio de este Trabajo Especial de Grado:

- La tubería seleccionada para ser usada en el proyecto es: ASTM A-53, grado B, cédula estándar y con *rating* 150 lbf de resistencia. Desde el punto de salida de las plantas hasta el límite de batería del Muelle será tubería Tipo E (soldada con resistencia eléctrica), y dentro de los linderos del Muelle será Tipo S (sin costura).
- El factor limitante de la velocidad de flujo en cada una de las configuraciones, es una presión igual a 70 psig, reportado al final de la tubería de 12”.
- El valor de caída de presión a lo largo de las tuberías está supeditado a la presión de operación de las bombas.
- Los valores de caída de presión resultantes son valores aproximados, de igual forma sucede con los valores de flujo; éstos deberán ser tomados como valores máximos de despacho.
- La simulación de la caída de presión en cada una de las líneas se realizó con PIPESIM<sup>®</sup>, la inclusión de Metanol en la configuración se hizo siguiendo el modelo de fluido *composicional*, mientras que el modelo utilizado para la inclusión de MTBE e Iso-Octano fue *black oil*.
- Los valores de presión reportados en las corridas y los calculados con la ecuación de Fanning presentaron una desviación porcentual menor al 15%, comparativamente entre los dos modelos. Se consideran con mayor exactitud los valores generados por el simulador.

- Los valores finales de presión a la entrada del brazo de carga, son menores a 70psig, en operación con el flujo de diseño.
- La velocidad de flujo con mayor operatividad en cada uno de los casos es menor que los flujos de diseño de cada una de las líneas, en un rango menor al 18% en todos los casos.
- Los brazos de carga a utilizar en las instalaciones del Muelle Petroquímico de Jose, serán de 12” con facilidades para retorno de vapores.
- El tiempo máximo de carga de los buques con capacidades de hasta 25000TM, son 24 horas.
- Con la implementación de este proyecto se optimizarán los tiempos de despacho a los buques de Metanol, MTBE e Iso-Octano con respecto al sistema actual.
- Metor tendrá la mayor necesidad de ocupación del Muelle Petroquímico, Supermetanol y Super Octanos seguirán en cuanto al nivel de necesidad y FertiNitro será quien tenga menor requerimiento de uso del Muelle.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar el estudio de golpe de ariete para evaluar la necesidad de protección mecánica de las líneas, así como de las válvulas y accesorios.
- ✓ Una vez obtenida la disposición de todos los elementos de control que serán instalados en las líneas, agregar la pérdida de presión causada debido a las válvulas y accesorios, para luego recalculer los flujos de despacho en cada una de las configuraciones.
- ✓ Incluir en los procedimientos operacionales del Muelle Petroquímico de Jose, la implementación de programas de inspección y mantenimiento de las líneas involucradas en el proyecto, así como válvulas, accesorios, brazos de carga, sistema de alivio de vapores.
- ✓ Escoger la mejor opción para la disposición de líquidos y vapores generados en el proceso de despacho de buques (instalación de tanques de alivio, disposición de fluidos hacia el *flare* o la instalación de la línea de retorno hacia la planta de Super Octanos).
- ✓ Asegurar la posibilidad de control de las válvulas localizadas en los brazos de carga M503, M-504 y M-505, tanto por Metor como por Supermetanol.
- ✓ Incluir en los procedimientos operacionales toda la logística a seguir para realizar el lavado (*Flushing*) con agua de los tanques de almacenamiento de los buques, así como la inertización de éstos en caso de ser necesario.

- ✓ Estudiar el suministro y conexión de nitrógeno en el estribo del Muelle para el desalojo de las líneas, y en caso de ser necesario la inertización de los tanques de almacenamiento de los buques.
- ✓ Realizar la clausura de las líneas existentes en el Muelle Criogénico de manera adecuada, así como la recolección de los activos pertenecientes a las empresas mixtas y Pequiven en dicho Muelle.
- ✓ Tramitar la permisología ante los entes gubernamentales para la aprobación del proyecto.

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ASME B31.3-2002. Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping Code. ASME Code for Pressure Piping, B31. Capítulo II

[2] Avallone, E. y Baumeister, T. *Marks Manual del Ingeniero Mecánico*. 9na edición. México: Mc Graw Hill, 1995

[3] Pequiven. <http://www.pequiven.com> [consulta: Octubre 2005]

[4] Perry, Robert H. *Manual del Ingeniero Químico*. – 6ta edición, Tomo II: México: Edit. Mc Graw Hill, 1992.

[5] Schlumberger. [http://www.slb.com/media/services/software/production/pipesim\\_pf.pdf](http://www.slb.com/media/services/software/production/pipesim_pf.pdf) [consulta: Noviembre 2005]

[6] Streeter, V. y Wylie, B. *Mecánica de Fluidos*. 6ta edición. México: Mc Graw Hill, 1979.

## BIBLIOGRAFÍA

Avallone, E. y Baumeister, T. *Marks Manual del Ingeniero Mecánico*. 9na edición. México: Mc Graw Hill, 1995.

Barberii, E.E. *El Pozo Ilustrado*. 3ra edición. Caracas: PDVSA, 1985.

Branan, Carl R. *Soluciones prácticas para el Ingeniero Químico*. 2da edición. México: Mc Graw Hill, 2000.

Perry, Robert H. *Manual del Ingeniero Químico*. – 6ta edición, México: Mc Graw Hill, 1992.

Reza García, Clemente. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. Crane Co. México: Mc Graw Hill, 1990.

Streeter, V. y Wylie, B. *Mecánica de Fluidos*. 6ta edición. México: Mc Graw Hill, 1979.

The M.W. Kellogg Company. *Design of piping systems*. 2da edición: Jhon Wiley and sons.

Paper SPE 20631: Xlao, J.J.; Shoham, O. y Brill, J.P. *A comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow in Pipelines*. Society of Petroleum Engineers, Inc. University of Tulsa, 1990.

Paper SPE 20645: Z. El-Oun. *Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipelines*. Society of Petroleum Engineers, Inc. CALtec Limited, Subsidiary of BHR Group Ltd, 1990.

Pequiven. <http://www.pequiven.com> [consulta: Octubre 2005]

Tecnoconsult. <http://www.tecnoconsult.com> [consulta: Noviembre 2005]

Schlumberger. [http://www.slb.com/media/services/software/production/pipem\\_pf.pdf](http://www.slb.com/media/services/software/production/pipem_pf.pdf) [consulta: Noviembre 2005]

PDVSA. [http://www.intevep.pdv.com/santp/pquimicos/ind\\_productos.htm](http://www.intevep.pdv.com/santp/pquimicos/ind_productos.htm) [consulta: diciembre 2005]

Wipedia. [http://es.wikipedia.org/wiki/Golpe\\_de\\_ariete](http://es.wikipedia.org/wiki/Golpe_de_ariete) [consulta: Mayo 2006]

ASME B31.3-2002. Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping Code. ASME Code for Pressure Piping, B31.

PDVSA No L-TP- 1.5 Cálculo Hidráulico de Tuberías. Manual de Ingeniería de Diseño. Volumen 13-III. Procedimiento de Ingeniería.

PDVSA No MDP-02-FF-03. Flujo en Fase Líquida. Manual de Diseño de Proceso. Flujo de fluidos.

PDVSA. Especificaciones técnicas de Materiales y de Construcción.

PDVSA. Higiene Industrial. Índice general de productos químicos.

## GLOSARIO

Black Oil: petróleo negro.

Data sheet: hoja de especificaciones.

Flare: mechurrio.

Pipe rack: corredor de tubería, casillero de tubos.

Piping class: Tipo de tubería.

Rating: capacidad nominal.

Schedule: cédula o calibre.

Source: fuente.

## **ANEXO 1**

**El anexo 1 está asignado a la norma PDVSA, correspondiente al Iso-Octano, del Manual de Productos Químicos de Higiene Industrial (se puede consultar en el Trabajo Especial de Grado impreso).**

## **ANEXO 2**

**El anexo 2 está asignado a la norma PDVSA, correspondiente al Metanol, del Manual de Productos Químicos de Higiene Industrial (se puede consultar en el Trabajo Especial de Grado impreso).**

## **ANEXO 3**

**El anexo 3 está asignado a la norma PDVSA, correspondiente al MTBE, del Manual de Productos Químicos de Higiene Industrial (se puede consultar en el Trabajo Especial de Grado impreso).**