

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



**EVALUACION DE SISTEMA DE RECOLECCION DE PRODUCCIÓN
PARA NIVEL DE PRESION DE 250 PSI, PROPUESTO POR EL PROYECTO
GAS ANACO (PGA), PARA EL CENTRO OPERATIVO ZAPATO MATA R**

**PRESENTADO POR:
JOSDYS DEL VALLE CABRERA MATUTE**

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

INGENIERO QUÍMICO

Barcelona, Octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



**EVALUACION DE SISTEMA DE RECOLECCION DE PRODUCCIÓN
PARA NIVEL DE PRESION DE 250 PSI, PROPUESTO POR EL PROYECTO
GAS ANACO (PGA), PARA EL CENTRO OPERATIVO ZAPATO MATA R**

ASESORES

Ing. Químico Christiam De Las Casas
Asesor Académico

Ing. Químico Tomás Silva
Asesor Industrial

Barcelona, Octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA



**EVALUACION DE SISTEMA DE RECOLECCION DE PRODUCCIÓN
PARA NIVEL DE PRESION DE 250 PSI, PROPUESTO POR EL PROYECTO
GAS ANACO (PGA), PARA EL CENTRO OPERATIVO ZAPATO MATA R**

Ing. Químico Christiam De Las Casas
Asesor Académico

Ing. Químico Yraima Salas
Jurado Principal

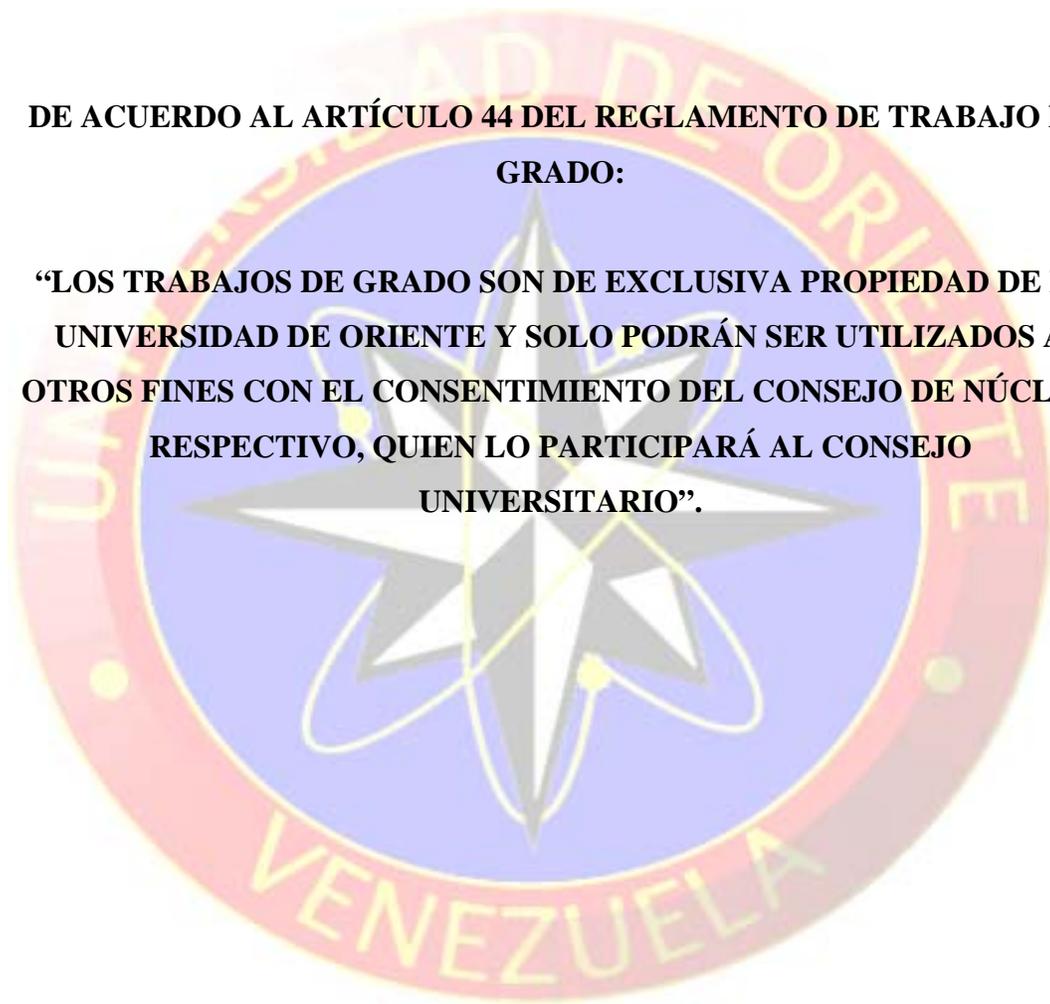
Ing. Químico Hernán Raven, M.Sc
Jurado Principal

Barcelona, Octubre de 2009

ARTÍCULO 44

DE ACUERDO AL ARTÍCULO 44 DEL REGLAMENTO DE TRABAJO DE GRADO:

“LOS TRABAJOS DE GRADO SON DE EXCLUSIVA PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE Y SOLO PODRÁN SER UTILIZADOS A OTROS FINES CON EL CONSENTIMIENTO DEL CONSEJO DE NÚCLEO RESPECTIVO, QUIEN LO PARTICIPARÁ AL CONSEJO UNIVERSITARIO”.



DEDICATORIA

A Dios Todopoderoso: le dedico este trabajo, que siempre me ha acompañado en cada uno de mis pasos, decisiones y riesgos en mi vida y ante todo me has cuidado, guiándome por el camino más adecuado y enseñándome que la vida todo se puede lograr con esfuerzo, constancia y amor.

A mis padres: mi madre Gledis Matute, la mujer más luchadora del mundo que desde pequeños nos ha enseñado a mis hermanos y a mí a luchar por lo que queremos y que con trabajo y dedicación se pueden lograr muchas cosas, nos ha dado amor y apoyo sobre todas las cosas. Mami eres un ejemplo a seguir “TE AMO” y eres y siempre serás mi motivo de superación. A mi padre José Cabrera, por brindarme su apoyo, sus consejos que me han mantenido por un buen camino y me llevaron a este lugar en el que estoy ahora; a ustedes quienes me regalaron la dicha de vivir, más que a nadie le dedico cada esfuerzo que he realizado, porque con su amor, apoyo moral y económico me han ayudado a lograr mis metas y han sido la influencia profesional más importante en mi vida. Este triunfo es de ustedes, los amo.

A mis hermanos: Rosanny y Natzer por darme parte de su alegría incansable los quiero muchísimo.

A mis abuelas: María Matute (Q.E.P.D), quien siempre me acompaña y me guía en cada uno de mis pasos, y Juana De Cabrera, por confiar en mí y darme siempre aliento para continuar y nunca decaer en los tropiezos que tuve, las quiero abuelitas.

Y a mi novio, Omar Benítez, por apoyarme y ayudarme como lo has hecho, siempre has estado cuando te necesito y este logro que ahora alcanzo también es gracias a ti, Te amo.

Josdys Cabrera

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios y la Virgen Del Valle por ayudarme por darme la fuerza para alcanzar mi meta.

Con mucho amor a mi familia, mis padres y mis hermanos por su incondicional apoyo sin ustedes no hubiese sido posible esto, ni estaría aquí ni sería quien soy ahora. Gracias Papi y Mami por darme la oportunidad de escoger la carrera que quería estudiar y apoyarme hasta el final y aunque siempre me dicen que esto es algo para mí, también es parte de ustedes y me complace compartirlo con ustedes.

A la Universidad de Oriente, sin duda alguna por brindarme la oportunidad de formar parte de obtener un título universitario y crecer de manera personal y profesional en su seno.

A la empresa PDVSA GAS ANACO, por permitirme realizar este trabajo de grado dentro de sus instalaciones, a todo el personal de la Superintendencia de Optimización de Infraestructura, el señor Luis Rojas, la señora Zoraida Báez, Héctor Vásquez, Gabriela Torrealba, Marcos Mata, Aurealis Lezama, Victor López, Jean Díaz, Jesús Lanz, Midennys León y María Carrera, por su ayuda y colaboración en la realización de esta tesis.

A mi asesor industrial, el ingeniero Tomás Silva, por ayudarme, orientarme y brindarme sus conocimientos en la materia, sin duda alguna aprendí bastante de él y agradezco el tiempo que me dedico y el interés que le puso a la realización de esta tesis.

De igual manera agradezco a mis compañeros tesisistas, Ali Zambrano, los chicos de la sala X de yacimientos, Jean, Felyxis, Samanta, Erik, por compartir tantos momentos de estrés, alegrías, tristezas y los mejores almuerzos de PDVSA, fue grato para mí conocerlos. Espero mantener el contacto.

A mi asesor académico Christiam De Las Casas, por ayudarme de manera incondicional y desinteresada, por darme la mano cuando no veía luz al principio de este camino.

Sin duda alguna tengo que agradecer a mis compañeros de lucha universitaria, con quienes compartir gratos momentos y hoy en día puedo considerar mis amigos, con quienes amanecí estudiar, comí en los pasillos de la UDO, espere notas a las puertas de algún cubículo, recibí regaños en la biblioteca, reí sin parar por sus ocurrencias, además estuvieron en momentos difíciles de mi vida y brindaron su apoyo incondicional, María Campos, Kendel Campos, Francisco Salazar, Nazareth Barrero (La Negra), Raúl Ojeda, Astrid Bastardo, Hugo López y Krizia Lazarinni; mis amigos de civil, Gabriela Benavidez, Daniel Cabrera; los chicos de mecánica Manuel Hernández, Freddy Morón y Nestor Rocca; y los más cercanos Grisel Ortiz, José y Erica Font, Katherine Figuera y Omelis Solórzano con quienes compartí desde el inicio en administración.

RESUMEN

La finalidad de este proyecto es garantizar la continuidad de las operaciones de Centro Operativo Zapato Mata R (COZMR), para lo cual se debió evaluar el sistema de recolección de producción para el nivel de producción de 250 psi propuesto por el Proyecto Gas Anaco (PGA), con ello se desea determinar los problemas operativos que presenta la red de recolección ante la nueva volumetría establecida por la gerencia de producción del Distrito Anaco, reflejada en el Portafolio de Oportunidades 2006-2025, la cual es diferente a la utilizada para el diseño de dicho Centro Operativo, ésto para plantear si es necesario mejoras en la red de recolección que permitan mantener la eficiencia de las operaciones; y diseñar las interconexiones entre las estaciones de recolección propuestas por PGA, y las estaciones de flujo y descarga existentes, de tal manera que el periodo de pre-arranque del centro operativo transcurra sin contratiempos. Para lograr estos planteamientos se trabajó con el programa de simulación Pipephase 9.2, comparando los resultados obtenidos con las normas API y PDVSA, obteniéndose que la red puede funcionar con la nueva volumetría pero presentaría problemas con el tiempo que acarrearían continuos gastos por mantenimiento de las tuberías, por lo que se planteó dos soluciones una de ellas desvío de la producción en la misma red ya diseñada por PGA, y la segunda el redimensionamiento de las tuberías, en cuanto a las interconexiones se determinó que las adecuaciones necesarias entre las estaciones actuales y las planteadas por PGA, en los campos Zapato y Mata R oscilan entre los 6” y 20” de diámetro.

CONTENIDO

ARTÍCULO 44	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN.....	ix
CONTENIDO	x
LISTA DE TABLAS	xv
LISTA DE FIGURAS.....	xviii
CAPITULO I.....	22
INTRODUCCIÓN	22
1.1 Breve Reseña de la empresa.....	22
1.2 Planteamiento del problema.....	25
1.3 Objetivos	27
1.3.1 Objetivo general.....	27
1.3.2 Objetivos específicos	28
CAPITULO II	29
MARCO TEÓRICO.....	29
2.1 Antecedentes	29
2.2 Proyecto Gas Anaco (PGA)	30
2.2.1 Soluciones a corto plazo (manejo de la transición).....	31
2.2.2 Descripción de las instalaciones.....	31
2.2.3 Plan de desincorporación y desmantelamiento de instalaciones de superficie	33
2.3 Proceso de producción del gas natural desde el yacimiento del gas natural hasta el consumidor final.....	33
2.3.1 Primera etapa: extracción de hidrocarburos de los yacimientos	34

2.3.2 Segunda etapa: recolección de los hidrocarburos que se extraen del yacimiento	35
2.3.3 Tercera etapa: separación de los hidrocarburos	41
2.3.4 Cuarta etapa: compresión del gas separado	42
2.3.5 Quinta etapa: acondicionamiento del gas (endulzamiento y deshidratación)	44
2.3.6 Sexta etapa: procesamiento (extracción y fraccionamiento).....	45
2.4 Flujo multifásico	46
2.4.1 Velocidad superficial de la mezcla	47
2.4.2 Propiedades de la mezcla	49
2.5 Clasificación de régimen de flujo de acuerdo a la continuidad de las fases	50
2.5.1 Régimen de flujo segregado.....	51
2.5.1.1 Flujo estratificado.....	52
2.5.1.2 Flujo ondulante	53
2.5.1.3 Flujo anular	53
2.5.2 Régimen de flujo intermitente.....	54
2.5.2.1 Flujo de coágulo, tapón o slug	55
2.5.2.2 Flujo de burbuja alargada.....	56
2.5.3 Régimen de flujo distribuido.....	57
2.5.3.1 Flujo tipo burbuja.....	57
2.5.3.2 Flujo tipo neblina o disperso	58
2.6 Formaciones de líquido en los flujos gaseosos en tuberías.....	58
2.6.1 Fracción de líquido en el situ (Liquid Hold up).....	60
2.6.2 Fracción de líquido sin deslizamiento λ_L (no-slip liquid hold up).....	61
2.7 Velocidad de erosión.....	62
2.8 Ecuación de energía	63
2.9 Gradiente total de caída de presión	66
2.9.1 Efectos de la aceleración sobre la caída de presión ΔP	67
2.9.2 Efectos de la posición sobre la caída de presión ΔP	68

2.9.3 Efectos debido a la fricción sobre la caída de presión ΔP	69
2.9.4 Pérdida de presión debido a válvulas y accesorios	70
2.10 Correlaciones de flujo multifásico en tuberías.....	71
2.10.1 Flujo multifásico en tuberías verticales.....	71
2.10.1.1 Hagedon y Brown	71
2.10.1.2 Gray.....	72
2.10.1.3 Gilbert (1954).....	72
2.10.1.4 Duns & Ros (1963)	72
2.10.1.5 Orkiszewsky (1967)	72
2.10.1.6 Beggs & Brill (1973).....	73
2.10.2 Flujo multifásico en tuberías horizontales	73
2.10.2.1 Beggs & Brill (1973).....	73
2.10.2.2 Beggs & Brill revisada	74
2.10.2.3 Dukler, Aga & Flanigan.....	74
2.10.2.4 Eaton y colaboradores (1966)	74
2.11 Simuladir PIPEPHASE	75
2.12 Portafolio De Oportunidades (PDO).....	77
CAPITULO III.....	78
MARCO METODOLÓGICO.....	78
3.1 Problemas operacionales de la red de recolección propuesta por PGA, de los campos Zapato-Mata R, ante la nueva volumetría establecida para las operaciones centralizadas.....	78
3.1.1 Elaboración de un modelo de simulación representativo a la red de recolección tradicional	94
3.1.1.1 Definición de la simulación	94
3.1.1.2 Selección de los componentes presentes en el fluido de trabajo.....	97
3.1.1.3 Elaboración de las redes en el simulador	100
3.1.1.4 Validación de la red tradicional	112

3.1.2 Elaboración del modelo de simulación de la red de recolección propuesta por PGA.....	114
3.1.2.1 Definición del modelo de red.....	114
3.1.2.2 Selección de componentes presentes en el fluido de trabajo	114
3.1.2.3 Elaboración de las redes PGA en el simulador	114
3.1.2.4 Validación del modelo de simulación representativo del sistema de recolección propuesto por PGA	120
3.1.3 Evaluación de los parámetros hidráulicos frente al impacto del PDO 2006-2025.....	121
3.2 Mejoras en la red de recolección propuesta por PGA, que garanticen la eficiencia de las operaciones del centro operativo Zapato Mata R	126
3.2.1 Cambios de diámetros.....	126
3.2.2 Desvíos de producción	129
3.3 Interconexiones entre las estaciones de recolección propuesta por GA, y las estaciones de flujo y descarga existentes, en los campos Zapato y Mata R para el periodo de prearranque del centro operativo.....	133
CAPITULO IV	138
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	138
4.1 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	138
4.1.1 Problemas operacionales de la red de recolección propuesta por PGA, de los campos Zapato – Mata R, ante la nueva volumetría establecida para las operaciones centralizadas.....	138
4.1.1.1 Modelo de simulación actual	141
4.1.1.2 Modelo de simulación PGA.....	147
4.1.1.3 Evaluación de los parámetros hidráulicos frente al impacto del PDO 2006- 2025	149
4.1.1.3.1 Maxima producción del PDO 2006-2025	150
4.1.1.3.2 Mínima producción del PDO 2006-2025.....	153

4.1.2 Mejoras en la red de recolección propuesta por PGA, que garanticen la eficiencia de las operaciones del Centro Operativo Zapato Mata R	156
4.2.1.1 Cambios de diámetro	156
4.2.1.2 Desvío de producción.....	163
4.1.3 Interconexiones entre las estaciones de recolección propuesta por PGA, y las estaciones de flujo y descarga existentes, en los campos Zapato y Mata R para el periodo de prueba del centro operativo.....	173
CAPITULO V	180
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	180
5.1. Conclusiones	180
5.2. Recomendaciones.....	182
BIBLIOGRAFÍA	184
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO	187

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Factor de conversión de presión con respecto a la densidad ^[9]	69
Tabla 3.1 Listado de gasoductos activos de los campos Zapato y Mata R, para el nivel 250 psi.	86
Tabla 3.2 Flujos, presiones y temperaturas consideradas para el montaje de la red actual.	102
Tabla 3.3 Compromiso de los campos con las plantas compresoras.	105
Tabla 3.4 Valores de presión real en las estaciones	112
Tabla 3.5 Volumetría usada para el modelo de simulación PGA ^[16,17]	115
Tabla 3.6 Presiones y temperatura de cada fuente de las estaciones ^[16,17]	115
Tabla 3.7 Datos de los sumideros de la red PGA ^[16,17]	116
Tabla 3.8 Parámetros de diseño de la red PGA usados para la validación ^[18]	121
Tabla 3.9 Máximos flujos estimados del PDO 2006 – 2025 (año 2014)	122
Tabla 3.10 Flujo mínimos estimados, del PDO 2006 – 2025 (año 2025)	122
Tabla 3.11 Máxima presión recomendada por cada 100 pies de tuberías.....	125
Tabla 3.12 Datos de las líneas del campo Mata R.	127
Tabla 3.13 Datos de las líneas del campo Zapato.	127
Tabla 3.14 Líneas sujetas a sensibilidad de los campos Zapato y Mata R.....	129
Tabla 3.15 Flujos usados para seleccionar la opción más apropiada para las interconexiones.	135
Tabla 3.16 Diámetros plantados para la evaluación.....	136
Tabla 4.1 Tabla comparativa entre diámetros calculados durante la ingeniería básica y de detalle para las líneas de recolección del COZMR ^[15]	139
Tabla 4.2 Matriz de evaluación de correlación para caída de presión del sistema de recolección actual.....	143
Tabla 4.3 Catalogo de los métodos de caída de presión recomendados para el flujo multifásico en tubos horizontales e inclinados ^[14]	144

Tabla 4.4 Líneas PGA operativas en la actualidad pertenecientes a los campos Zapato y Mata R.....	145
Tabla 4.5 Porcentaje de desviación con respecto a la presión para la validación de la red de recolección actual, nivel 250 psig.	146
Tabla 4.6 Porcentaje de desviación con respecto a la presión para la validación de la red de recolección PGA, nivel 250 psi.....	148
Tabla 4.7 Resultados obtenidos para la red PGA, al manejar la volumetría máxima estimada en el PDO 2006-2025	152
Tabla 4.8 Resultados obtenidos para la red PGA, al manejar la volumetría mínima estimada en el PDO 2006-2025	155
Tabla 4.9 Sensibilidad de las tuberías para el flujo máximo del nuevo PDO.....	158
Tabla 4.10 Resultados de la red con los diámetros seleccionados, usando la máxima volumetría del PDO 2006-2025	161
Tabla 4.11 Resultados de la red con los diámetros propuestos manejando la mínima volumetría establecida en el PDO 2006-2025.....	162
Tabla 4.12 Evaluación del primer esquema propuesto para el campo Zapato manejando el máximo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.31)	165
Tabla 4.13 Evaluación del primer esquema propuesto para el campo Mata R manejando el máximo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.34)	166
Tabla 4.14 Evaluación del segundo esquema propuesto para el campo Zapato manejando el máximo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.32)	167
Tabla 4.15 Evaluación del segundo esquema propuesto para el campo Mata R manejando el máximo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.35)	168
Tabla 4.16 Evaluación del primer esquema de producción propuesto para el campo zapato, manejando el mínimo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.33)	169
Tabla 4.17 Evaluación del primer esquema de producción propuesto para el campo Mata R, manejando el mínimo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.36)	170
Tabla 4.18 Evaluación del segundo esquema de producción propuesto para el campo zapato, manejando el mínimo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.34).	171

Tabla 4.19 Evaluación del segundo esquema de producción propuesto para el campo Mata R, manejando el mínimo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.37)..... 172

Tabla 4.20 Capacidad de los separadores y volumetría a manejar, por cada estación 173

Tabla 4.21 Resultados de la sensibilidad realizada a las interconexiones planteadas entre la infraestructura actual y la futura..... 176

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación Geográfica de AMA y AMO.....	23
Figura 1.2 Ubicación geográfica del Área Mayor de Oficina (A.M.O.) y de los Campo Zapato y Mata-R.....	24
Figura. 2.1 Esquemático de producción para las instalaciones P.G.A.....	32
Figura 2.2 Etapas de producción del gas natural desde el yacimiento hasta los centros de consumo ^[5]	34
Figura 2.3 Sistema de válvulas en la superficie de un pozo.	35
Figura 2.4 Fotografía de un estrangulador conectado al cabezal de pozo.	36
Figura 2.5 Tuberías para la conexión de los pozos con el múltiple de producción. ..	36
Figura 2.6 Múltiple de producción de 10 puestos instalado en la estación de flujo ZEF-8.	37
Figura 2.7 Válvulas multipuertos instaladas en estación de flujo X-8.....	39
Figura 2.8 Estación de flujo ZEF-7.....	41
Figura 2.9 Separador de producción Figura 2.10 Separador de producción.....	42
Figura 2.11 Compresor centrífugo, perteneciente a la planta compresora Zapato. ...	44
Figura 2.12 Orientación de las tuberías en el transporte de flujo bifásico gas – líquido.	46
Figura 2.13 Patrones de flujo respecto a las velocidades del gas y líquido.	50
Figura 2.14 Regimenes de flujo para tubería horizontal.....	51
Figura 2.15 Patrón de flujo estratificado.....	52
Figura 2.16 Flujo ondulante.	53
Figura 2.17 Patrón de flujo anular ^[10]	54
Figura 2.18 Régimen de flujo intermitente ^[10]	55
Figura 2.19 Flujo de coágulo.	55
Figura 2.20 Flujo slug en tuberías horizontales.	56
Figura 2.21 Flujo de burbuja alargada.	57

Figura 2.22 Flujo tipo burbuja.	58
Figura 2.23 Flujo disperso.	58
Figura 2.24 Perfil topográfico gasoductos entre Complejo Muscar y San Joaquín Booster emitido por el simulador Pipephase.....	59
Figura 2.25 Formación de baches de líquidos a lo largo de una tubería con pendientes.....	60
Figura 2.26 Hold up del slug de líquido.	61
Figura 2.27. Representación gráfica del balance de energía ^[13]	64
Figura 3.1 Simulación de Campo Zapato y la llegada a la planta compresora.	81
Figura 3.2 Esquemático de X-8, destinado a recolectar las medidas de las líneas de 250 psi.	83
Figura 3.3 Esquemático de X-8, destinado a recolectar las dimensiones de las tuberías del nivel 250 psi.	84
Figura 3.4 Esquemático representativo de todo el sistema de recolección de campo Zapato para el nivel de presión 250 psi.....	87
Figura 3.5 Esquemático del sistema de recolección de Mata R del sistema de 250 psi.	88
Figura 3.6 Gasoductos de recolección de las estaciones ZEF-7 y ZEF-8.....	89
Figura 3.7 Levantamiento de la succión de la planta compresora Mata R.	92
Figura 3.8 Levantamiento de la planta compresora Zapato, para el nivel de presión 250 psi.....	93
Figura 3.9 Modelo de red.....	95
Figura 3.10 Tipo de fluido.	96
Figura 3.11 Fase de la mezcla.....	96
Figura 3.12 Unidades de trabajo.	97
Figura 3.13 Ventana para entrar al listado de los componentes.....	98
Figura 3.14 Ventana para seleccionar los compuestos que conforman al fluido estudiado	99
Figura 3.15 Listado de componente seleccionado	99

Figura 3.16	Esquema de una red de simulación hidráulica.	101
Figura 3.17	Selección de las fuentes agua, crudo y gas para la estación ZEF-10....	103
Figura 3.18	Ventana que muestra los parámetros pertenecientes a la corriente de gas de la estación ZEF-10.....	104
Figura 3.19	Ventana que muestra la composición del gas según los análisis cromatográficos para la estación ZEF-10.	104
Figura 3.20	Selección del sumidero en el menú de <i>Pipephase 9.2</i>	106
Figura 3.21	Ventana que muestra los datos que corresponden a la planta compresora La Ceibita.....	106
Figura 3.22	Representación de la simulación del múltiple de producción de la estación ZEF-10.	108
Figura 3.23	Ventana para cagar los accesorios existentes en un link.	109
Figura 3.24	Cuadro de diálogo donde se muestra las especificaciones para las tuberías del múltiple de producción de ZEF-10.....	109
Figura 3.25	Accesorios agregados a la simulación para representar a la estación ZEF-10.....	110
Figura 3.26	Esquemático de la estación ZEF-10.	111
Figura 3.27	Esquemático del Centro Operativo Zapato Matar, detallando líneas en uso.	118
Figura 3.28	Imagen de uno de los planos utilizados para conocer las especificaciones de las estación de recolección propuestas por PGA.....	119
Figura 3.29	Esquemático del Campo Zapato al nivel de presión 250 psig, diseñado por el Proyecto Gas Anaco.....	128
Figura 3.30	Esquemático del campo Mata R, para el nivel de presión 250 psig, diseñado por el Proyecto Gas Anaco.	128
Figura 3.31	Primer esquema de recolección propuesto para el campo Zapato.....	130
Figura 3.32	Segundo esquema de recolección propuesto para el campo Zapato.....	131
Figura 3.33	Tercer esquema de recolección propuesto para el campo Zapato.	131
Figura 3.34	Primer esquema de recolección propuesto para el campo Mata R.	132

Figura 3.35 Segundo esquema de recolección propuesto para el campo Mata R....	132
Figura 4.1. Porcentaje de disminución de la volumetría estimada para las operaciones centralizadas	140
Figura 4.2 Modelo de simulación de la red de recolección actual Zapato - Mata R, nivel 250 psi.	147
Figura 4.3 Red de recolección PGA y actual, nivel de presión 250 psi.....	149
Figura 4.4 Interconexión incorporada a la simulación de la estación X-8.....	174
Figura 4.5 Esquemático de X-8 y la interconexión planteada.	175

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Breve Reseña de la empresa

Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA), se encarga del desarrollo de la industria petrolera, petroquímica y carbonífera de Venezuela, planifica, coordina, supervisa y controla las actividades operativas de sus divisiones, tanto en Venezuela como en el exterior.

Con el fin de cumplir con las metas planteadas y de mantenerse como una empresa sólida, en 1.999 se crea PDVSA Gas con la disposición de lograr el desarrollo en las diferentes actividades para el comercio del gas natural. El Área Tradicional Anaco es transformada en el Distrito Gas Anaco (DGA) como consecuencia de la creación de PDVSA Gas y el mismo se ha transformado en el área operacional de mayor importancia en cuanto a actividades de exploración, perforación, producción y transporte de gas; que lo elevan al puesto de centro gasífero de Venezuela.

El Distrito Gas Anaco está localizado en la parte central del estado Anzoátegui abarcando parte de los estados Guárico y Monagas con un espacio geográfico de aproximadamente 13.400 km², el cual esta dividido en dos áreas operacionales de explotación llamadas unidades de producción: Área Mayor de Anaco (AMA) y Área Mayor de Oficina (AMO), en la figura 1.1 se observa la ubicación geográfica del Distrito Gas Anaco con sus dos Áreas Operacionales.



Figura 1.1 Ubicación Geográfica de AMA y AMO.

El área que será objeto de estudio es el Área Mayor de Oficina, la cual posee formaciones productoras de hidrocarburos, siendo las principales y de mayor importancia económica, Oficina y Merecure. La extensión superficial de esta área es de aproximadamente 14.500 kilómetros cuadrados.

El Área Mayor de Oficina está ubicada específicamente en la subcuenca de maturín, llega en el norte hasta las áreas de Anaco y Jusepín, al sur a los sectores de Hamaca y Zuata de la Faja del Orinoco, al este los campos de temblador y al oeste los campos de Guárico.

La unidad de explotación del Área Mayor de Oficina (A.M.O.) operacionalmente esta integrada por los campos: Soto, Mapiri, La Ceibita, Mata R, Carisito, Zapato, Araibel, Maulpa y Aguasay; el estudio se desarrollará específicamente en los campos Zapato – Mata R. En la figura 1.2, se puede observar la ubicación de los campos Zapato - Mata R

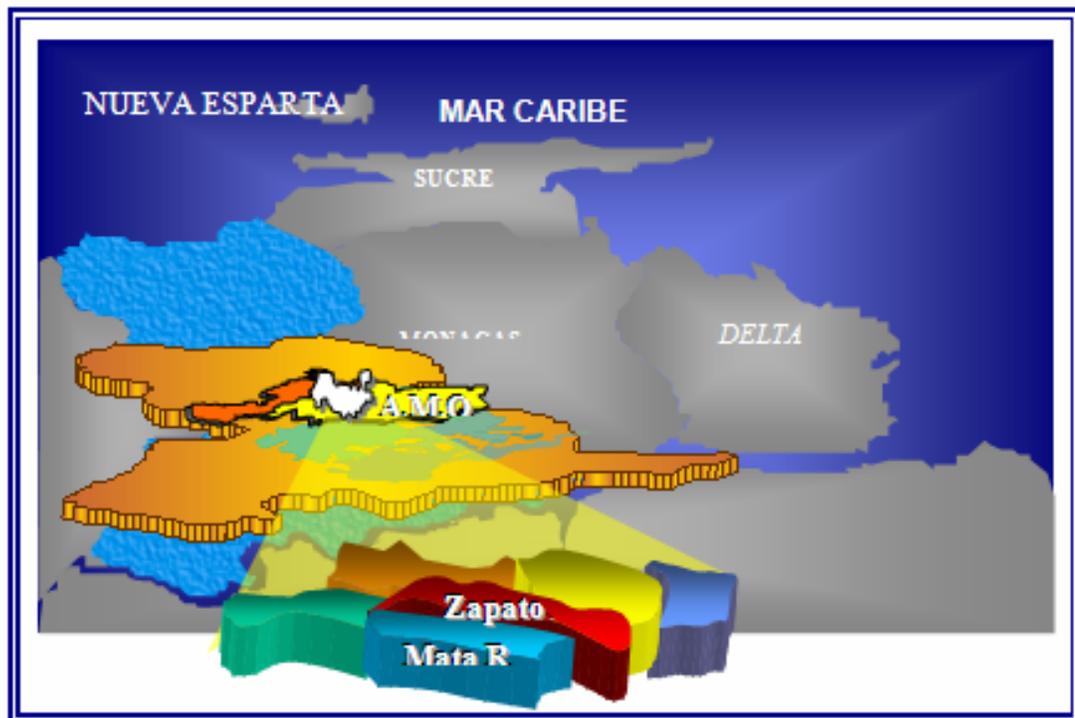


Figura 1.2 Ubicación geográfica del Área Mayor de Oficina (A.M.O.) y de los Campos Zapato y Mata-R

Los campos Zapato y Mata R, encuentran conformados de la siguiente manera:

- Campo ZAPATO
 - ✓ 7 estaciones de flujo: ZEF-10, ZEF-8, ZEF-7, ZEF-11, ZEF-9, ZEF-14, ZEF-1.
 - ✓ 1 estación de descarga: ZED-7.
 - ✓ 2 plantas compresoras: Planta Compresora Zapato con capacidad de compresión de 18 millones de pie cúbicos estándar por día (MMSCFD) y 27 MMSCFD, para niveles de presión nominal de 60 psi y 250 psi respectivamente; y Planta Compresora Exterran

(alquilada) con capacidad de compresión de 20 MMSCFD y 50 MMSCFD, para niveles de presión de 60 psi y 250 psi respectivamente.

- MATA R
 - ✓ 4 estaciones de flujo: W-4, X-8, B-12 Y M-1.
 - ✓ 1 estación de descarga: Mata Principal.
 - ✓ 3 plantas compresoras: una Planta Compresora Propia, Mata R, dos alquiladas, Exterran fase I y II con capacidad de compresión, para niveles de presión de 60 psi y 250 psi respectivamente.

1.2 Planteamiento del problema

El esquema actual de producción que se aplica en dichos campos consiste en: el flujo multifásico proveniente de los pozos, llega a las instalaciones de producción (flujo o descarga) a través de tuberías que están direccionadas a los múltiples de producción o válvulas multipuertos, para luego ser enviado a los sistemas de separación donde se obtiene el gas y el líquido. El gas, es enviado a las plantas compresoras, donde se eleva la presión del gas hasta 1200 psi y el crudo es enviado a las estaciones de descarga para su tratamiento.

En los campos Zapato y Mata R, se propone un cambio en la filosofía de operación, con la finalidad de aprovechar al máximo el potencial energético proveniente de los pozos y mejorar los esquemas de producción actuales. Para ello se plantea un esquema operacional centralizado, a través de la construcción del Centro Operativo Zapato – Mata R (COZMR), donde se ejecutarán las operaciones de

separación y compresión del gas en todos sus niveles de presión, tratamiento del crudo y de efluentes (agua de producción).

Tanto en el periodo de prueba y arranque, como en las operaciones normales del COZMR, es imprescindible mantener la producción para cumplir con los requerimientos y compromisos, de estos campos productores con el mercado interno, es por esta razón que la Gerencia de Producción Gas Anaco, debe contar con alternativas que permitan controlar y poner en marcha planes de contingencia para solucionar fallas que podrían presentarse no sólo durante el periodo de prueba si no también a la hora de manejar la volumetría futura planificada, reflejada en el Portafolio de Oportunidades (PDO), para las operaciones centralizadas.

Es importante resaltar que aunque actualmente, en los campos Zapato – Mata R, se adelanta la construcción de la infraestructura, propuestas por el Proyecto Gas Anaco (PGA), la actual (estaciones de flujo, descarga y red de tuberías) permanecerá en los campos hasta que el COZMR estabilice por completo sus operaciones.

Actualmente existentes dos problemas que podrían afectar la continuidad de las operaciones, uno de ellos es el cambio de volumetría utilizada para el diseño de la red de recolección, pero por retardos en la construcción y declinación en los pozos productores se reestructuró dicha volumetría estimada, el segundo se presenta en el periodo de prueba, ya que se plantea el uso de gas para el periodo de pre-arranque y de esta forma determinar las fallas que existan en el sistema y de esta manera reducir el impacto económico a consecuencia de un problema operacional que genere una pérdida de crudo, pero como se dijo anteriormente, este sistema fue diseñado para el manejo de flujo multifásico desde las estaciones hasta el centro operativo por lo que en las estaciones no se cuenta con un sistema de separación gas-líquido.

Basándose en todo lo antes expuesto, con este proyecto se evaluará el sistema de recolección, para determinar los problemas operacionales que podrían acarrear la nueva volumetría estimada, y las interconexiones necesarias para el periodo de prueba, entre la infraestructura actual, para hacer uso del sistema de separación allí existente, y la planteada por el PGA, para el nivel de presión de 250 psi. El desarrollo de estas propuestas resulta importante para así minimizar posibles impactos en los compromisos de entrega de gas al mercado.

Para este fin se utilizará un modelo de simulación que contenga ambas redes de recolección de producción, (actual y futura), ajustadas previamente a la realidad del campo en el caso de la infraestructura actual y a lo establecido en el diseño de la red de recolección para la infraestructura propuesta por el PGA, siendo los puntos específicos a observar en dichas evaluaciones, ciertas condiciones hidráulicas como, formación de líquido, regímenes de flujo, velocidad erosional, máxima capacidad de las líneas y caídas de presión por tramos de tuberías.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el sistema de recolección de producción para el nivel de presión de 250 psi, propuesto por el Proyecto Gas Anaco (PGA), para el Centro Operativo Zapato Mata R.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Determinar los problemas operativos que presenta la red de recolección propuesta por PGA, de los campos Zapato – Mata R, para el nivel de presión 250 psi nominal, ante la nueva volumetría establecida para las operaciones centralizadas.
2. Plantear mejoras en la red de recolección propuesta por PGA, que garanticen la eficiencia de las operaciones del Centro Operativo Zapato Mata R, para el nivel de presión de 250 psi.
3. Diseñar las interconexiones entre las estaciones de recolección propuesta por PGA, y las estaciones de flujo y descarga existentes, en los campos Zapato Mata R para el periodo de prueba del Centro Operativo.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Algunos de los trabajos de investigación, realizados anteriormente y que guardan cierta similitud con el tema a desarrollar son los siguientes:

RAMOS [1], en el 2006 realizó un análisis del comportamiento hidráulico, bajo un incremento de la producción, del sistema de recolección del flujo multifásico para los niveles de presión 60 y 450 psi, del Campo San Joaquín – Guárico – El Roble, con el fin de predecir el comportamiento del sistema y acelerar el tiempo de respuesta para la toma de decisiones de propuestas de manejo de producción actual, lapso de transición y futuro.

DIAZ [2], en el 2005 llevó a cabo la “evaluación del manejo del fluido desde las estaciones de flujo hasta la planta compresora del campo Mata R, Área Mayor Oficina”. Con la finalidad de conocer las fallas que presentaba el sistema, de recolección, que ocasionaban problemas tanto en el manejo de fluidos como daños en los compresores por el alto contenido de líquidos que llegaban a la planta compresora, y por ende afectaba el procesamiento de hidrocarburos limitando de esta forma la producción del campo.

HERNÁNDEZ [3], en el 2003 desarrolló un “análisis hidráulico del gasoducto Zapato Viejo – Extracción San Joaquín de 36” para manejar el volumen de gas proveniente de las estaciones X-8 y W-4 comprimido a 1200 psi”, para presentar

propuestas que tienen como finalidad solucionar el desvío de las líneas de descarga de X-8 y W-4, con la menor inversión posible y a la vez desahogar la planta compresora San Joaquín Booster con el propósito de utilizar parte de su capacidad para comprimir gas de 450 psi proveniente del campo San Joaquín y de esta forma disminuir los costos de compresión alquilada en el área.

2.2 Proyecto Gas Anaco (PGA)

Consiste en el desarrollo gasífero de Anaco, mediante el cual se explotará de manera integral y óptima las reservas de hidrocarburos existentes en el subsuelo. El Distrito Gas Anaco está conformado por dos grandes áreas, dentro de las cuales se encuentran todos los campos de producción. Estas áreas son las siguientes:

- Área Mayor de Anaco (AMA), la cual comprende los siguientes campos:

Campo Quiamare-La Ceiba.

Campo Santa Rosa.

Campos San Joaquín / El Roble / Guarío.

Campos Santa Ana / El Toco.

- Área Mayor de Oficina (AMO), conformada por los siguientes campos:

Campos Zapatos / Mata R.

Campo La Ceibita.

Campos Aguasay / Carisito.

Campos Soto / Mapiri.

La infraestructura existente presente en los campos mencionados, tanto para el AMO como para el AMA, no es suficiente para el manejo de los nuevos volúmenes de producción y presentan un alto nivel deterioro y fueron diseñadas y construidas bajo la base de producción solamente de crudo. Basado en lo anterior, la Gerencia de Producción de Distrito Gas Anaco, determinó la necesidad de optimizar, adecuar y/o desarrollar la infraestructura necesaria para manejar los nuevos volúmenes de gas y líquido esperados. Para tal fin la Gerencia planteó el esquema centralizado, para el desarrollo de cada uno de los campos al nivel de superficie con todos los niveles de presión, el cual va a permitir, aumentar el valor agregado del negocio, al reducir costos operativos y de mantenimiento, además de minimizar el posible impacto ambiental y la afectación a terceros^[4].

2.2.1 Soluciones a corto plazo (manejo de la transición)

Comprende la adecuación de las instalaciones existentes que fueron originalmente concebidas para manejar corrientes con baja relación gas-petróleo (baja RGP), siendo el crudo el fluido principal, y el gas la corriente secundaria. En función de las necesidades operacionales se crearon estos planes:

- Adecuación de las plantas compresoras.
- Adecuación de los sistemas de recolección.
- Adecuación de estaciones de flujo.

2.2.2 Descripción de las instalaciones

Las instalaciones e infraestructura requeridas para el manejo centralizado de los volúmenes de gas y líquido contemplados en el Portafolio de Oportunidades, para los diferentes niveles de presión, así como la distribución del gas hacia el criogénico San

Joaquín y el despacho de los líquidos separados (crudo y agua), mantendrán el mismo principio de diseño para cada centro operativo planteado tanto para la fase I como para la fase II, o por lo menos manejará la misma filosofía de operación. En la figura 2.1, se muestra un esquemático tipo, que representa todo el sistema operativo desde los pozos hasta la venta de la producción.

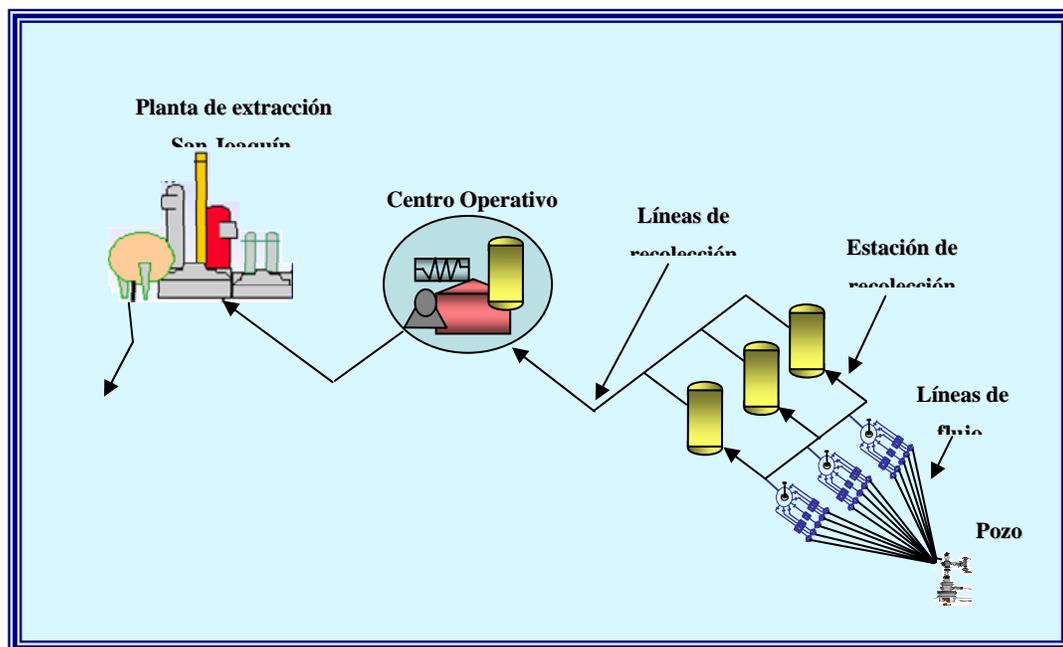


Figura. 2.1 Esquemático de producción para las instalaciones P.G.A.

La filosofía de operación centralizada es la siguiente: el flujo multifásico proveniente de los pozos productores es direccionado, a través de las líneas de flujo, hasta las válvulas multipuertos en cada estación de recolección, (en estas se contará solo con separadores con el fin de utilizarlos para las pruebas de los pozos), desde donde se enviará el flujo a través de las líneas de recolección, correspondiente a cada nivel de presión, hasta el centro operativo donde se realizará la separación gas-líquido y se llevará a cabo, posteriormente, todas las operaciones tratamiento de crudo y

bombeo a patio tanque Anaco; y se realizará el proceso de compresión de gas y envío al sistema de transmisión que llega a la planta de extracción San Joaquín para la venta del gas.

Las operaciones centralizadas constarán de:

- Líneas de flujo.
- Estaciones satélites o de recolección..
- Corredores de tuberías o red de recolección del flujo multifásico.
- Centro Operativo.

2.2.3 Plan de desincorporación y desmantelamiento de instalaciones de superficie

El área de las estaciones actuales, fueron las seleccionadas para la implantación de las nuevas instalaciones del Proyecto Gas Anaco, por lo que se deberá efectuar un desmantelamiento previo para su construcción; de esta manera se minimizará el impacto de afectación a nuevas áreas. El plan de desincorporación de activos, contempla la identificación de todos aquellos que no formarán parte de la nueva infraestructura; igualmente dicho plan considera la puesta en marcha paulatina y progresiva de las nuevas instalaciones, a objeto de minimizar los impactos en la producción de gas y de crudo^[4].

2.3 Proceso de producción del gas natural desde el yacimiento del gas natural hasta el consumidor final

Luego que el gas es extraído de los pozos pasa por una serie de etapas a manera de prepararlo para la venta en la figura 2.2 se muestra todo el proceso por el cual debe pasar el gas natural para llegar a los centros de consumo^[5].

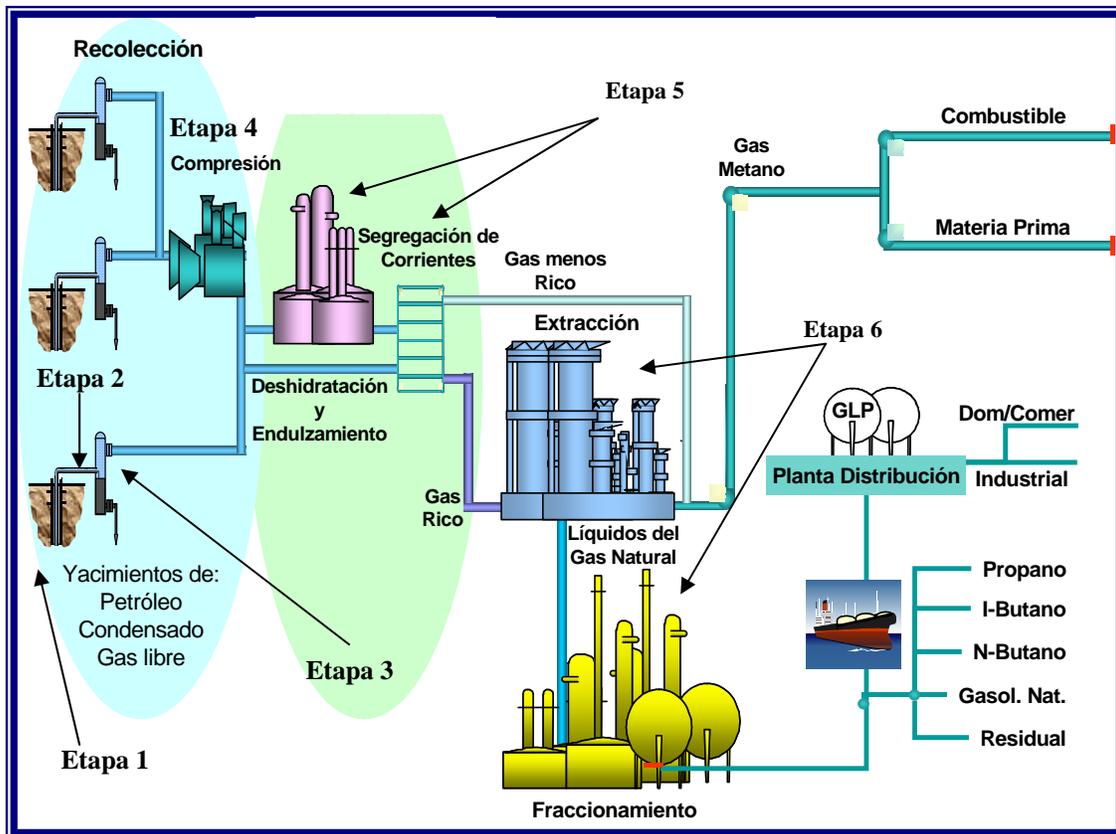


Figura 2.2 Etapas de producción del gas natural desde el yacimiento hasta los centros de consumo^[5].

2.3.1 Primera etapa: extracción de hidrocarburos de los yacimientos

- **Flujo de los hidrocarburos en el yacimiento:** el petróleo, con gas natural asociado, agua y sedimentos, fluye por los microcanales de la roca porosa y permeable del yacimiento hasta llegar al fondo del pozo productor.
- **Producción de los hidrocarburos en el pozo:** una vez que el petróleo llega al fondo del pozo, continúa su recorrido por la tubería de producción hasta alcanzar la superficie, impulsado por la energía natural, presión del yacimiento o bombeo mecánico.

2.3.2 Segunda etapa: recolección de los hidrocarburos que se extraen del yacimiento

Esta etapa consiste en transportar desde la salida del pozo hasta la etapa de separación de los hidrocarburos. Las facilidades de superficie son:

- a) **Cabezal de pozo:** es un sistema de control en superficie, el cual consiste en una serie de válvulas, uniones, manómetros, entre otros instrumentos que mantienen el control del pozo y a su vez, permite la llegada y direccionamiento de los hidrocarburos hacia la próxima etapa del proceso de producción. En la figura 2.3 se muestra a las series de dispositivos (válvulas e instrumentos) ubicados en la superficie del pozo^[5].



Figura 2.3 Sistema de válvulas en la superficie de un pozo.

- b) **Estranguladores:** son dispositivos mecánicos que restringen el diámetro en la tubería que permite variar la tasa de producción. Consiste básicamente en un dispositivo de menor diámetro al de la tubería donde está instalado, y esta

ubicado en la entrada de la línea de flujo, en el cabezal del pozo. En la Figura 2.4, se observa un estrangulador^[5].



Figura 2.4 Fotografía de un estrangulador conectado al cabezal de pozo.

- c) **Líneas de flujo:** se denomina de esta manera a la tubería que conecta el cabezal de un pozo con el múltiple de producción en la estación de flujo. La longitud de las líneas, es un parámetro de importancia por las caídas de presión entre el pozo y la estación de flujo o de descarga. Cuando se trata de una serie líneas de flujo que descargan en una estación se les llama corredor de tuberías como se muestra en la figura 2.5^[6].



Figura 2.5 Tuberías para la conexión de los pozos con el múltiple de producción.

Múltiple de producción: en esta parte se une la producción de varios pozos a una misma presión, antes de ser enviada a los trenes de separación gas – líquido. Los múltiples de producción y de prueba se utilizan para recolectar la producción de varios pozos hasta la estación de recolección, a demás poseen la facilidad de ser operados manualmente o automáticamente con válvulas y con contadores de tiempo automáticos.

- d) Los múltiples de la producción y prueba pueden ser diseñados para los grados ANSI (Instituto Nacional Americano de Normas o American National Standards Institute) y API (Instituto Americano del Petróleo o American Petroleum Institute) para varias presiones y varios tamaños de tubos. El múltiple facilita el manejo de la producción total de los pozos que ha de pasar por los separadores como también el aislamiento de pozos para pruebas individuales de producción a través de las interconexiones del sistema y la disposición apropiada de válvulas. El múltiple que se muestra en la figura 2.6 consta de 10 puestos, es decir 10 conexiones para 10 líneas de flujos^[7].



Figura 2.6 Múltiple de producción de 10 puestos instalado en la estación de flujo ZEF-8.

- e) **Válvulas multipuertos (VMP):** consiste de un cuerpo sólido con ocho entradas y dos salidas, una de las salidas, se utilizan para producción y la otra seleccionable para prueba. Con esta configuración puede recibir el flujo de hasta siete líneas provenientes de pozos, ya que una de las entradas queda de reserva para reajuste del sello en campo, y para poder tener todos los pozos fluyendo simultáneamente por el cabezal de producción, manteniendo libre la línea de prueba. De esta manera conectada, y usando su sistema de selección y posicionamiento, se puede alinear individualmente cada una de las entradas con la salida de prueba mientras las seis entradas restantes combinan su flujo por la salida de grupo, o mantener las siete entradas conectadas a la línea común de producción, alineando el rotor selector con el puerto ciego^[7].

Algunos de los beneficios directos que se obtienen de la aplicación de la VMP en sustitución del multipuertos convencional son:

1. Facilidad de operación al reducirse la prueba a la manipulación de una sola válvula.
2. Menor impacto ambiental ser una instalación más compacta y al reducirse el número de líneas de tuberías desde los pozos hasta la estación de flujo de 7 a 2 (menor área intervenida).
3. Alta confiabilidad de los datos de prueba obtenidos.
4. Facilidad de automatización.
5. Economía de operación al permitir operaciones desatendidas, automatizadas remotamente, con el consecuente incremento en la seguridad del personal debido a la menor necesidad de conducir hasta las locaciones para realizar las pruebas.

En la figura 2.7, se observa una válvula multipuertos instalada en el campo Mata R, en el fondo de la fotografía se observa el corredor de tuberías y al frente la conexión de descarga de producción.



Figura 2.7 Válvulas multipuertos instaladas en estación de flujo X-8.

- f) **Estación de descarga y de flujo:** es el sitio donde llega la mezcla (gas-líquido) desde el pozo a través de las líneas de flujo, están compuestas por un grupo de instalaciones que facilitan el recibo, la separación, medición, tratamiento, almacenamiento y despacho del petróleo.

La diferencia entre la estación de flujo y descarga reside en una estación de *descarga* se refiere al conjunto de equipos inter-relacionados entre sí para recibir, separar, almacenar temporalmente, tratar y bombear los fluidos provenientes de los pozos ubicados en su vecindad^[6].

Las funciones más importantes de una estación de descarga son:

- Recolectar la producción de los diferentes pozos de una determinada área.
- Separar la fase líquida y gaseosa del fluido multifásico proveniente de los pozos productores a presiones óptimas.

- Permitir que los pozos sean probados individualmente.
- Medir la producción de petróleo, agua y gas de cada pozo productor.
- Proporcionar un sitio de almacenamiento provisional al petróleo.
- Bombear el petróleo al patio de tanques o terminal de almacenaje

La estación de *flujo y recolección de la producción* de los pozos la componen un grupo de instalaciones que facilitan el recibo, la separación, medición, tratamiento, almacenamiento y despacho del petróleo. Es parecida a una estación de descarga, la diferencia es que en la estación de flujo no se realiza tratamiento ni medición del crudo, sino que sirve de punto de recolección y almacenamiento del petróleo antes de ser bombeado a las estaciones de descarga. A las estaciones de flujo llega crudo de los pozos directamente.

Sus funciones más importantes son:

- Recolectar la producción de los diferentes pozos.
- Separar la fase líquida y gaseosa del fluido multifásico proveniente de los pozos productores.
- Medir la producción de petróleo, agua y gas de cada pozo.
- Proporcionar un sitio de almacenamiento provisional al petróleo.

En la figura 2.8, se observa una estación de flujo, en la que se distinguen los múltiples de producción, los separadores de producción y de prueba y al fondo los tanques de almacenamiento de crudo.



Figura 2.8 Estación de flujo ZEF-7.

2.3.3 Tercera etapa: separación de los hidrocarburos

Una vez que el flujo multifásico llega a la estación de descarga o en su defecto a la estación de flujo, el hidrocarburo es sometido al proceso de separación de la fase de líquida (petróleo + agua) y la fase gaseosa; siendo esta última de mayor interés para el trabajo realizado^[6].

La separación física de estas fases es una de las operaciones fundamentales en la producción, procesamiento y tratamiento de las mismas, con el fin de optimizar la comercialización de crudo y gas.

El separador es un recipiente a presión que se usa con el propósito de separar los fluidos provenientes de los pozos en sus componentes gasífero y líquidos. Representa la primera instalación del procesamiento. Los separadores se clasifican por su forma y por los fluidos que separan, por su forma los separadores cilíndricos verticales como se observa en la figura 2.9; cilíndricos horizontales como el que se ve en la figura 2.10, y esféricos. Por los fluidos que separan son de dos fases (gas-

líquido) y de tres fases (crudo-agua-gas) y por la función que cumplen pueden ser separadores de producción general y separadores de prueba.

Funciones que debe cumplir un separador:

- Permitir una primera separación entre el líquido y gas.
- Liberar parte de la fracción gaseosa que pueda permanecer en la fase líquida.
- Descargar, por separado, las fases líquida y gaseosa, para evitar que se puedan volver a mezclar, parcial o totalmente.



Figura 2.9 Separador de producción vertical.



Figura 2.10 Separador de producción horizontal.

2.3.4 Cuarta etapa: compresión del gas separado

Una vez realizada la separación, los gases son enviados a las plantas compresoras, para que el gas cumpla con la presión requerida en la red de transmisión y así ser enviado a la siguiente etapa del proceso. En el caso particular del Distrito

Gas Anaco, se requiere llevar los niveles de baja hasta una presión nominal de 1200 psi. Los gases que se encuentren a esta presión luego de la separación, no cumplen con esta etapa del proceso y son enviados a la red de transmisión directamente^[6].

La estructura de una planta compresora está normalmente formada por una o más unidades compresoras, accionadas cada una de éstas por un motor que mayormente es de combustión interna (diesel, gas) aunque ocasionalmente se les pueden encontrar eléctricos. Generalmente las unidades motocompresoras son instaladas en el interior de edificios especialmente diseñados para proteger las unidades de la acción del medio ambiente y a la vez facilitar las tareas de operación y mantenimiento de las mismas.

Una misma planta compresora puede recibir simultáneamente corrientes de gas a diferentes presiones. Luego de ser medidas, las corrientes son depuradas, pasando a los respectivos cabezales de succión donde son distribuidas hacia las distintas unidades. El gas comprimido que abandona los cilindros compresores es enviado hacia los enfriadores respectivos de cada unidad, donde el gas enfriado pasa al cabezal de descarga respectivo.

Una vez alcanzada la presión deseada, abandona la planta uniéndose a la línea de flujo de alta presión hacia la planta de extracción. Antes de salir la corriente de flujo de gas es enfriada y pasa a través de un separador vertical para eliminarle la cantidad de hidrocarburo líquido que pueda existir.

Uno de los compresores que conforman las plantas de compresión del Distrito Gas Anaco se muestra en la Figura 2.11



Figura 2.11 Compresor centrífugo, perteneciente a la planta compresora Zapato.

2.3.5 Quinta etapa: acondicionamiento del gas (endulzamiento y deshidratación)

Esta etapa está asociada al tratamiento del gas natural para prepararlo para la venta, en el caso de El Distrito Gas Anaco, este proceso es realizado en la planta de Extracción San Joaquín, y aunque para el proyecto realizado no tiene mayor relevancia resulta importante mencionarlo ya que es parte importante del proceso de producción del gas natural, o por lo menos realizar una descripción breve de lo que se trata dicha etapa. Para llevar a cabo el acondicionamiento del gas se llevan a cabo tres procesos:

➤ **Endulzamiento del gas natural:**

Esta etapa tiene como objetivo principal la remoción de los componentes ácidos del gas natural, que causan serios problemas de corrosión en los equipos y tuberías, tales como el Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) y el Dióxido de Carbono (CO_2).

➤ **Deshidratación del gas natural:**

La presencia de vapor de agua en el gas natural puede causar problemas en la transmisión por tuberías debido a la formación de hidratos generados por el agua y compuestos de bajo peso molecular presentes en el gas, por ejemplo hidrocarburos livianos y/o gases ácidos (H_2S y CO_2) bajo condiciones de baja temperatura, alta presión, gas con agua libre o cerca del punto de rocío, alta velocidad, etc.

➤ **Segregación de corrientes:**

El gas natural proveniente de los pozos de baja presión (500 y 60 psig) posee mayor riqueza, entendiendo por riqueza como el alto contenido de líquidos condensables. Estos líquidos son los llamados Líquidos del Gas Natural (LGN) que poseen un alto valor comercial tanto nacional como internacionalmente. Las diferentes corrientes de gas natural se seleccionan de acuerdo a su riqueza y se direccionan hacia las plantas de extracción o hacia el sistema de transmisión.

2.3.6 Sexta etapa: procesamiento (extracción y fraccionamiento)

En el proceso de extracción se obtienen dos productos a la salida del mismo, uno es el gas metano o gas seco llamado gas directo que se transmite por tubería y se utiliza como combustible en cocinas y calentadores de agua en los hogares o como combustible en las plantas termoeléctricas para generar electricidad, etc.

El otro producto son los Líquidos del Gas Natural (LGN) que es una mezcla de propano, butano, pentano y componentes más pesados que se envían a la planta de fraccionamiento para su separación, también se conocen como C_3^+ . El propano (C_3) también llamado Gas Licuado del Petróleo (GLP), mezcla de gran cantidad de propano y algo de butano, conocido también como gas de bombona.

2.4 Flujo multifásico

El flujo multifásico (bifásico), es el movimiento de gas libre y de líquido, el gas puede estar mezclado en forma homogénea con el líquido o formando un oleaje donde el gas empuja al líquido desde atrás o encima de él, provocando en algunos casos crestas en la superficie del líquido, puede darse el caso en el cual el líquido y el gas se mueven en forma paralela, a la misma velocidad y sin perturbación relevante sobre la superficie de la interfase gas-líquido. Cuando el fluido se desplaza desde el yacimiento hacia la superficie, se libera energía tanto en el flujo vertical como en el horizontal, esta energía la posee el fluido durante su permanencia en el yacimiento, por lo tanto, para utilizarla al máximo se requiere realizar un buen diseño de los equipos del pozo, línea de flujo, estranguladores, separadores y de otras conexiones^[8]. Su clasificación depende de la orientación que tenga la tubería así como también de parámetros como la geometría de dicha tubería y las propiedades físicas de los fluidos involucrados en el transporte (densidad, viscosidad, tensión superficial) como también de las condiciones de flujo, velocidad, temperatura y presión, y la orientación de las tuberías tal como puede observarse en la figura 2.12:

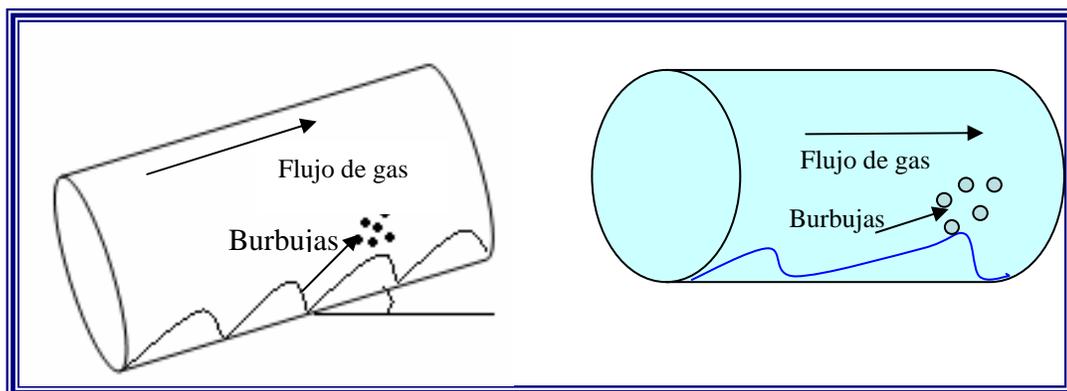


Figura 2.12 Orientación de las tuberías en el transporte de flujo bifásico gas – líquido.

En el diseño de los sistemas de dos fases, el problema principal es predecir la relación entre el diámetro de la tubería y la longitud de ésta; las propiedades del fluido, la tasa de flujo y la caída de presión. Además las propiedades del flujo bifásico dependen de la inclinación de la tubería en la cual es transportado el fluido.

2.4.1 Velocidad superficial de la mezcla

Por lo general la distribución de los fluidos en la tubería es desconocido, por lo cual la velocidad de los fluidos se convierte en una variable difícil de obtener. Para una manera más sencilla de estudiar la distribución de estos es calculando la velocidad superficial por medio de los datos de entrada a la tubería^[8].

La velocidad superficial de una fase del fluido, se define como la velocidad que llevaría el fluido como si fuese una sola fase que circula en la sección transversal de la tubería.

La velocidad superficial de la fase gaseosa viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_{sg} = \frac{q_g}{A} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

donde:

V_{sg} : velocidad superficial de la fase gaseosa.(pie/s).

q_g : tasa de flujo de gas (pie³/s).

A : área transversal de la tubería (pie²).

Velocidad real del gas (vg):

$$v_g = \frac{qg}{A \cdot Rg} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

donde:

Rg : fracción de líquido (adimensional).

Velocidad superficial del líquido (v_{sl}):

$$v_{sl} = \frac{qL}{A} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

donde:

qL : taza de flujo líquido

Velocidad real del líquido (v_l):

$$v_l = \frac{qL}{A \cdot RL} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

La velocidad de la mezcla (flujo volumétrico total) es simplemente la suma de las velocidades superficiales de los flujos de los fluidos que fluyen en la tubería como se muestra en la ecuación 2.2.

$$V_m = V_{sg} + V_{sl} = \frac{qg + qL}{A} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

donde:

V_m : velocidad de la mezcla bifásica.

V_{sl} : velocidad superficial de la fase líquida.

2.4.2 Propiedades de la mezcla

La mezcla bifásica gas-líquido presenta características particulares y para predecir su patrón de flujo es necesario estimarlas tomando en cuenta las características de las fases por separado y la fracción volumétrica de cada una de ellas, entonces se puede estimar la densidad y viscosidad de la mezcla bifásica de la siguiente manera^[8]:

$$\rho_m = E_L \rho_L + E_G \rho_G \quad (\text{Ec. 2.6})$$

$$\mu_m = E_L \mu_L + E_G \mu_G \quad (\text{Ec. 2.7})$$

donde:

ρ_m : densidad de la mezcla bifásica.

E_L : fracción volumétrica de líquido.

ρ_L : densidad de líquido.

E_G : fracción volumétrica de gas.

ρ_G : densidad de gas

μ_m : viscosidad de la mezcla bifásica.

μ_L : viscosidad del líquido.

μ_G : viscosidad del gas.

2.5 Clasificación de régimen de flujo de acuerdo a la continuidad de las fases

Los factores principales que influyen en el patrón de flujo en una tubería de flujo multifásico (bifásico), son la velocidad de gas y de líquido como se muestra en la figura 2.13^[9].

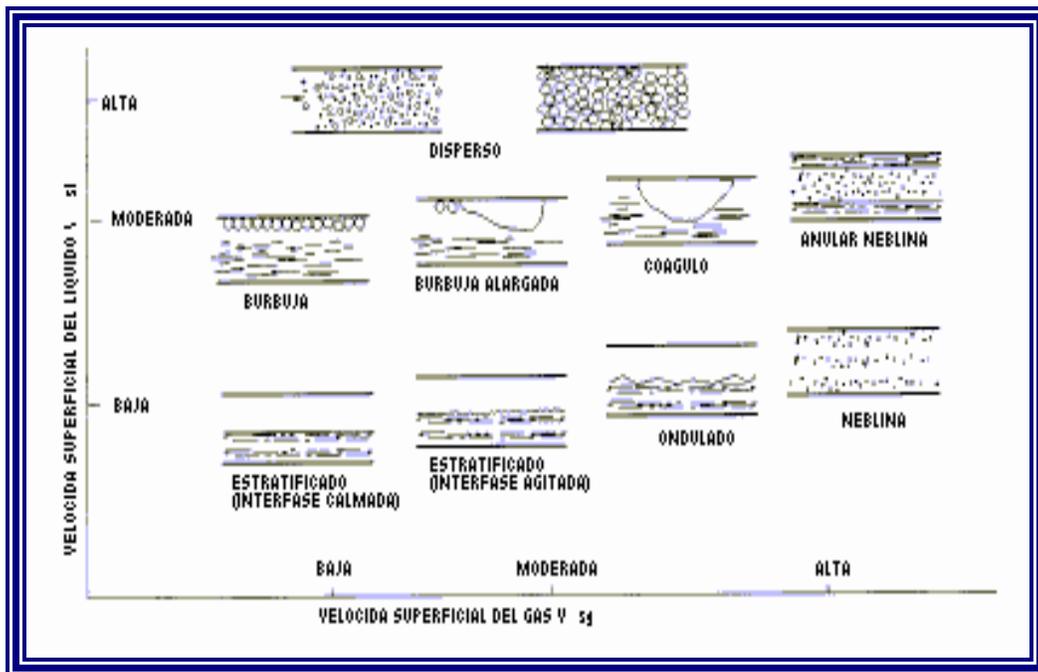


Figura 2.13 Patrones de flujo respecto a las velocidades del gas y líquido.

Otros de los factores importantes y que no pueden pasarse por alto son:

- Condiciones o variables de operación, tales como la presión y el caudal de cada uno de los fluidos.
- Diámetro de la tubería y accesorios.
- Dirección del flujo (ascendente, descendente u horizontal) y orientación de la tubería (horizontal, vertical o inclinada).

Los patrones de flujo son ampliamente clasificados de acuerdo a la continuidad de las fases. Los tres tipos comúnmente identificados son los que se muestran en la figura 2.14

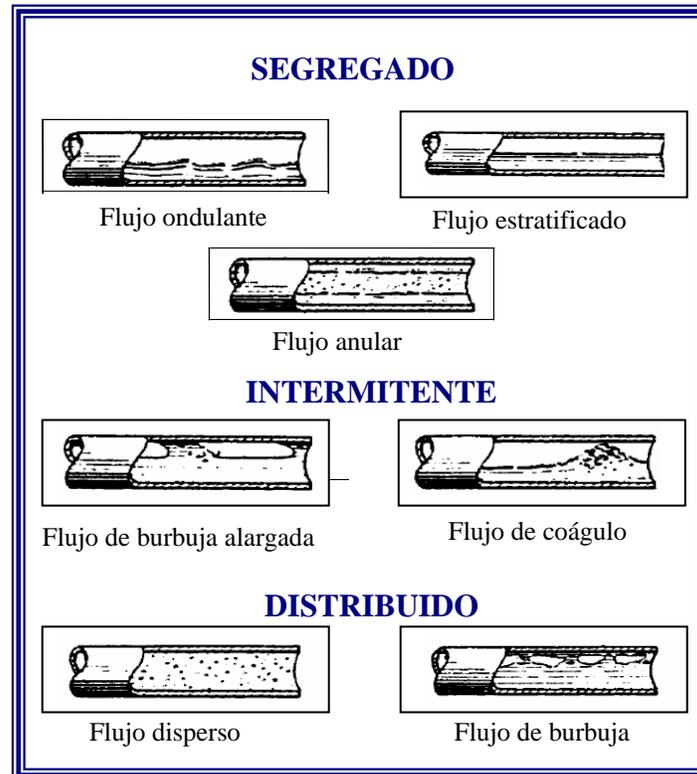


Figura 2.14 Regímenes de flujo para tubería horizontal.

2.5.1 Régimen de flujo segregado

Está caracterizado, por la continuidad en dirección axial de las dos fases. Los regímenes de flujo estratificado, en forma de onda y anular son ejemplos de este tipo de flujo.

2.5.1.1 Flujo estratificado

A baja velocidad del líquido y muy baja velocidad del gas, ocurre una completa estratificación de los fluidos ocupando el gas la porción superior de la tubería sobre una interfase calmada de gas y líquido.

Este tipo de patrón de flujo es el más dominante en el transporte de flujo bifásico en tuberías horizontales o tuberías cerca de la horizontalidad. Este es caracterizado por la clara separación entre la fase líquida y la fase gaseosa, este fenómeno puede verse en la figura 2.15.

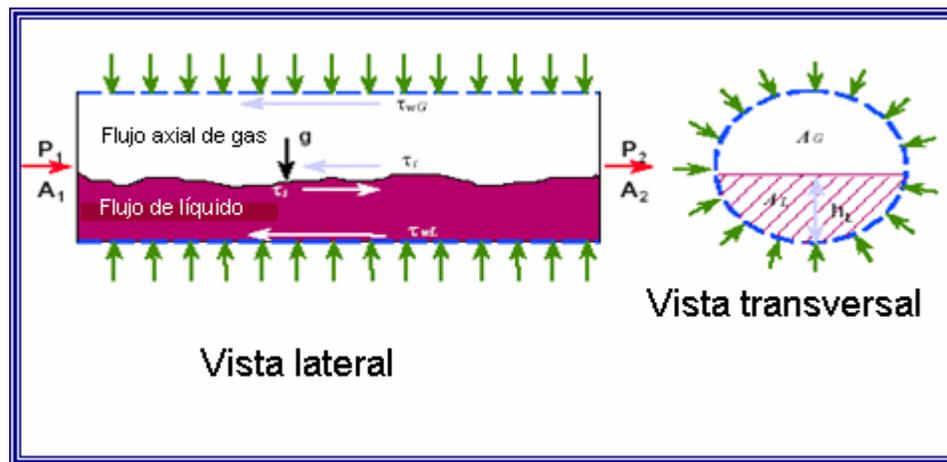


Figura 2.15 Patrón de flujo estratificado.

Como puede observarse en la figura la fase líquida ocupa un espacio considerable dentro de la tubería, la profundidad de la fase líquida dentro de la tubería es un parámetro importante para la estimación del patrón de flujo.^[10]

2.5.1.2 Flujo ondulante

Una mayor proporción de flujo de gas ocasiona que la velocidad de éste sea mayor que la velocidad del líquido, originando ondas en la superficie del líquido. La amplitud de la onda incrementa al hacerse mayor la proporción de gas (figura 2.16) [9].



Figura 2.16 Flujo ondulante.

2.5.1.3 Flujo anular

El flujo anular es uno de los patrones de flujo dominantes (figura 2.17) para tuberías horizontales y cercanas a la horizontalidad al igual que el flujo estratificado, en este tipo de patrón la cantidad de líquido es expulsada por medio de la gravedad y de la fuerza ejercida por la fase gaseosa hacia las paredes de la tubería formando de esta manera una especie de capa que cubre al flujo del gas, observándose una especie de anillo líquido a lo largo del flujo del gas, esto puede verse en la figura 2.17^[9].

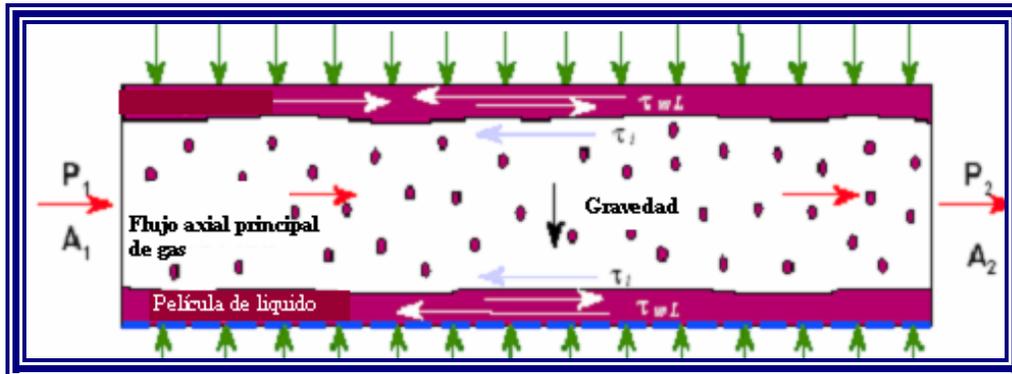


Figura 2.17 Patrón de flujo anular^[10].

A proporciones y velocidades altas de gas, el líquido fluye como una película anular a lo largo de las paredes, mientras que el gas fluye como un núcleo de alta velocidad en el centro de la tubería. Este núcleo de vapor transporta algunas gotas del líquido porque el gas desprende parte del líquido de la película.

2.5.2 Régimen de flujo intermitente

Cada una de las fases es discontinua, como el flujo de coágulo o slug y burbuja alargada ó plug (tapón).

El flujo intermitente es caracterizado por flujo alternado de líquido y gas. En este tipo de patrón los fluidos no son distribuidos uniformemente en la dirección axial, un tapón o de líquido, el cual llena la tubería, es separado por zonas de gas, las que se superponen a la capa de líquido estratificado que circula a lo largo del fondo de la tubería. Este tipo régimen de flujo es peligroso para equipos de separación que requieren que existan las dos fases en un momento determinado, ya que este se caracteriza por estar formado por paquetes intermitentes de fase gaseosa y fase líquida como se muestra en la figura 2.18^[10].

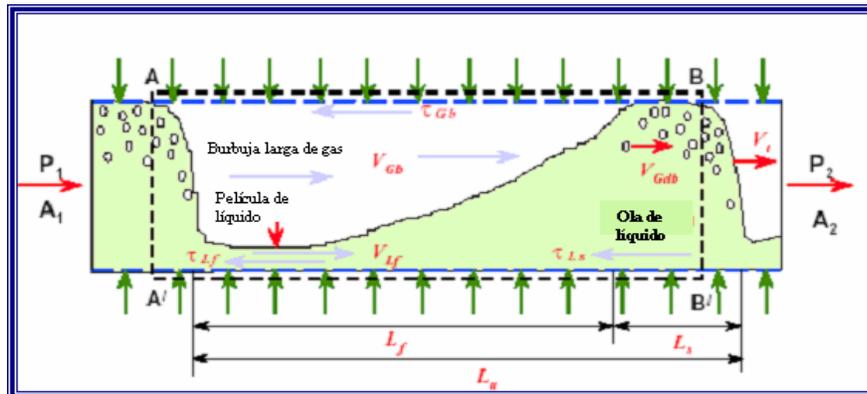


Figura 2.18 Régimen de flujo intermitente^[10].

2.5.2.1 Flujo de coágulo, tapón o slug

Cuando se presentan proporciones intermedias tanto del líquido como del gas, las burbujas alargadas de extremos redondeados se alargan, ocupan una porción mayor de la sección transversal de la tubería y sufren más distorsión. En el patrón de coágulo el gas viaja a una proporción notablemente mayor que el líquido como se muestra en la figura 2.19.

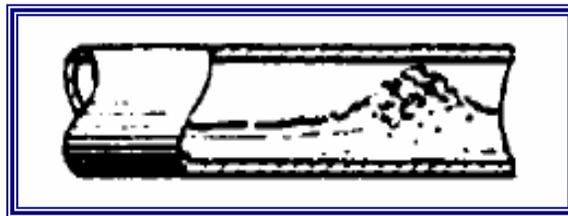


Figura 2.19 Flujo de coágulo.

- El flujo ascendente, en tuberías ligeramente inclinadas, alcanzará las características de flujo de coágulo a proporciones menores de gas que en las tuberías horizontales. Esto se debe a un incremento del diferencial de

velocidad entre las fases causado por un incremento de la resistencia del líquido.

- La velocidad del líquido, en el flujo ligeramente descendente, es incrementada por los efectos gravitacionales y no se alcanza fácilmente el flujo de coágulo ni siquiera aumentando la proporción de gas. Cuando la velocidad de flujo es bastante alta se favorece una rápida transición al flujo anular.

La estructura del patrón de flujo tipo slug, consiste en una región de líquido con gas atrapado como se observa en la figura 2.20, donde el cuerpo del slug de líquido, esta conformado por burbujas de gas y una película de líquido.

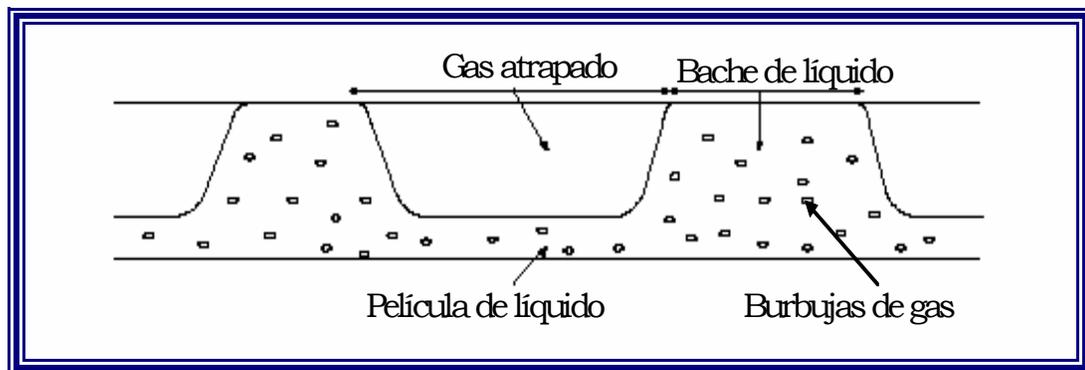


Figura 2.20 Flujo slug en tuberías horizontales.

2.5.2.2 Flujo de burbuja alargada

La transición del flujo tipo burbuja al flujo tipo burbuja alargada está marcada por cambio de régimen distribuido a régimen intermitente, el caudal volumétrico del gas se mantiene pero el del líquido disminuye^[9].

A velocidades modestas del gas estas burbujas se aglomeran y forman el equivalente distorsionado de una burbuja uniformemente cilíndrica. Como se muestra en la figura 2.21

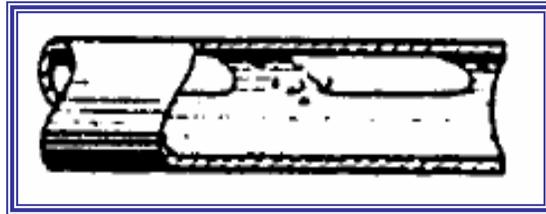


Figura 2.21 Flujo de burbuja alargada.

En el flujo orientado ligeramente hacia arriba, la resistencia del líquido se incrementa y el patrón de flujo se desplaza hacia el flujo estratificado.

El flujo orientado ligeramente hacia abajo reduce la resistencia del líquido ya que el efecto gravitacional acelera la fase líquida por ello el patrón de flujo tiende a favorecer al flujo disperso.

2.5.3 Régimen de flujo distribuido

Una de las fases es continua y la otra discontinua, como el flujo tipo burbuja (la fase líquida es continua) y el flujo neblina (gas continuo). Este tipo de flujo semeja a un flujo homogéneo.

2.5.3.1 Flujo tipo burbuja

En éste tipo de flujo, las burbujas de gas se desplazan por la parte superior de la tubería a la misma velocidad que el líquido. Como se ve en la figura 2.22

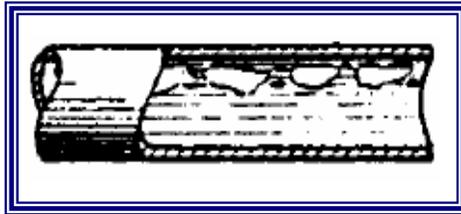


Figura 2.22 Flujo tipo burbuja.

2.5.3.2 Flujo tipo neblina o disperso

Cuando en el flujo anular la velocidad del gas llega a ser suficientemente alta, la película del líquido se desprende de las paredes y es transportado como pequeñas gotas por el gas. Este régimen se conoce como neblina anular o como régimen de flujos de neblina si el líquido se encuentra totalmente disperso como pequeñas gotas en la fase del gas que se mueve a alta velocidad. En este tipo de régimen de flujo, las burbujas del gas están casi uniformemente distribuidas por todo el líquido. El perfil de concentración de burbujas es un tanto asimétrico, llegando al máximo cerca del tope de la tubería. Las fases de vapor y de líquido tienen igual velocidad de flujo como se muestra en la figura 2.23.

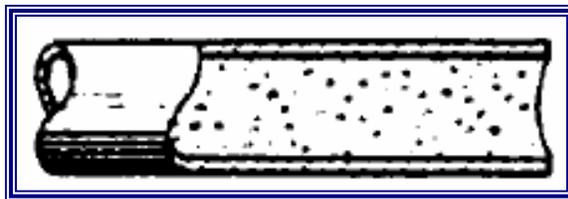


Figura 2.23 Flujo disperso.

2.6 Formaciones de líquido en los flujos gaseosos en tuberías

El volumen del bache de líquido es algo difícil de cuantificar, debido en parte a que corresponde a los siguientes posibles mecanismos de formación:

- Por formación de olas en las interfaces gas-líquido para un patrón de flujo estratificado.
- Por efectos del perfil y topografía del terreno. El líquido se acumula en los puntos bajos de las tuberías y se forman bolsas de gas. La presión de estas bolsas de gas se incrementa hasta empujar el líquido acumulado. La figura 2.24 muestra un perfil topográfico, este mecanismo tiene alta probabilidad de ocurrencia. En la figura 2.25 se puede observar la representación gráfica de la formación de baches de líquidos a lo largo de una tubería con pendientes.
- Variación en el flujo de entrada. Cuando el caudal del flujo de entrada se incrementa, el inventario de líquido dentro de la tubería disminuye y el exceso de líquido forma baches o una serie de baches de líquidos.
- Corrida de herramientas. Finalmente estas pueden ocasionar una gran cantidad de baches de líquidos tanto como el volumen de líquido acumulado en la tubería.

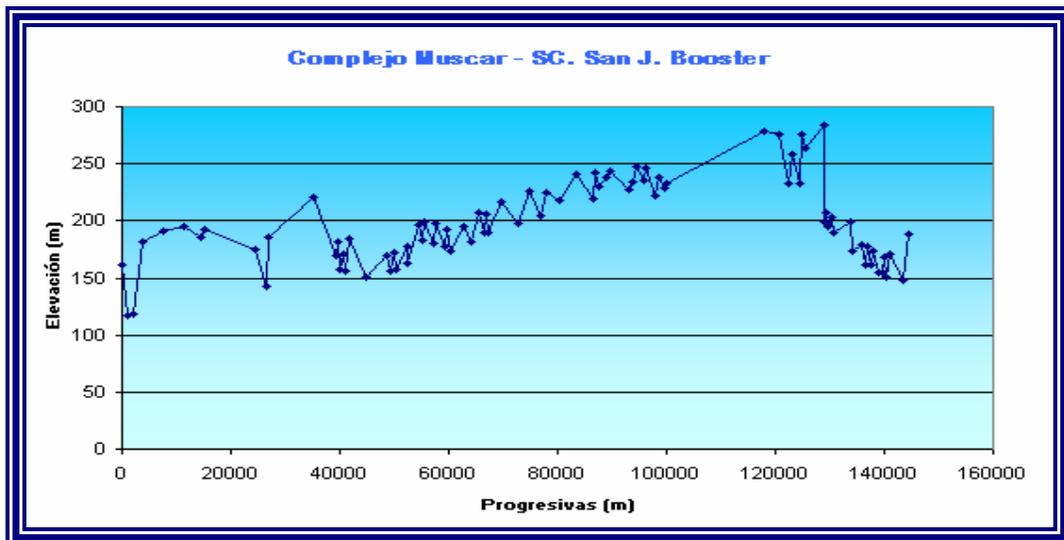


Figura 2.24 Perfil topográfico gasoductos entre Complejo Muscar y San Joaquín Booster emitido por el simulador Pipephase.

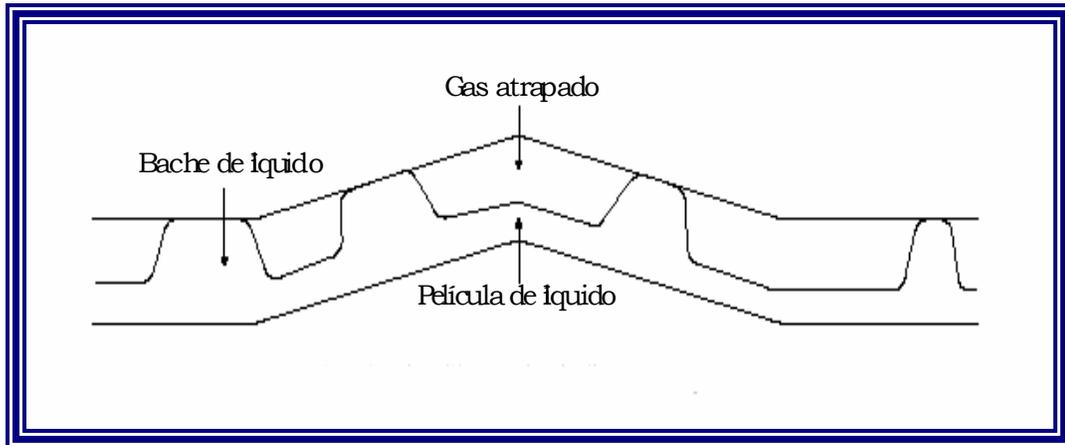


Figura 2.25 Formación de baches de líquidos a lo largo de una tubería con pendientes.

2.6.1 Fracción de líquido en el situ (Liquid Hold up)

$$R_L = H_L = \frac{\text{Volumen del líquido en un segmento de tubería}}{\text{Volumen del segmento de tubería}} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

El RL es una fracción que varía entre 0 y 1, correspondiente a los casos de puro gas y puro líquido, respectivamente, el método más común de medir la fracción de líquido es aislar un segmento de la corriente de flujo entre las válvulas de cierre rápido y medir físicamente el líquido atrapado como se muestra en la figura 2.9. El remanente del segmento de tubería es por supuesto ocupado por gas, el cual es referido como una fracción de gas (R_G), que puede expresarse con la ecuación 2.6^[8].

$$R_G = H_G = (1 - R_L) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde:

R_G : fracción de gas in situ

R_L : fracción de líquido in situ.

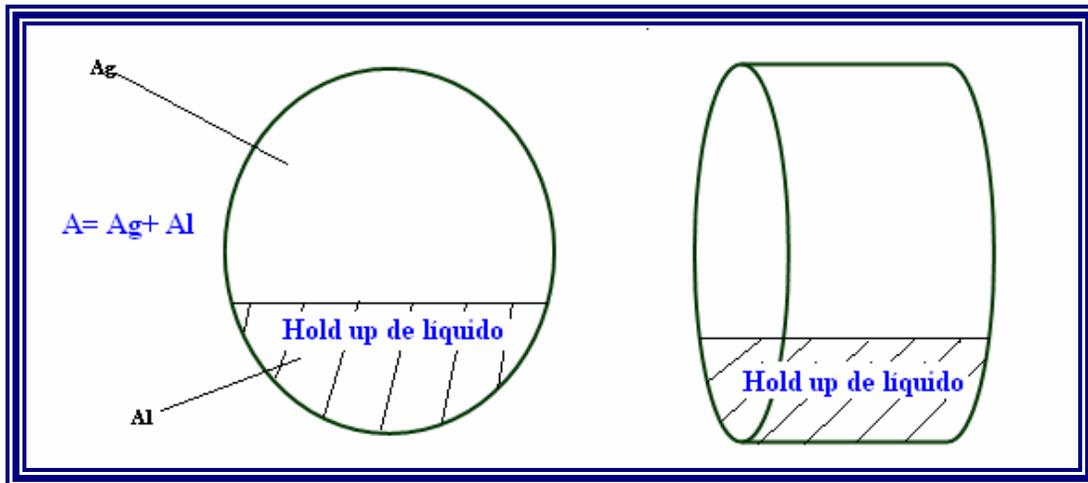


Figura 2.26 Hold up del slug de líquido.

2.6.2 Fracción de líquido sin deslizamiento λ_L (no-slip liquid hold up)

Es lo mismo que la fracción de líquido definida anteriormente, pero asumiendo que el gas y el líquido viajan a la misma velocidad^[10].

$$\lambda L = \frac{qL}{qL + qg} = \frac{v_{sl}}{v_{sl} + v_{sg}} = \frac{v_{sl}}{v_m} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Siendo la fracción de gas sin deslizamiento (no slip gas hold up), representada por la siguiente ecuación:

$$\lambda g = \frac{qg}{qL + qg} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

donde:

λL : fracción de líquido sin deslizamiento (adimensional).

qL: caudal de líquido a la entrada (BPD, barriles por día).

qg: caudal de gas a la entrada(BPD).

vsl: velocidad superficial del líquido (pie/s)

vsg: velocidad superficial del gas (pie/s).

vm: velocidad superficial bifásica (pie/s).

2.7 Velocidad de erosión

Se puede definir como la máxima velocidad hasta donde se puede permitir una erosión aceptable o aquella por encima de la cual el desgaste del material es exagerado. Las líneas de flujo, múltiples de producción y otras líneas de transporte de flujo bifásico (gas-líquido) deben ser diseñadas primeramente basándose en la velocidad del flujo. Experiencias operacionales han demostrado que la pérdida de espesor de las paredes de las tuberías se debe a procesos de erosión y corrosión. Estos procesos son acelerados por velocidades altas del fluido, presencia de arena, contaminantes corrosivos tales como: CO₂ y H₂S.

Una manera de establecer la velocidad erosional, cuando no se cuenta con información suficiente de las propiedades del fluido es mediante la aplicación de la siguiente formula empírica:

$$Ve = \frac{c}{\sqrt{\rho_m}} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde:

Ve : velocidad erosional del fluido (pie/s)

c : constante empírica

ρ_m : densidad de la mezcla a las condiciones de presión y temperatura del fluido (lb/pie³).

A nivel industrial se utiliza un valor de “c” igual a 100 para fluidos libre de sólidos y tuberías en servicio continuo, determinándose la velocidad máxima de diseño, y de 125 para servicio intermitente y de 160 para el cálculo de la velocidad límite de erosión o velocidad real. Para fluidos libres de sólidos donde la corrosión no es prevista o cuando es controlada por inhibidores ó mezclas resistentes, valores de c iguales a 150 a 200 pueden ser usados en tuberías en servicio continuo, valores mayores a 250 deben ser usados para servicio intermitente^[9].

2.8 Ecuación de energía

En general para obtener la caída de presión entre dos puntos de una tubería es necesario realizar un balance de energía en el flujo de fluidos a través de dichos puntos, aplicando la ley de la conservación de la energía: “La energía del fluido que entra a cualquier sección del sistema mas cualquier trabajo adicional realizado sobre el flujo menos cualquier pérdida de energía, es igual a la energía del fluido que sale de dicha sección”, en la figura 2.27 se presenta las fuerza que ejercen un influencia en la caída de presión de un fluido en una tubería^[13].

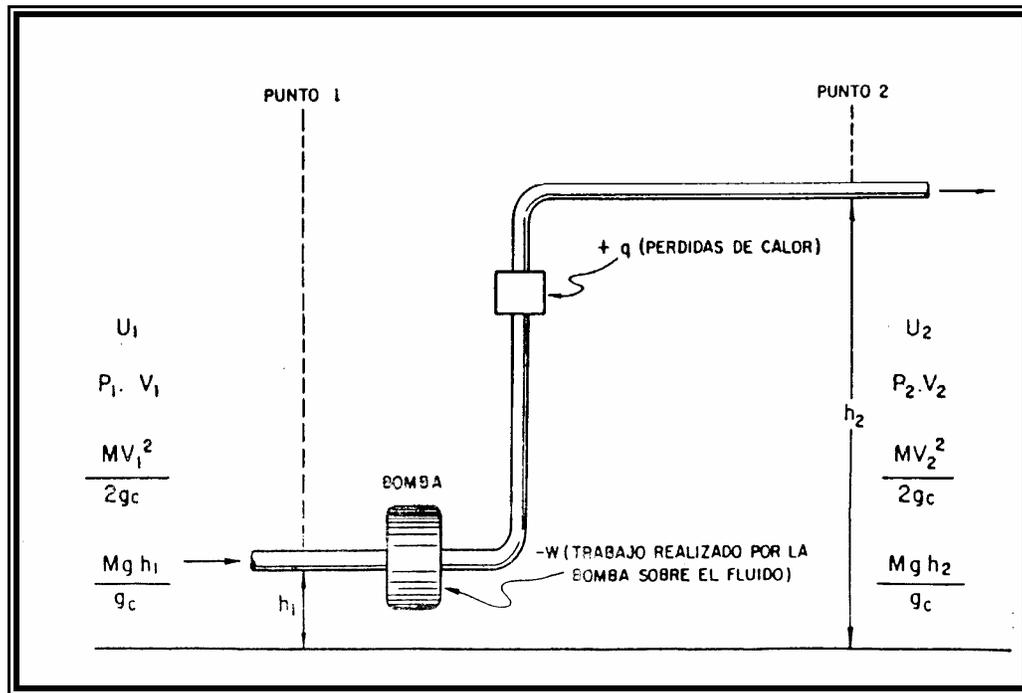


Figura 2.27. Representación gráfica del balance de energía^[13].

Se tiene como resultado la ecuación general de la energía:

$$U_1 + \frac{m \cdot v_1^2}{2 \cdot g_c} + \frac{m \cdot g \cdot h_1}{g_c} + P_1 \cdot V_1 + q - w = U_2 + \frac{m \cdot v_2^2}{2 \cdot g_c} + \frac{m \cdot g \cdot h_2}{g_c} + P_2 \cdot V_2 \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde

m : masa del volumen de fluido considerado (lb).

v : velocidad del fluido (pie/seg).

g_c : factor de conversión (32.174 lbf pie / lbf s²).

g : aceleración de la gravedad (321.52 pie /s²).

h : elevación desde un plano de referencia (pie).

P : presión absoluta (psia).

V : volumen del fluido donde se aplica el balance (pie³).

Las unidades de los términos a continuación dependerán de las conversiones adecuadas a ser utilizadas:

U : energía interna del fluido.

$\frac{m \cdot v^2}{2 \cdot gc}$: energía cinética .

$\frac{m \cdot g \cdot h}{gc}$: energía potencia.

$P \cdot V$: energía de compresión o expansión.

q : energía calórica adicionada o cedida por el fluido.

w : trabajo echo por o sobre el fluido (trabajo de eje).

El teorema de Bernoulli es una derivación matemática basada en la Ley de la conservación de la energía, aplicada al flujo de fluidos en una tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad, es decir^[13] .:

$$H = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

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

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

La pérdida por rozamiento en la tubería desde el punto uno al punto dos (h_L) se expresa como la pérdida de altura en metros de fluido (pies de fluido). La ecuación puede escribirse de la siguiente manera^[13] .:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + hL \quad (\text{Ec. 2.15})$$

donde:

z : elevación potencial (m).

P : presión manométrica (Pa).

g : aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2).

ρ : densidad del fluido (kg/m^3).

Todas las fórmulas prácticas para el flujo de fluidos se derivan del Teorema de Bernoulli, con modificaciones para tener en cuenta las pérdidas debidas al rozamiento^[13].

2.9 Gradiente total de caída de presión

El gradiente de presión en cualquier punto en una tubería está compuesto por: Los efectos de la aceleración, los efectos de la posición y los efectos debidos a la

fricción. Dependiendo del sistema en estudio, el ingeniero juzga la importancia de la contribución de estos efectos y puede despreciar los términos de menor peso^[9].

$$\left(\frac{dP}{dL}\right)_{Total} = \left(\frac{dP}{dL}\right)_{Aceleración} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{Posición} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{Fricción} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

donde:

L : longitud de la tubería (pie).

P : presión (Pa).

2.9.1 Efectos de la aceleración sobre la caída de presión ΔP

Es importante mencionar, que para cualquier fluido fluyendo en estado estacionario en tuberías o conductos de sección transversal invariable, el producto ρv es constante. Los cambios en la densidad del fluido (ρ en lb/pie³) debido a los efectos de la temperatura y/o la presión se compensan por ajustes en la velocidad (v en pie/s)^[13].

$$\left(\frac{dP}{dL}\right)_{Aceleración} = \left(\rho v \frac{dv}{dL}\right) \quad (\text{Ec. 2.17})$$

La experiencia ha demostrado que para fluidos compresibles los efectos de la aceleración se pueden despreciar sí:

$$v < 200 \text{ pie/s} \text{ y } \Delta P \leq 10\% \text{ de la presión conocida.}$$

2.9.2 Efectos de la posición sobre la caída de presión ΔP

La elevación o inclinación de la tubería con respecto al plano horizontal produce cambios en la presión por influencia gravitatoria.

$$\left(\frac{dP}{dL}\right)_{\text{Posición}} = \frac{g}{gc} \rho \text{sen } \alpha \quad (\text{Ec. 2.18})$$

donde:

α : ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal.

g : aceleración de la gravedad ($321,52 \text{ pie}^3/\text{s}^2$).

gc : factor de conversión ($32,174 \text{ lbf} \cdot \text{pie}^3 / \text{lbf} \cdot \text{s}^2$).

Para fluidos con densidad constante la ecuación anterior se puede integrar para obtener:

$$(\Delta P)_{\text{Posición}} = Ce \cdot \rho \cdot L_i \cdot \text{sen } \alpha \quad (\text{Ec. 2.19})$$

donde:

L_i : longitud de la sección inclinada de la tubería (pie)

ρ : densidad del líquido, valor constante ó promedio para fluidos compresibles (lb/pie³)

Ce : Factor de conversión, escogido de la Tabla 2.2, de acuerdo a las unidades específicas

Tabla 2.1: Factor de conversión de presión con respecto a la densidad^[9].

Densidad, ρ	Longitud de la sección inclinada, Li	Caída de presión, ΔP	Factor de conversión, Ce
lbm/pie ³	pie	psi	6,24 x 10 ⁻³
lbm/pie ³	pie	kg/cm ²	4,88 x 10 ⁻⁴
kg/m ³	m	psi	1,42 x 10 ⁻⁴
kg/m ³	m	kg/cm ²	1,00 x 10 ⁻⁴

2.9.3 Efectos debido a la fricción sobre la caída de presión ΔP

El flujo en tuberías siempre está acompañado por la fricción de las partículas del fluido con las paredes de la tubería ocasionando una pérdida de energía, esta energía se traduce en una caída de presión en la dirección del flujo. Es evidente entonces, la importancia que tiene el poder expresar la pérdida de presión debida a la fricción (h_L) mediante una fórmula sencilla, válida para cualquier fluido o régimen de flujo. Esta ecuación general se conoce universalmente como la fórmula de Darcy ó Moody^[13]:

$$h_L = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot D \cdot g} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Esta ecuación puede escribirse para obtener la pérdida de presión en newton por m² (pascal) sustituyendo las unidades correspondientes de la manera siguiente:

$$(\Delta P)_{\text{Fricción}} = \frac{\rho \cdot f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot D} \quad (\text{ya que } \Delta P = h_L \cdot \rho \cdot g) \quad (\text{Ec. 2.21})$$

donde:

f: factor de fricción (adimensional).

D: diámetro interno de la tubería (m).

2.9.4 Pérdida de presión debido a válvulas y accesorios

Cuando un fluido se desplaza uniformemente por una tubería larga, recta y de diámetro constante, la configuración de flujo indicada por la distribución de la velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica. Cualquier obstáculo en la tubería cambia la dirección de la corriente en forma total o parcial, altera la configuración característica de flujo y ocasiona turbulencia.

La pérdida de presión total producida por una válvula (o accesorio) consiste en:

- Pérdida de presión dentro de la válvula.
- La pérdida de presión en la tubería de entrada es mayor de la que se produce normalmente si no existe válvula en la línea. Este efecto es pequeño.
- La pérdida de presión en la tubería de salida es superior a la que se produce normalmente si no hubiera válvula en la línea. Este efecto puede ser muy grande^[13].

2.10 Correlaciones de flujo multifásico en tuberías

2.10.1 Flujo multifásico en tuberías verticales

Las correlaciones realizadas mediante técnicas de laboratorio y/o datos de campo poseen sus limitaciones al ser aplicadas en condiciones diferentes a la de su deducción. Los factores más importantes tomados en cuenta son: el cálculo de la densidad de la mezcla, el factor de entrapamiento de líquido (hold up), regímenes de flujo, factor de fricción, entre otros.^[8]

A continuación se hará una breve descripción de las correlaciones más usuales para el análisis de flujo multifásico en tubería vertical.

2.10.1.1 Hagedon y Brown

Realizaron dos trabajos en 1964. Siendo el primero de ellos un estudio que relacionó el efecto de la viscosidad en una tubería de 1¼" de diámetro y 1500 pies de longitud para ello utilizaron cuatro fluidos de diferentes viscosidades, cada uno de los cuales se probó para diferentes tuberías y relaciones gas-líquido. Concluyeron que para valores de viscosidad líquida menores que doce centipoises, la misma tiene poco efecto sobre los gradientes de presión en flujo vertical bifásico. El segundo trabajo fue una ampliación del primero en una tubería de 1" y 1½" de diámetro; el aporte importante fue la inclusión del factor de presión en flujo vertical bifásico. El segundo trabajo fue una ampliación del primero en una tubería de 1" y 1½" de diámetro; el aporte importante fue la inclusión del factor de entrapamiento.

2.10.1.2 Gray

La correlación fue desarrollada por "H. E Gray" de la compañía petrolera "Shell", para fases de gas, predominantemente para sistemas de gas y condensado en flujo multifásico vertical. Gray considero una fase simple, asumiendo que el agua o condensado van adheridos en las paredes de la tubería en forma de gotas. La correlación es aplicada para casos en los que se considera que las velocidades para flujo vertical estén por debajo de 50 pies/s, que el tamaño de la tubería de producción sea menor de 3½ pulg. y que las relaciones de condensado y agua estén por debajo de 50 bls/MMPCN y 5 bls/MMPCN, respectivamente.

2.10.1.3 Gilbert (1954)

Fue el primer investigador en presentar curvas de recorrido de presión para uso práctico. Su trabajo consistió en tomar medidas de caídas de presión en el reductor; el método lo trabajó para bajas tasas de producción y utilizó en el mismo el término de "longitud equivalente" para el cálculo de la presión de fondo fluyente.

2.10.1.4 Duns & Ros (1963)

Observaron la influencia de los patrones de flujo en el comportamiento del mismo, desarrollando una correlación para la velocidad de deslizamiento de las fases. Presentaron además relaciones para hallar la densidad de la mezcla y factor de fricción de acuerdo al régimen de flujo existente.

2.10.1.5 Orkiszewsky (1967)

El autor considera deslizamiento entre las fases y que existen cuatro regímenes de flujo, (burbuja, tapón, transición y neblina). Presentó un método para el cálculo de

caídas de presión en tuberías verticales. La precisión del método fue verificada cuando sus valores predecidos fueron comparados con 148 caídas de presión medidas. Una característica diferente en este método es que el factor de entrapamiento es derivado de fenómenos físicos observados.

2.10.1.6 Beggs & Brill (1973)

Corrieron pruebas de laboratorio usando mezcla de aire y agua fluyendo en tuberías acrílicas de 90 pies de longitud y de 1 a 1.5 pulgadas de diámetro interior. Para un total de 27 pruebas en flujo vertical, se obtuvo un error porcentual promedio de 1.43 % y una desviación standard de 6.45 %, desarrollando un esquema similar al de flujo multifásico horizontal.

2.10.2 Flujo multifásico en tuberías horizontales

Desde hace más de 30 años, varios autores han intentado hallar correlaciones que permitan predecir las caídas de presión que se producen en el caso de flujo bifásico en conductos cerrados. Las caídas de presión en flujo bifásico son bastantes diferentes de las que ocurren en flujo de una sola fase; esto se debe a que generalmente existe una interfase y el gas se desliza en el líquido, separadas ambas por una interfase que puede ser lisa o irregular dependiendo del régimen de flujo existente y las caídas de presión pueden llegar a ser de 5 a 10 veces mayores, que las ocurridas en flujo monofásico. Entre las correlaciones de flujo multifásico horizontal, que cubren todos los rangos de tasas de producción y tamaño de tubería se tienen las siguientes:

2.10.2.1 Beggs & Brill (1973)

Es una de las ecuaciones mas utilizadas y cubre varios rangos de tasas y diámetros internos de la tubería. Desarrollaron un esquema para caídas de presión en tuberías inclinadas y horizontales para flujo multifásico. Establecieron ecuaciones según los regímenes de flujo segregado, intermitente y distribuido para el cálculo del factor de entrapamiento líquido y definieron el factor de fricción bifásico independientemente de los regímenes de flujo.

2.10.2.2 Beggs & Brill revisada

En la misma se mejoraron los siguientes métodos que no se usaron en la correlación original, (1) un régimen de flujo adicional, el flujo burbuja, considerando que no asume error en él (hold up), (2) el factor de fricción del modelo de tubería lisa normal fue cambiado, utilizando una factor de fricción en fase simple basado en el rango de la velocidad de fluido.

2.10.2.3 Dukler, Aga & Flanigan

La correlación de AGA & Flanigan fue desarrollada para sistemas de gas condensado en tuberías horizontales e inclinadas. Se considero cinco regímenes de flujo: burbuja, intermitente, anular, neblina y estratificado. La ecuación de Dukler es usada para calcular la perdidas de presión por fricción y el factor de entrapamiento (hold up) y la ecuación de Flanigan es usada para calcular el diferencial de presión por elevación.

2.10.2.4 Eaton y colaboradores (1966)

Realizaron pruebas experimentales de campo en tres tuberías de 1700 pies de longitud cada una y de 2,4 y 15 pulgadas de diámetro, respectivamente. Los rangos utilizados en sus pruebas fueron:

- Tasa líquida: 50-5500 BPD.
- Tasa de gas: 0-10 MMPCND.
- Viscosidad líquida: 1-13.5 cP.
- Presiones promedios: 70-950 psi.

La correlación se basa en un balance de energía de flujo multifásico, realizando correlaciones para el factor de entrapamiento de líquido y el factor de fricción, considerando las fases fluyendo como una mezcla homogénea de propiedades promedio.

2.11 Simulador PIPEPHASE

Este simulador permite predecir presiones, temperatura, composición y retención de líquidos en las líneas de flujo y sistemas de recolección y distribución. De esta manera se facilita la parte de diseño de nuevos sistemas de recolección y distribución, la evaluación de redes de tuberías ya existentes y la prevención de diversos problemas. Por otro lado, la amplia aplicación puede clasificarse en tres grupos principales: análisis de tuberías simples y complejas, análisis de pozos y planificación del amplio campo de producción y análisis de procedimientos de limpieza de tuberías. El Pipephase simula el flujo de fluidos en estado estacionario a través de tuberías, redes y sistemas de producción^[14]

El Pipephase tiene las siguientes características:

- Análisis de flujo monofásico o multifásico de un compuesto puro o mezcla de multicomponentes.
- Estimación de baches de líquidos.
- Estructurados especialmente para el uso en la industria petrolera.
- Poseen una extensa base de datos de propiedades físicas, químicas y termodinámicas de más de 950 componentes.
- Capacidad de analizar sistemas constituidos por un máximo de 500 nodos, 999 elementos de flujo y 50 componentes.
- Cálculo de los sistemas en flujo isotérmico o no isotérmico.

El Pipephase basa sus métodos de cálculos en modelos matemáticos tradicionales que describen el flujo de fluido y la transferencia de calor. La tubería simulada es dividida en volúmenes finitos por el usuario, con el fin de determinar: caída de presión, temperaturas por transferencia de calor, composición, determinación de las fases y flujos másicos.

Para resolver sistemas de redes de tuberías el programa emplea el método de balances de presiones en la red, la cual consiste, en primer lugar, en realizar balance de masa con el fin de obtener un estimado preciso de la distribución de los caudales. En segundo lugar se plantea un sistema de ecuaciones no lineales obtenidas del balance de presión y se resuelve por el método de Newton-Rapson. El proceso iterativo de resolución del sistema de ecuaciones se detiene cuando el error entre las presiones estimadas y las calculadas es menor a una tolerancia predeterminada.

El programa de simulación de Pipephase funciona bajo ambiente Windows. En este, el proceso de definición del sistema de tuberías se realiza gráficamente, mediante el empleo de iconos y líneas que representan fuentes o llegadas de flujo y tuberías respectivamente.

Dentro de las diversas opciones que el usuario puede fijar, se encuentra la referente al tipo de correlación a utilizar para determinar la caída de presión y el comportamiento térmico del sistema.

Para el caso de este trabajo se seleccionó la correlación, Beggs & Brill – Moody la cual se aproxima más a las condiciones reales de campo.

2.12 Portafolio De Oportunidades (PDO)

Etapa del ciclo de planificación que permite identificar y establecer las diferentes oportunidades de generación de potencial de petróleo y gas a la capacidad de ejecución operacional requerida, en un horizonte de 20 años y sin limitaciones financieras.

CAPITULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Problemas operacionales de la red de recolección propuesta por PGA, de los campos Zapato-Mata R, ante la nueva volumetría establecida para las operaciones centralizadas

El Proyecto Gas Anaco, considerando el estado de la infraestructura existente en la actualidad (tuberías, estaciones de flujo y descarga, plantas compresoras, etc.) en los campos Zapato y Mata R y que fueron diseñadas para la producción de petróleo, ha propuesto un nuevo sistema de tuberías, con el objetivo de aprovechar al máximo el potencial energético de dichos campos y de manejar de manera eficiente la producción desde las estaciones de recolección hasta un nuevo complejo donde se realizarán todos los procesos de tratamiento tanto de líquido como de gas; es decir planteó un sistema centralizado de operaciones donde el flujo multifásico se enviará desde las estaciones hasta dicho complejo llamado Centro operativo Zapato Mata R.

Toda la red de recolección incluyendo las estaciones de recolección y la red de tuberías, fueron por primera vez diseñados, basándose en una volumetría establecida para un periodo de operación de 2005 – 2021, durante la ingeniería básica del proyecto, luego durante la realización de la ingeniería de detalle, se modificó el Portafolio De Oportunidades (PDO), el cual establece la volumetría estimada a manejar en el distrito Anaco por un periodo de tiempo, implantando como nuevo periodo de operación el lapso comprendido entre los años 2005- 2024, durante el cual se destacó un incremento importante en la producción de gas y líquido (crudo +

agua), trayendo como consecuencia la necesidad de evaluar el impacto sobre las líneas previamente diseñadas, y determinar si se requería algún ajuste o cambios en la red. Esta evaluación se realizó en el año 2004 y arrojó que era necesario aumentar los diámetros de todas las líneas dimensionadas durante la ingeniería básica del proyecto.

Para la fecha en curso, fue modificado nuevamente el periodo de operación del COZMR, estableciendo un nuevo PDO, con un lapso de operación entre los años 2006 – 2025, y con ello la volumetría estimada a manejar por el centro operativo, entonces resultó necesario evaluar el funcionamiento de las líneas frente al nuevo flujo, y determinar si es necesario redimensionar algunas líneas. Todo esto con el fin único de asegurar la continuidad de las operaciones del COZMR a la hora del arranque y a lo largo de sus operaciones normales. Tomando en cuenta para la evaluación, parámetros hidráulicos como velocidad de la mezcla, acumulación de líquido, velocidad erosional, regímenes de flujo y caída de presión por tramo de tubería, comparando con las normas por las cuales se rige la empresa PDVSA Gas Anaco.

Para realizar la evaluación se debe contar con un modelo representativo de la red de recolección propuesta por el Proyecto Gas Anaco. Para este fin se utilizó como principal herramienta utilizada el programa de simulación Pipephase 9.2, un paquete comercial elaborado por la empresa Simulation Sciences Inc. La cual es de gran utilidad a la hora de diseñar, analizar y optimizar gran variedad de sistemas de fluidos.

En la actualidad, existe una serie de gasoductos que pertenecen a la red PGA, que están operativas debido a las malas condiciones de las tuberías que conforman la red tradicional de los campos Zapato y Mata R. Y por ende para realizar una evaluación del sistema de recolección a implantar en dichos campos se debe considerar el efecto que podría causar el uso temprano de estas tuberías.

Por tal motivo se elaboró una simulación de red tradicional antes que la propuesta por el Proyecto Gas Anaco, para lo que se debió recopilar una serie de información a través de: revisión de las simulaciones viejas pertenecientes a el sistema de 250 psi, que se encontraban en la base de datos del Departamento de Optimización y Arranque de PDVSA Gas Anaco, visitas guiadas por ingenieros a campo y a las plantas compresoras, levantamientos de cada estación tanto activa como inactivas para el nivel de 250 psi (las estaciones inactivas se utilizaron para el ultimo objetivo del proyecto), entrevistas tanto al personal encargado del sistema de transmisión y recolección del campo Zapato Mata R como a los operadores y al custodio de las estaciones de flujo y descarga de dichos campos y levantamientos de las plantas compresoras Zapato y Mata R. Cada una de estas actividades se desarrollo en busca de la siguiente información:

- **Revisión de las simulaciones viejas:** esta actividad se realizó a manera de introducción tanto en el manejo del paquete de simulación como para conocer los campos y las cantidad de gasoductos involucrados en el estudio, en total se revisaron 46 simulaciones en ellas se visualizó, estaciones, plantas compresoras y tramos de el sistema de recolección. esta revisión ayudó a conocer el sistema de recolección y que información se debía conseguir y confirmar de los campo para elaborar la simulación lo mas cercana a la realidad.

En la figura 3.1, se observa una de estas simulaciones, específicamente del campo zapato, donde se observan las 7 estaciones, todo el sistema de recolección que lo conformaba para el año 2002 y la llegada a la planta compresora Zapato propia.

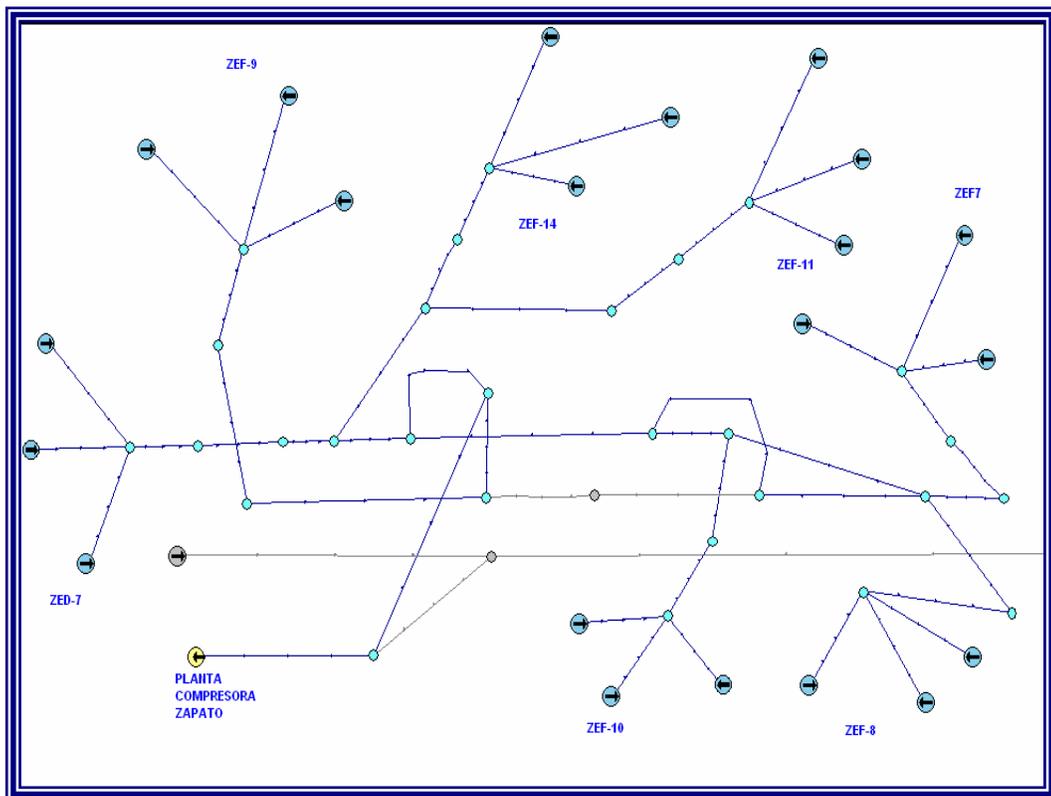


Figura 3.1 Simulación de Campo Zapato y la llegada a la planta compresora.

- **Visitas a guías:** con la finalidad de detallar toda la red de tuberías e identificar las líneas que corresponde al nivel de 250 psi, (estos campos también manejan el nivel de 60 psi); y para conocer el sistema de operación de las estaciones y de las plantas compresoras a manera de visualizar en la simulación con detalle.
- **Levantamientos de las estaciones activas e inactivas:** esta actividad se realizó con la finalidad de ajustar la simulación a los campos y así verificar la información existente en las simulaciones realizadas en PDVSA de la red que maneja el nivel requerido, para el estudio en cada una de las estaciones, se iniciaron en los múltiples de producción o válvulas multipuertos, hasta las

descargas al sistema de recolección, tomando en cuenta todos los accesorios y equipos existente, como válvulas, codos, reducciones. En total fueron 9 estaciones de flujo (ZEF-7, ZEF-8, ZEF-10, ZEF-9, ZEF-14, ZEF-11, B-12, W-4 Y X-8) y 1 estación de descarga ZED-7. Una vez terminados los levantamientos de la información, se plasmó la misma en esquemáticos ajustados a las normas del Departamento de Optimización y Arranque. En las figuras 3.2 y 3.3 se muestra algunos de los esquemáticos realizados.

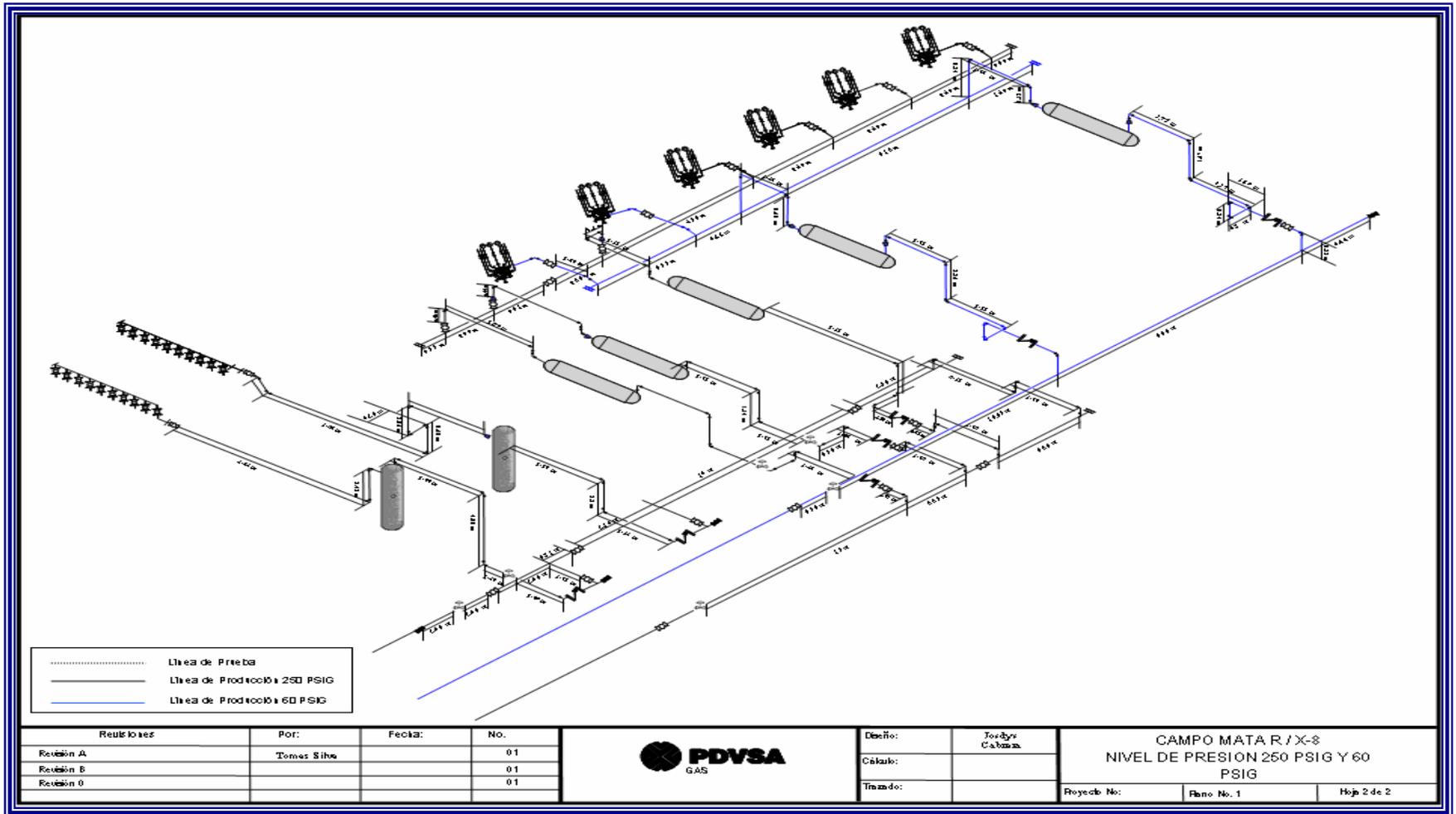


Figura 3.2 Esquemático de X-8, destinado a recolectar las medidas de las líneas de 250 psi.

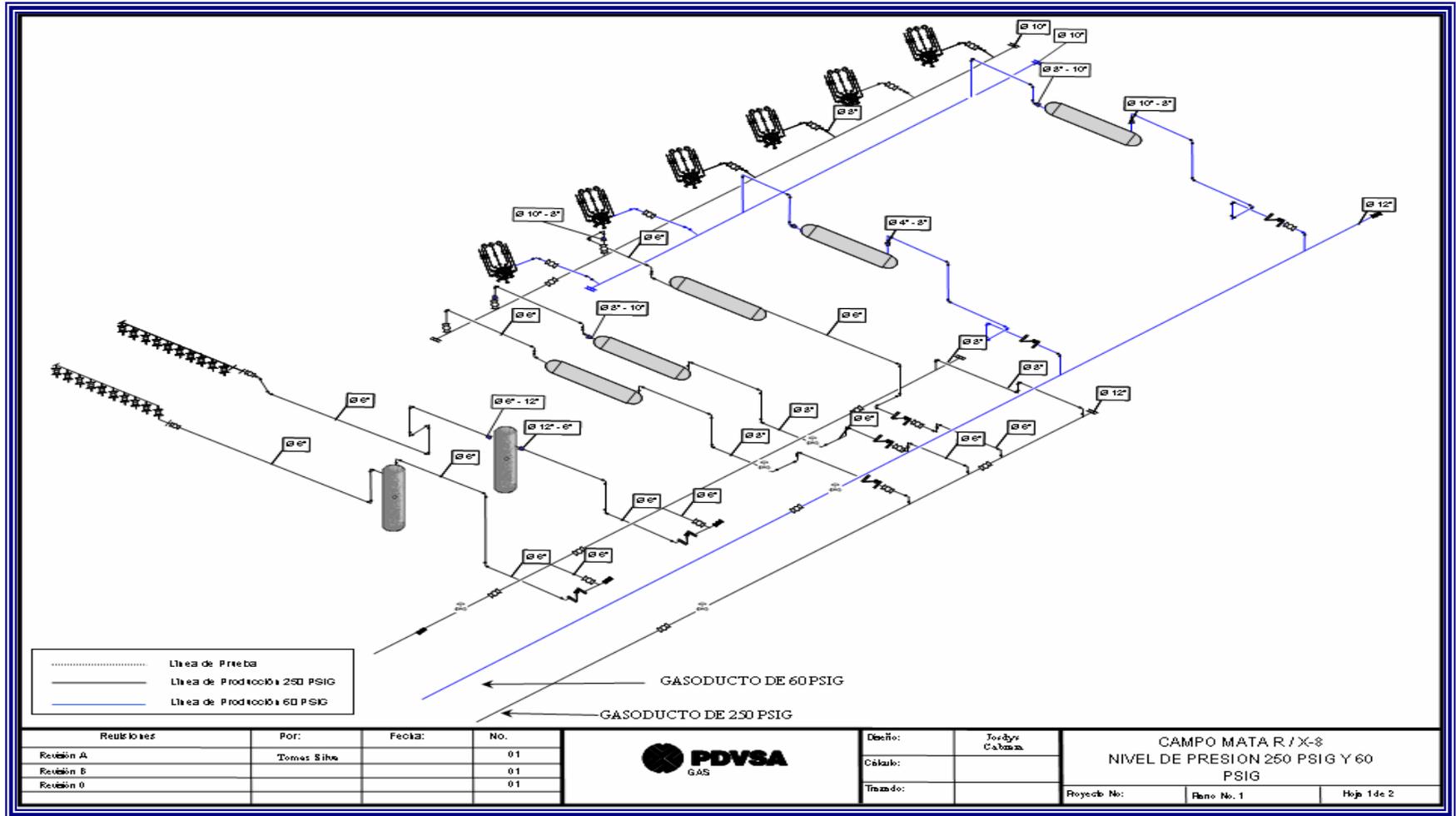


Figura 3.3 Esquemático de X-8, destinado a recolectar las dimensiones de las tuberías del nivel 250 psi.

En estas figuras se destacan las líneas tanto para el nivel 250 psi como para 60 psi, y aunque se levantó toda la infraestructura que se encuentra en todas las estaciones, se utilizó sólo la información del nivel 250 psi. Esto se realizó por solicitud de la empresa, con la finalidad de facilitar próximos levantamientos. En estas figuras, se observan los accesorios y equipo existentes. En esta estación se destaca que no solo el fluido a nivel 250 psi es descargado a los separadores a través de las válvulas multipuertos sino que también existen dos multipuertos que descargan a separadores independientes, así que cuenta con 3 válvulas multipuertos, 2 múltiples de producción, 2 separadores horizontales, 2 separadores verticales y líneas en su mayoría de 6" y de 12". El resto de las estaciones se reflejan en los anexos A.

- **Entrevistas:** se necesitaba conocer cuales eran las líneas activas e inactivas, que separadores están operando y que estaciones están trabajando bajo el nivel de 250 psi, esta información fue suministrada por los operadores y el custodio de las estaciones, este personal ayudo con la visita a cada estación y señalando en planos la ruta crítica de las estaciones. Por otra parte el personal del departamento de Gasoducto de Transmisión y Recolección del Área Mayor Oficina, suministro una serie de esquemáticos donde se observa el recorrido del gas hasta llegar a las plantas compresoras, uno de estos se muestra en la figura 3.4 y 3.5, también facilito un listado con todos los gasoductos con su estado de operación y sus dimensiones, el cual se observa en la tabla 3.1. De igual manera facilitó una serie de esquemáticos donde se muestra de manera grafica toda la red de recolección del campo Zapato y Mata R, por separado, los cuales se pueden apreciar en las figuras 3.6.

Tabla 3.1 Listado de gasoductos activos de los campos Zapato y Mata R, para el nivel 250 psi.

CAMPO	DIAMETRO (pulg)	ESTACIÓN	DESTINO	LONGITUD (Km)	ESTADO
MATA R	12	EFB-12	PCMVR	3,00	Operativo
MATA R	12	EFW-4	PCMVR	3,90	Operativo
MATA R	8	EFX-8	PCMVR	1,80	Operativo
MATA R	20	EFX-8	PCMVR	1,80	Operativo
ZAPATO	12	ZEF-11	J004	8,60	Operativo
ZAPATO	8	ZED-7	J003	2,00	Operativo
ZAPATO	6	ZED-7	J003	2,00	Operativo
ZAPATO	16	J003	ZEF-10	5,20	Operativo
ZAPATO	6/10	ZEF-7	SALTO	1,90	Operativo
ZAPATO	6/8	ZEF-8	SALTO	3,00	Operativo
ZAPATO	12	ZEF-10	J005	0,40	Operativo

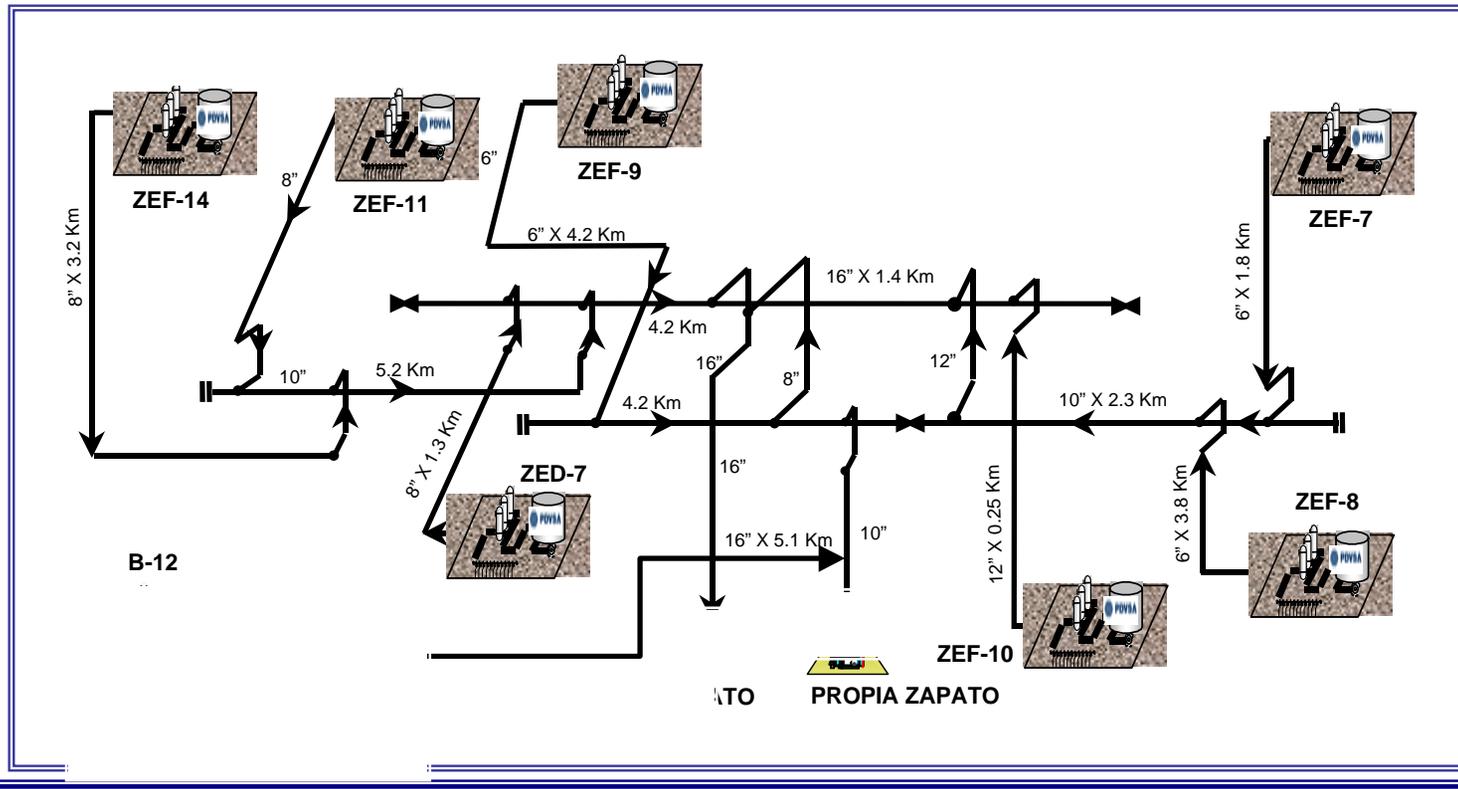


Figura 3.4 Esquemático representativo de todo el sistema de recolección de campo Zapato para el nivel de presión 250 psi.

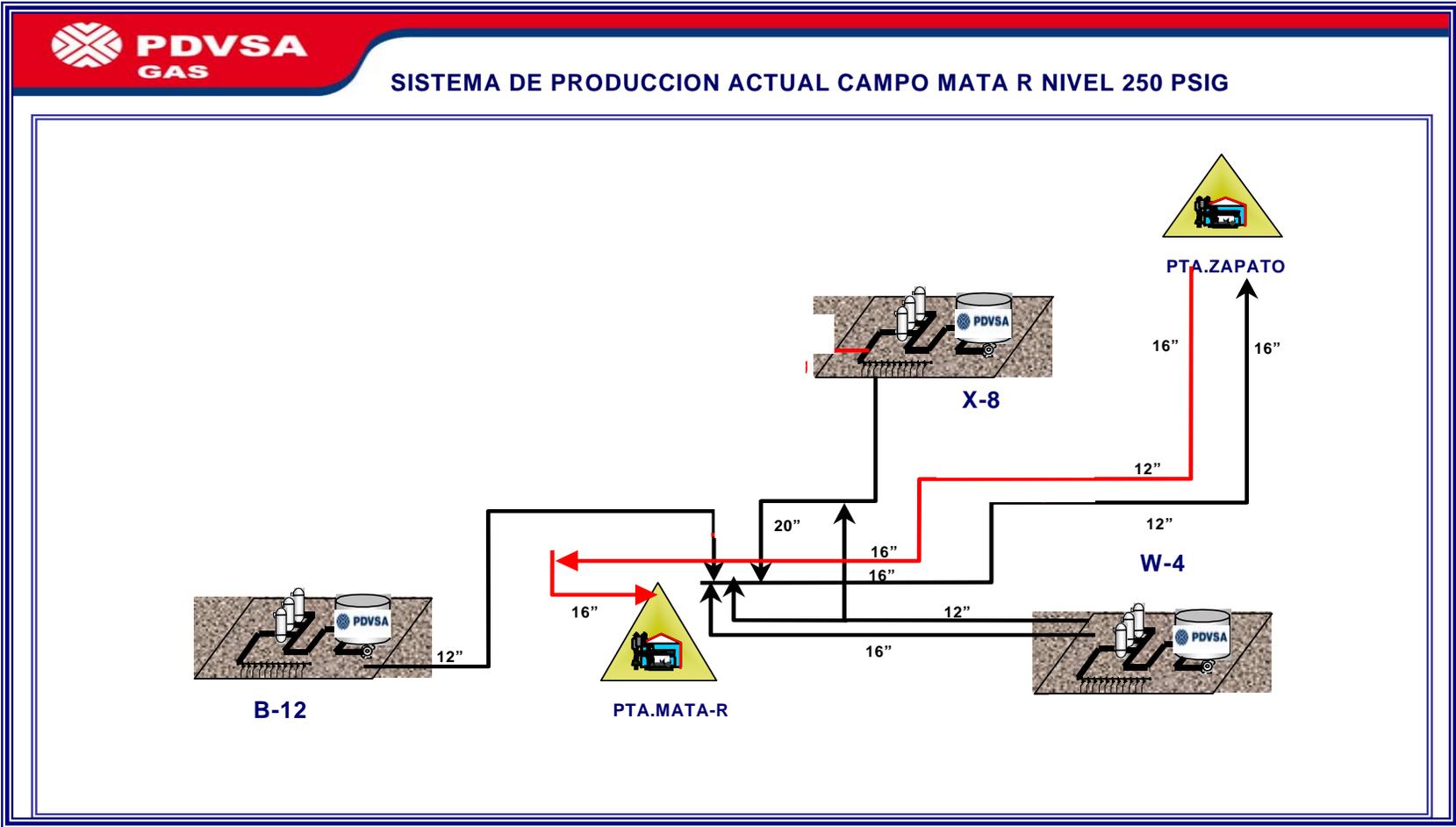


Figura 3.5 Esquemático del sistema de recolección de Mata R del sistema de 250 psi.

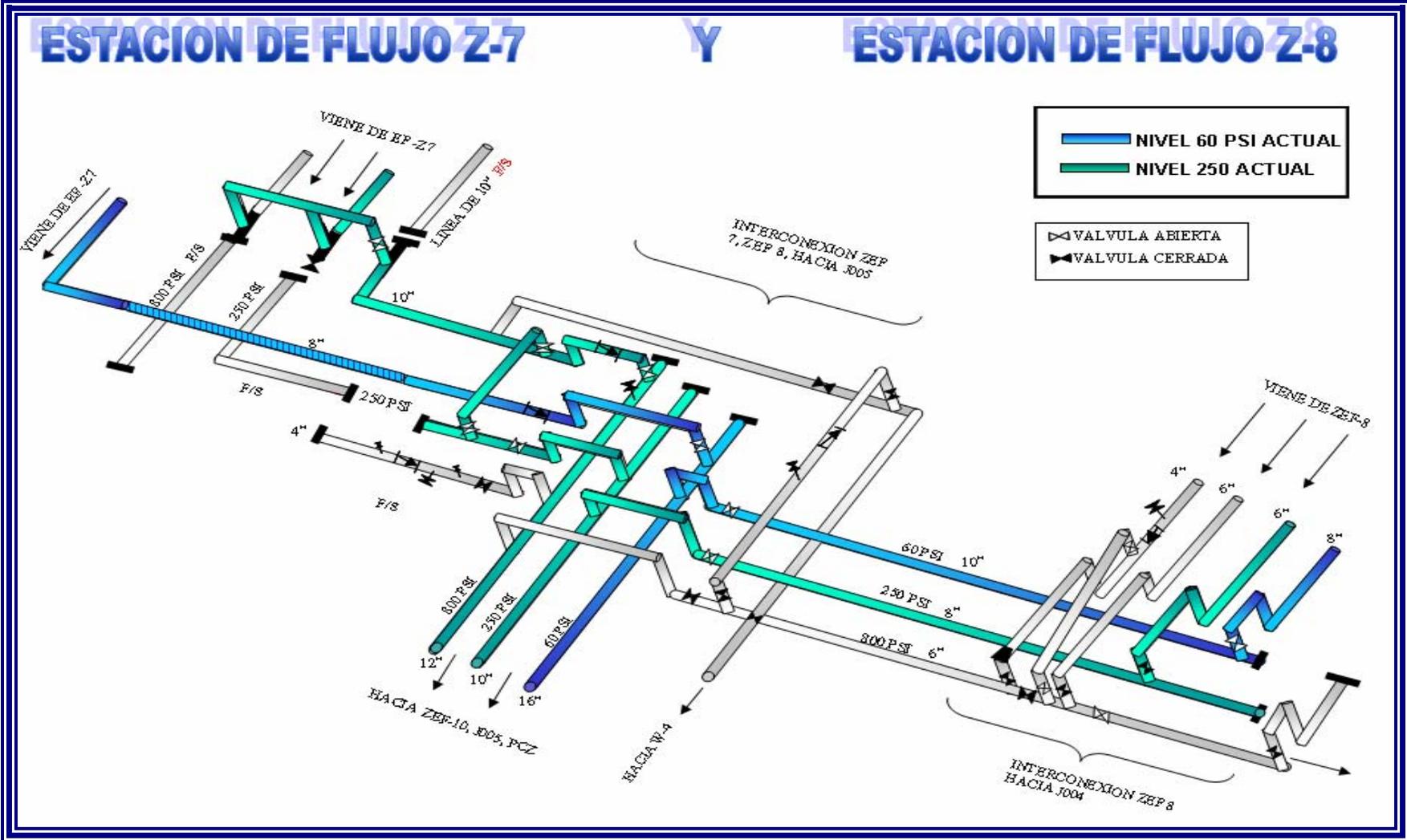


Figura 3.6 Gasoductos de recolección de las estaciones ZEF-7 y ZEF-8.

➤ **Levantamientos de las plantas compresoras:** el sistema de producción para el nivel 250 psi cuenta con tres plantas compresoras, estas son: Mata R, Zapato y La ceibita.

✓ **Planta compresora Mata R:** esta planta trabaja para presiones de 60 psi y 500 psi, las cual eleva a 1200 psig, nivel requerido por el sistema de transmisión. Una parte del gas producido bajo el nivel de 250 psi en el campo Mata R, es recolectado en esta planta y enviado a través de un gasoducto de 16” hasta la planta compresora de Zapato, sin ningún tratamiento previo, en esta última planta el gas llega con un nivel de deposición de 250 psi y es elevado a 500 psi y reenviado por otro gasoducto de 16” hasta la planta compresora Mata R. Para la evaluación se hizo un levantamiento de las conexiones de los gasoductos provenientes de las estaciones con el gasoducto de 16” que maneja el gas de 250 psi, ubicado en esta planta. Este levantamiento se muestra en la figura 3.7, en el que se refleja todo el recorrido de los tres niveles de presión que allí se manejan.

✓ **Planta compresora Zapato:** esta planta compresora cuenta con dos instalaciones, una propia y otra alquilada (Hannover), éstas trabajan bajo el nivel de 60 psi, 250 psi y 500 psi. Las entradas son de un gasoducto de 16” que viene de la planta compresora Mata R, y otra que viene del campo Zapato de 12”. Estos dos gasoductos se unen a una compleja red de tuberías que descargan tanto a los compresores de la planta alquilada como a la propia, y se realizó un levantamiento mas detallado ya que en el 2008 se realizaron ciertos trabajos y desvíos de producción que no se registraron en la base de datos del departamento de Optimización y Arranque. Este levantamiento se muestra en la figura 3.8.

- ✓ **Planta compresora La Ceibita:** no toda la producción del campo Mata R, se puede enviar a la planta Zapato, parte de la producción es enviada a La Ceibita. De esta planta no se realizó un levantamiento con visita a campo, solo se tomó la información disponible en el Departamento de Infraestructura. de PDVSA Gas Anaco, ya que se contaba con un levantamiento actualizado debido a trabajos que se estaban llevando acabo, en este departamento, para el momento de recolectar información necesitada para realizar la evaluación planteada.

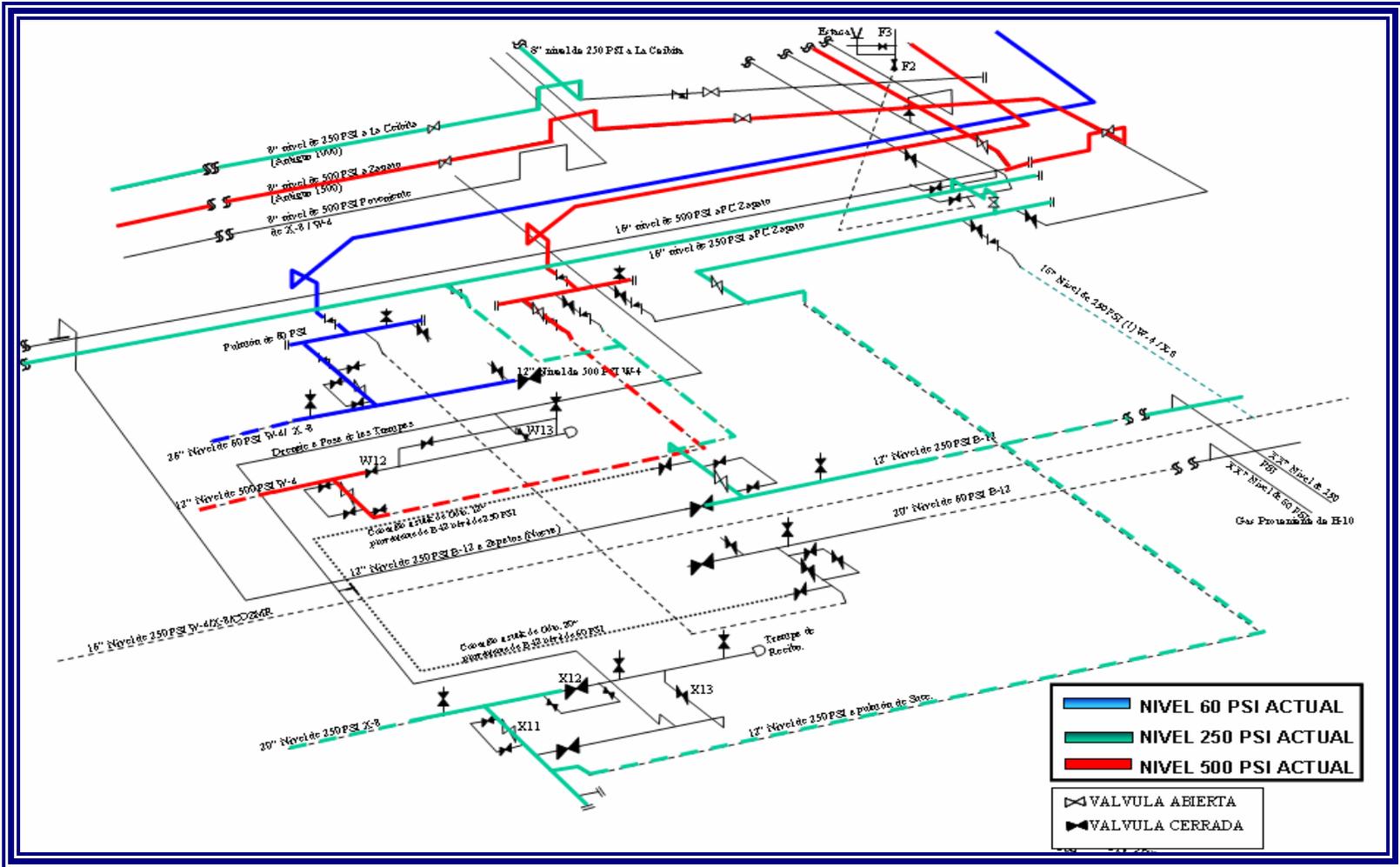


Figura 3.7 Levantamiento de la succión de la planta compresora Mata R.

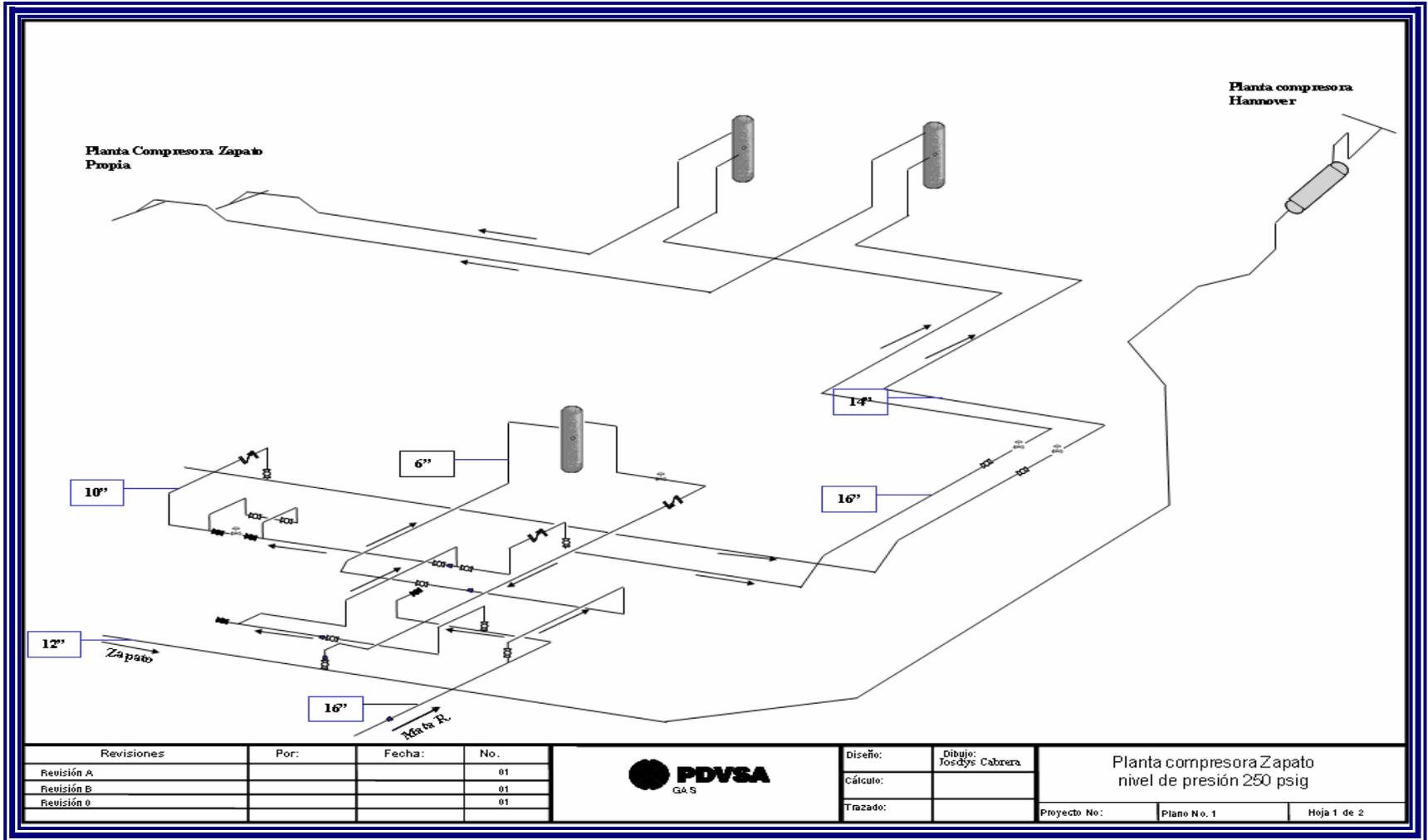


Figura 3.8 Levantamiento de la planta compresora Zapato, para el nivel de presión 250 psi

3.1.1 Elaboración de un modelo de simulación representativo a la red de recolección tradicional

Para elaborar la simulación se deben llevar a cabo los siguientes pasos, utilizándose la información recopilada en el campo:

- Definición de la simulación.
- Selección de los componentes presentes en el fluido de trabajo.
- Elaboración de las redes en el simulador.
- Y por último, validar la red.

3.1.1.1 Definición de la simulación

Al iniciar el programa, éste exige una serie de datos a manera de establecer el tipo de simulación con el que se trabajará y que tipo de fluido manejará y de esta manera determinar las opciones con las cuales se podría trabajar.

Primero se definió el tipo de simulación, seleccionando el **modelo de red** (*network model*), debido a la complejidad e interconexiones que existen en las líneas, como se pudo observar, la red de tuberías que comprende a los campos Zapato y Mata R, esta conformada por tubos de diferentes diámetros de grandes distancias, a demás de que se debió integrar, estaciones, red de recolección y plantas compresoras en una misma simulación.

Se definió como **composicional** (*compositional*) por ser el fluido de estudio una mezcla de varios compuestos orgánicos e inorgánicos (ejemplo: metano, etano, propano, nitrógeno, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, etc.).

La fase en la que se encuentra fue designada como **multifásica** (*rigorous multi-phase*), ya que la red poseen componentes condensables.

Y por ultimo se seleccionaron las unidades de medida por defecto. Se eligieron las unidades de **petróleo** (*petroleum*) para hacer uso de los datos suministrados por la empresa con mayor facilidad y que los resultados cumplan con las especificaciones exigidas por esta.

En las figuras 3.9, 3.10, 3.11 y 3.12, se observan las ventanas mostradas por el simulador *Pipephase* 9.2 para definir el tipo de simulación.

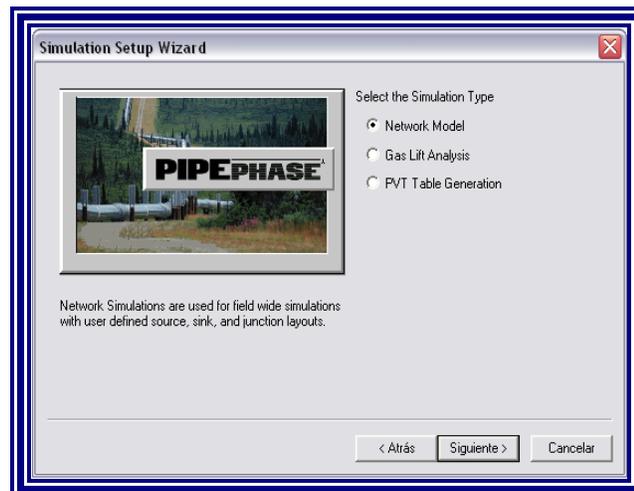


Figura 3.9 Modelo de red.

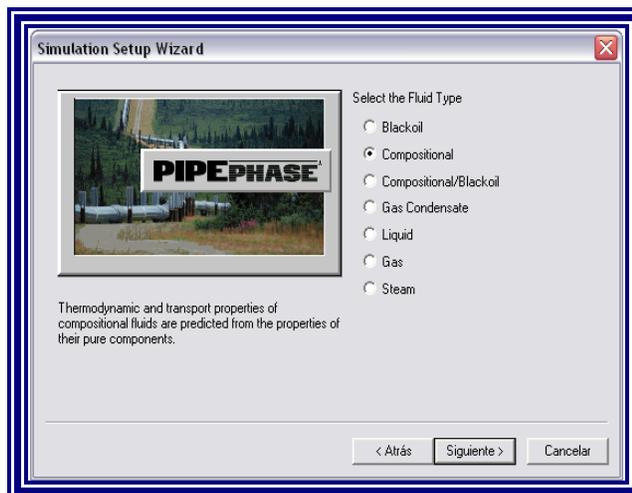


Figura 3.10 Tipo de fluido.

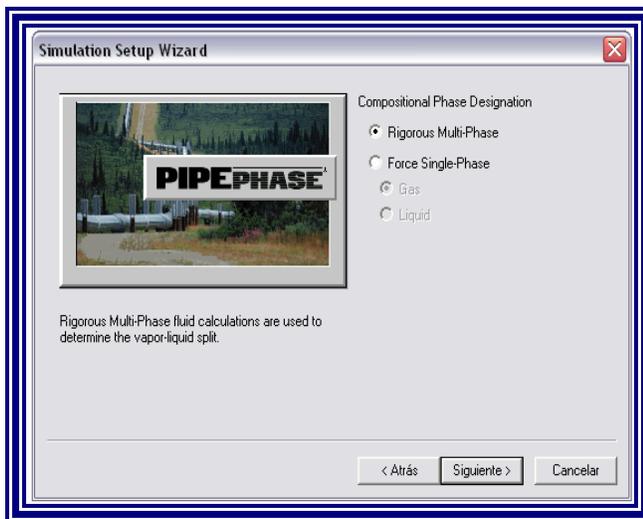


Figura 3.11 Fase de la mezcla.

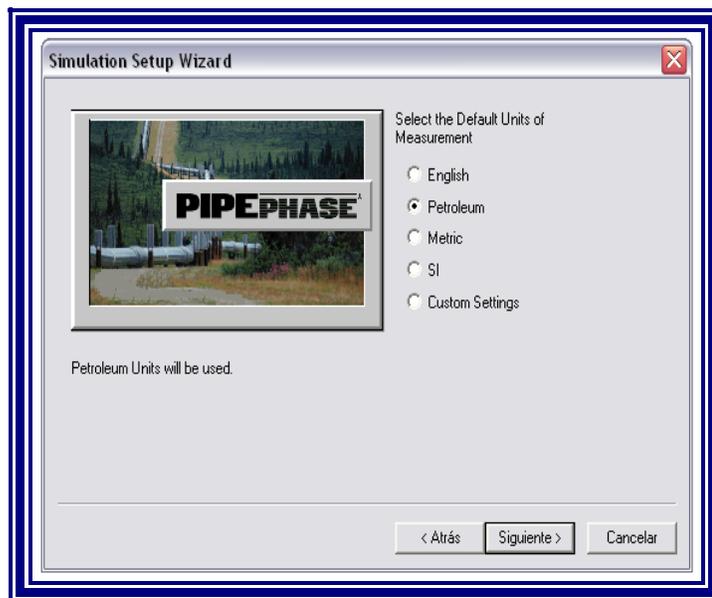


Figura 3.12 Unidades de trabajo.

3.1.1.2 Selección de los componentes presentes en el fluido de trabajo

Luego de definir el tipo de simulación, el programa abre una ventana en la que se deben agregar los componentes que conforman el fluido con el cual se va a trabajar, para ello se utilizó los análisis cromatográficos emitidos por los laboratorios de campo Mata, realizados en cada estación de los campos Zapato y Mata R, dichos análisis se realizaron en diciembre del 2008, fecha en la cual se inició la elaboración de la simulación con la finalidad de contar con información lo más actualizada posible. Estos análisis se muestran en los anexos C.

El programa posee una amplia base de datos de compuestos, con sus respectivos pesos moleculares y demás características fisicoquímicas. Los componentes que se consiguen en el fluido de estos campos (Zapato y Mata R) según los análisis cromatográficos realizados bajo las normas GPA (Asociación de Procesadores De Gas o *Gas Processors Association*) No.2166, ASTM (Sociedad

Americana de Ensayo de Materiales o *American Society of Testing Materials*) D-1945 y ASTM D-4810, son compuestos orgánicos de la cadena parafínica con sus respectivas fórmulas químicas y nomenclaturas comunes: metano (CH_4 - C_1), etano (C_2H_6 - C_2), propano (C_3H_8 - C_3), iso butano (C_4H_{10} - C_4), normal butano (C_4H_{10} - C_4), iso pentano (C_5H_{12} - C_5), normal pentano (C_5H_{12} - C_5), hexanos (C_6H_{14} - C_6), Heptanos (C_7H_{16} - C_7), Octanos (C_8H_{18} - C_8), Nonanos (C_9H_{20} - C_9), decanos y más pesados ($\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ - C_{10}^+). Dentro de los componentes inorgánicos de la mezcla se tienen dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y nitrógeno (N_2). Y en lo que respecta a la cromatografía tomada para el crudo se utilizó como base las utilizadas en la ingeniería detalles del Proyecto Gas Anaco.

Las ventanas y pasos a seguir para añadir los compuestos son los siguientes:

- **Paso 1:** entrar a la librería de compuestos, para **añadir** (*Add*) de la pestaña librería de componentes (*Library Components*). Como se muestra en la figura 3.13.
-

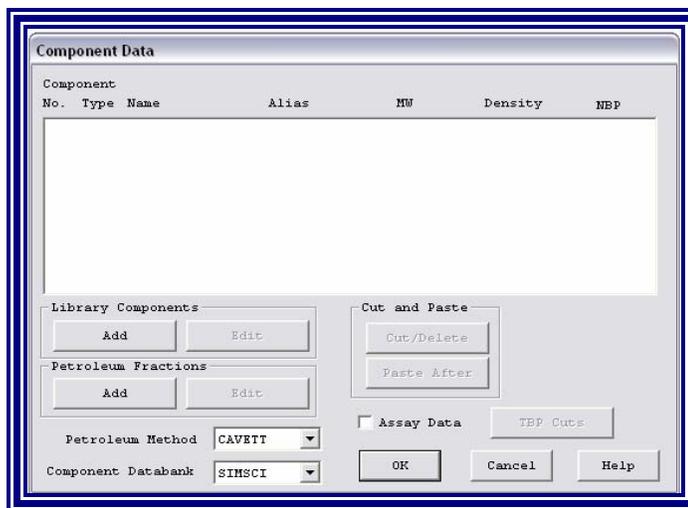


Figura 3.13 Ventana para entrar al listado de los componentes.

- **Paso 2:** seleccionar de la librería los compuestos con la que cuenta el fluido de estudio, para agregar a la lista se debe pulsar el compuesto deseado en la pestaña **componentes específicos para la selección** (*specific components available for selection*). Como se muestra en la figura 3.14.

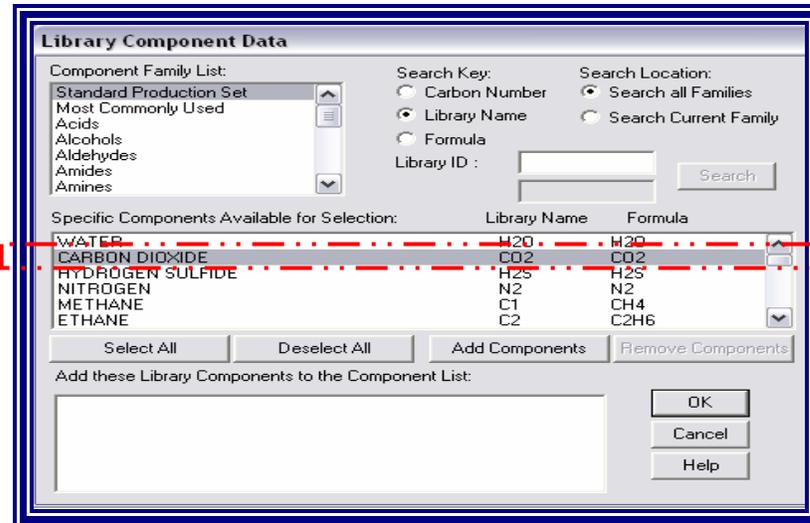


Figura 3.14 Ventana para seleccionar los compuestos que conforman al fluido estudiado

- **Paso 3:** este es el último paso, se comprueban que estén los compuestos en la pestaña correspondiente (*add these library components to the component list*). Como se muestra en la figura 3.15.

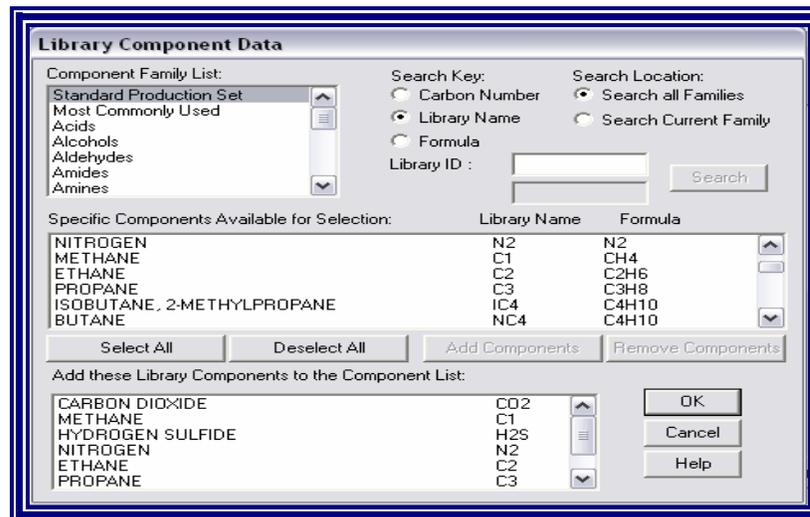


Figura 3.15 Listado de componente seleccionado

3.1.1.3 Elaboración de las redes en el simulador

Una vez seleccionada la composición del fluido se procedió al montaje del esquema de simulación con todos sus elementos, tomando en cuenta la información recabada a manera de establecer un comportamiento de las variables de proceso, lo más similar a las condiciones reales de operación en los campos de estudio. Resulta importante resaltar el Pipephase 9.2 trabaja a través de un PDF (Process Fluid Diagram), donde se dibujan los componentes presentes en un sistema o red de tuberías, por lo que posee una simbología sencilla de cada elemento, equipo, tubería y accesorio que existe normalmente en la industria para ser utilizados en la hoja de trabajo. Los componetes básicos de una red son:

- Fuente (source).
- Sumideros (sink).
- Enlace (link), que incluye los equipos, tuberías y accesorios del sistema.
- Nodos (junction).

En la figura 3.16, se observa un montaje sencillo donde 2 fuentes descargan a 2 tuberías distintas que se unen a una sola línea, a través de un nodo, para llegar a un sumidero, también se muestran las hojas de datos con las que cuenta el programa para especificar cada componente del sistema, a las cuales se pueden acceder pulsando sobre el componente deseado.

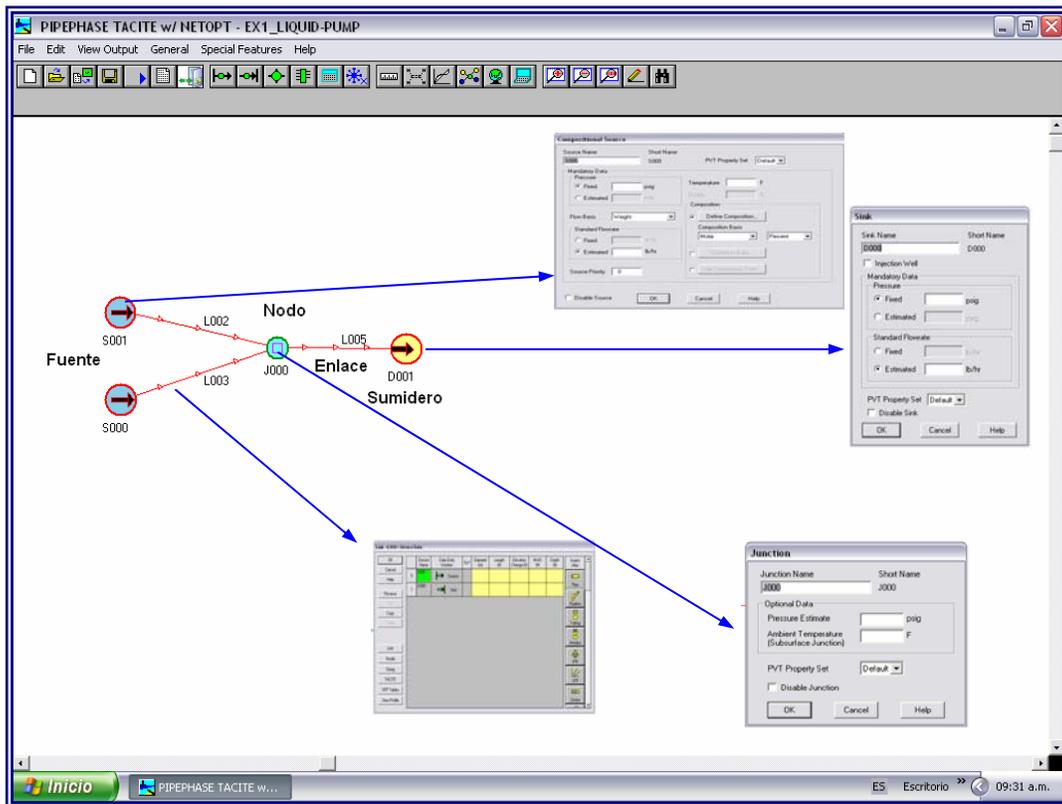


Figura 3.16 Esquema de una red de simulación hidráulica.

➤ Fuentes y sumideros del sistema

Las fuentes del sistema de recolección simulado (actual), estarán representados por los múltiples de producción o válvulas multipuertos de cada estación de flujo y descarga, de los campos en estudio; estas válvulas y múltiples envían la mezcla que reciben de los pozos productores, al sistema de separación ubicado dentro de las instalaciones de la estación, el gas es separado y continua su recorrido, a través de todo el sistema de recolección hasta llegar a la Planta Compresora Zapato, considerando como el sumidero del sistema por ser, a razón de este proyecto, el punto final del fluido.

A cada fuente y sumidero se le agregó las presiones y volumetría del fluido con las que trabajan en la actualidad, tomando en cuenta las siguientes consideraciones.

- ✓ Los flujos usados fueron los reflejados en el informe de pruebas de producción del mes de enero del 2009 (Anexos D). En la Tabla 3.2 se destaca la información más importante obtenida de dicho informe.
- ✓ Las presiones asumidas y la temperatura asociada a cada estación son las reflejadas en los análisis cromatográfico de cada estación, que se muestran en la tabla 3.2. (es importante destacar que la información se tomo de los análisis cromatográficos para tener un valor cercanos a los reales a la hora de realizar el montaje y de este modo reducir las iteraciones realizadas por el simulador).

Tabla 3.2 Flujos, presiones y temperaturas consideradas para el montaje de la red actual.

Estación	Volumen de gas (MMPCND)	Volumen de agua (BNPD)	Volumen de crudo (BNPD)	Temperatura (°F)	Presión asumida (psi)
ZEF-7	2,22	7	13	94	280
ZEF-8	1,01	17	26	88	260
ZEF-10	5,33	77	32	90	280
ZED-7	19,94	136	247	91	270
ZEF-11	3,05	154	107	92	280
W-4	26,44	77	153	116	310
X-8	40,32	99	321	100	315
B-12	16,98	123	153	103	280

Además, de las condiciones de flujo, presión y temperatura que debe cargarse a las fuentes, es importante incorporar la composición cromatográfica, representativa de gas y líquido de cada estación

Para mostrar como se añadió la información a cada estación, se seleccionó la estación ZEF-10, perteneciente al campo Zapato. Los pasos fueron los siguientes:

- ✓ **Paso 1:** se seleccionó del menú del paquete de simulación las tres fuentes que representan la fuente de agua crudo y agua respectivamente y a cada una se cargo la información solicitada por el simulador como se muestra en las figuras 3.17 y 3.18 la ventana para cargar los datos de las fuentes se abre al hacer doble click sobre la fuente.

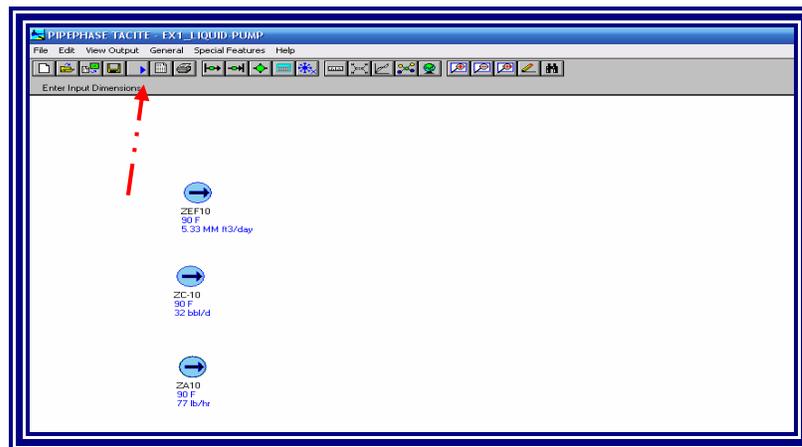


Figura 3.17 Selección de las fuentes agua, crudo y gas para la estación ZEF-10.

Compositional Source

Source Name: ZEF10 Short Name: ZEF1 PVT Property Set: Default

Mandatory Data

Pressure: Fixed Estimated 280 psig Temperature: 90 F Quality: %

Flow Basis: Gas Volume

Standard Flowrate

Fixed 5.33 MM ft3/day Estimated MM ft3/day

Source Priority: 0

Composition

Define Composition... Distillation Data... Use Composition From...

Composition Basis: Molar Percent

Disable Source OK Cancel Help

Figura 3.18 Ventana que muestra los parámetros pertenecientes a la corriente de gas de la estación ZEF-10.

- ✓ **Paso 2:** se incorpora toda composición molar de los componentes de cada fuente, entrando en el link que se muestra en la figura 3.19.

General Spread Sheet - ZEF10 Source Composition

	Component Name	Composition Mole %
1	N2	1.3000e-001
2	CO2	10.537
3	C1	68.541
4	C2	10.786
5	C3	5.125
6	IC4	1.371
7	NC4	2.163
8	IC5	5.7700e-001
9	NC5	3.3300e-001
10	NC6	2.5600e-001
11	NC7	1.2500e-001
12	NC8	5.6000e-002
13	NC9	0.000
14	NC10	0.000
15	H2O	0.000
16	NC11	0.000

Figura 3.19 Ventana que muestra la composición del gas según los análisis cromatográficos para la estación ZEF-10.

Para el resto de las fuentes (en total fueron 33 fuentes) se realizaron los mismos pasos utilizando, tanto los análisis cromatográficos como el reporte de producción del mes de enero.

En cuanto a los sumideros se utilizó la información representada en la tabla 3.3, suministrada por el supervisor de la planta compresora Zapato y el personal del Departamento de Gasoductos de Transmisión y Recolección.

Tabla 3.3 Compromiso de los campos con las plantas compresoras.

Plantas Compresoras	Zapato Propia (lb/hr)	Hannover (Zapato alquilada) (lb/hr)	La Ceibita (lb/hr)
Parámetro			
Presión (psig)	245	245	250
Flujo (lb/hr)	$2,798 \cdot 10^5$	$2,371 \cdot 10^5$	28449

Los pasos para definir los sumideros, los cuales representan las llegadas a los cabezales de succión en las plantas compresoras en la simulación actual, son los mismos que para definir las fuentes solo que éstas no requieren de la composición del fluido. En la figura 3.20 se muestra el link para seleccionar los sumideros en el menú del paquete de simulación y en la figura 3.21 se muestra la ventana donde se suministran los datos de la fuente en este caso la planta compresora La Ceibita.

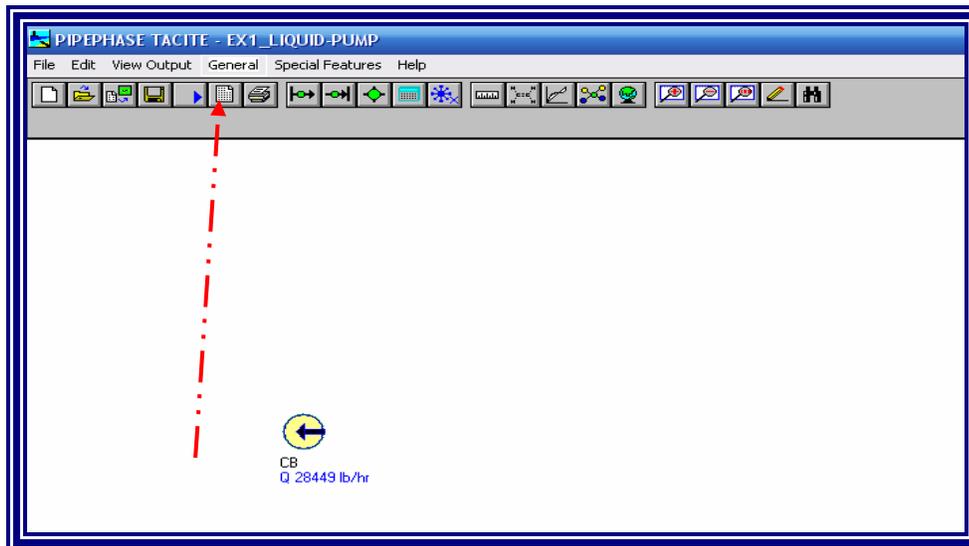


Figura 3.20 Selección del sumidero en el menú de *Pipephase 9.2*.

Figura 3.21 Ventana que muestra los datos que corresponden a la planta compresora La Ceibita.

➤ **Equipos, gasoductos y accesorios del sistema**

El gas hace el recorrido desde las estaciones hasta la planta compresora a través de la red de recolección, la cual cuenta con una serie de gasoductos, equipos y accesorios. Cada uno de ellos posee funciones distintas y tienen gran influencia en la caída de presión del fluido del trabajo, por ende debe ser considerados para el montaje de la red.

En el modelo de simulación que representa el sistema de recolección actual de los campos Zapatos y Mata R, se realizó la interconexión de las fuentes y sumideros a través de uniones (link) y nodos que unen a dos o más gasoductos de la red de tuberías, siguiendo el sentido del fluido, a estas uniones se les introdujo cada especificación del gasoducto que representaba, tomando en cuenta accesorios y equipos.

Para ello Pipephase cuenta con una opción que ayuda a incorporar cada uno de estos componentes que se pueden conseguir en las líneas de la red, para acceder a ésta basta con pulsar en la unión entre nodo y nodo y aparecerá un cuadro de diálogo en el lado derecho de éste, donde se encuentran todos los accesorios.

Y pulsando sobre el accesorio se puede incorporar a la línea o link, y por último se incorporan las especificaciones correspondientes como distancias, diámetros, elevaciones, tipo (si es necesario, como en el caso de las válvulas), etc.

Para incorporar a la simulación la estación ZEF-10, luego de agregar las fuentes se procede a agregar todos los accesorios y equipos que están involucrados en el recorrido del fluido hasta las líneas de recolección principales, que como se observa en la figura 3.6, la estación ZEF-10, descarga la producción en un gasoducto de 16". Lo primero que se debe hacer es unir las fuentes que representan el múltiple de

producción que se encuentra en esta estación, para ello se utilizan los nodos y uniones o link. Los nodos se encuentran en el menú de la hoja de trabajo del simulador y las uniones se colocan pulsando el elemento inicial (fuentes o nodos) y arrastrando el pulsor hasta la llegada de la línea (nodo o sumidero). Esto es mostrado en la figura 3.22.

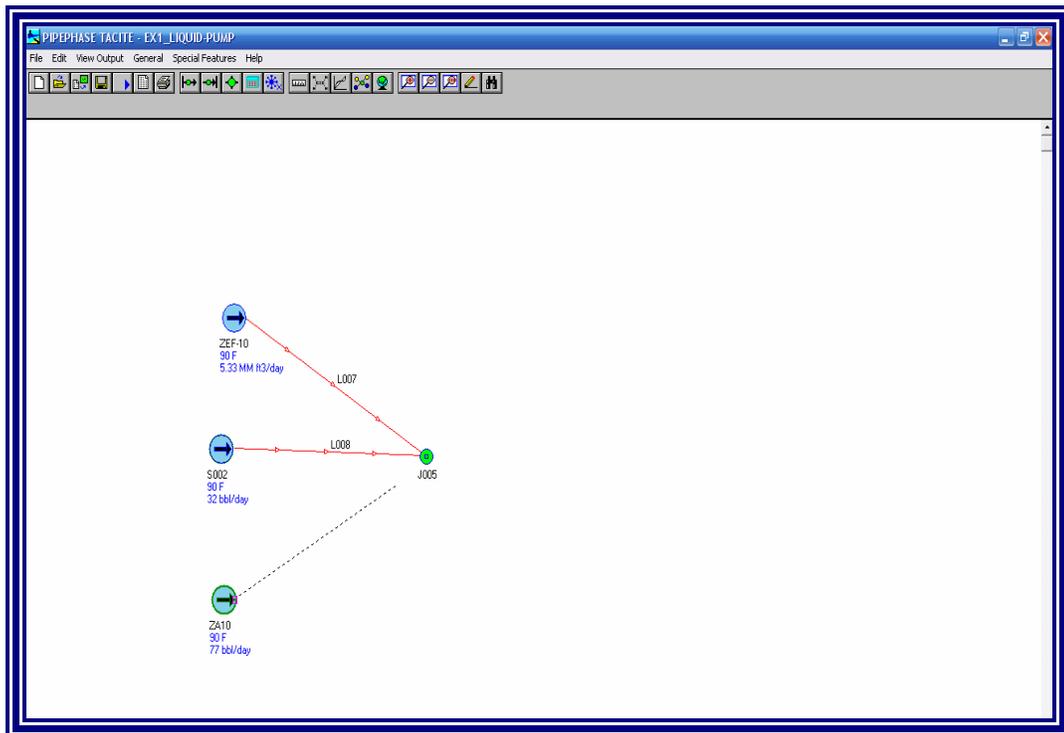


Figura 3.22 Representación de la simulación del múltiple de producción de la estación ZEF-10.

Una vez elaborado el múltiple se incorporan las especificaciones de éste, cada link o unión debe tener una tubería de 30 pulgadas de 1 metro, éstas son las dimensiones utilizadas en el departamento de Optimización y Arranque para lograr una mezcla homogénea de los tres fluidos (agua, crudo y gas), para ello se debe pulsar en la unión y se abre la ventana donde están los accesorios con los que cuenta

el simulador, se elige el requerido en este caso tuberías (pipe) y al pulsar sobre éste se accede a la ventana donde se agregan las especificaciones como se muestran en las figuras 3.23 y 3.24.

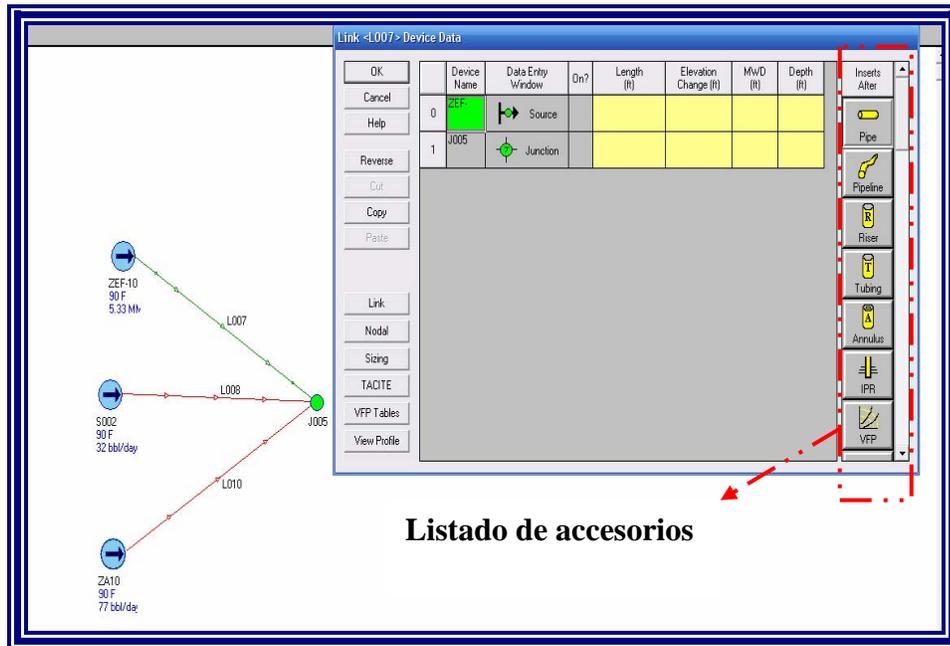


Figura 3.23 Ventana para cargar los accesorios existentes en un link.

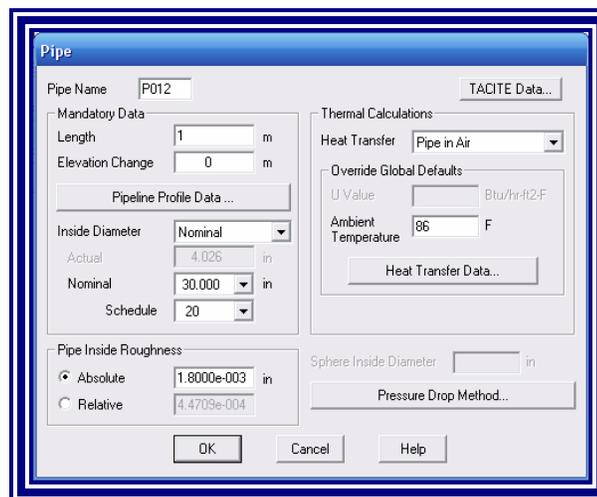


Figura 3.24 Cuadro de diálogo donde se muestra las especificaciones para las tuberías del múltiple de producción de ZEF-10.

Estos pasos fueron los mismos para todos los múltiples y válvulas multipuertos que se encuentran en las estaciones de flujo y descarga de los campos Zapato y Mata R para el nivel de presión 250 psi.

El siguiente paso es agregar toda la estación a la simulación, para esto se utilizaron los esquemáticos realizados de las estaciones de los campos Zapato y Mata R, para colocar las medidas tomadas de las tuberías, los accesorios y equipos existentes de acuerdo a su ubicación exacta. Para ello se colocó un nuevo nodo y el link, entre este nuevo nodo y el nodo del múltiple representa a la estación ZEF-10. Se agregaron todos los accesorios que se encuentran en la ruta crítica del nivel de 250 psi hasta la conexión con el gasoducto principal de 16", de acuerdo a los que se observan en la figura 3.6. En la figura 3.25 se aprecia que los accesorios agregados al simulador corresponde a los que están representados en el esquemático que aparece en la figura 3.26, desde la salida del múltiple hasta antes de entrar al separador.

	Device Name	Data Entry Window	On ?	Length (m)	Elevation Change (m)	Mw/D (m)	Depth (m)
0	J005	Junction					
1	P011	Pipe	✓	0.90	-0.90		
2	B012	Bend	✓				
3	P013	Pipe	✓	5.80			
4	B014	Bend	✓				
5	P015	Pipe	✓	2.90			
6	B016	Bend	✓				
7	P017	Pipe	✓	2.90	2.90		
8	B018	Bend	✓				
9	P019	Pipe	✓	0.57			

Figura 3.25 Accesorios agregados a la simulación para representar a la estación ZEF-10.

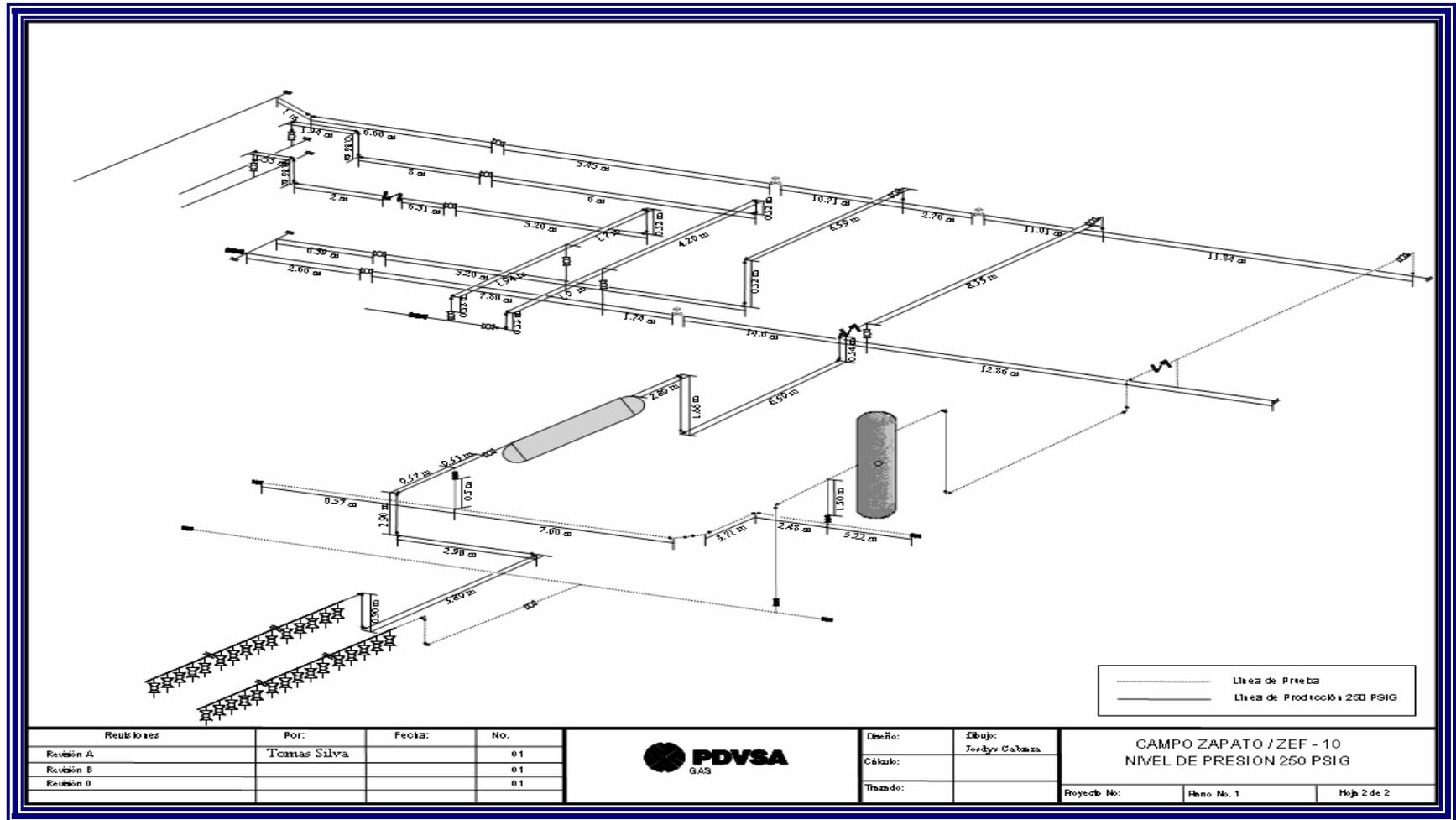


Figura 3.26 Esquemático de la estación ZEF-10.

De esta manera se elaboró la simulación del resto de las estaciones, gasoductos de recolección y plantas compresoras.

3.1.1.4 Validación de la red tradicional

Este es el último paso para dar por terminado el montaje de la red de simulación; una vez que el simulador resolvió el balance hidráulico, en función de los valores proporcionados a la red, se procedió a ajustar el comportamiento del sistema. Para poder hacer uso del modelo de simulación y tener la plena seguridad de los resultados obtenidos, se debe validar la red; es decir, se debe ajustar a las condiciones reales de trabajo, en el caso de ésta, se emplearon las condiciones de operación actuales en las estaciones suministradas por el Departamento de Operaciones San Tomé, las cuales se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores de presión real en las estaciones

Estación	Volumen de gas (MMPCND)	Volumen de agua (BNPD)	Volumen de crudo (BNPD)	Presión (psi)
ZEF-7	2,22	7	13	270
ZEF-8	1,01	17	26	260
ZEF-10	5,33	77	32	270
ZED-7	19,94	136	247	270
ZEF-11	3,05	154	107	275
W-4	26,44	77	153	300
X-8	40,32	99	321	300
B-12	16,98	123	153	310

El ajuste se llevo acabo comparando los flujos y presiones de operación actuales, con los arrojados por el balance hidráulico en las fuentes, realizando varias corridas variando parámetros con los que cuenta Pipephase, como la ecuación de caída de presión, paquete termodinámico, rugosidad de la línea y eficiencia de flujo. Hasta alcanzar los valores más cercanos a la realidad de las operaciones de los campos Zapato y Mata R.

De esta manera se logró que las tuberías diseñadas por el Proyecto Gas Anaco y que se encuentran actualmente en uso, sin que el Centro Operativo Zapato Mata R éste activo, posean en la simulación un comportamiento lo mas cercano a su comportamiento actual y que se refleje en ellos los efectos de su utilización temprana, como variaciones en la rugosidad y eficiencia, producto de la acumulación de líquidos, desgastes, etc.

Una vez terminada la red de simulación actual, se procedió a elaborar la red diseñada por PGA tomando como premisa los parámetros utilizados en el diseño de éste durante la ingeniería de detalle, (flujos, presiones, temperaturas, accesorios y diámetros y distancias de las líneas). Con la finalidad de contar con la última actualización hecha a dicha red, y verificar así el impacto real de la nueva volumetría. Es importante resaltar que no se toco las variaciones o ajustes hechos a los gasoductos activos PGA en el sistema de recolección actual. Los pasos para el montaje de la red actualizada en Pipephase, fueron los siguientes:

3.1.2 Elaboración del modelo de simulación de la red de recolección propuesta por PGA

3.1.2.1 Definición del modelo de red

El montaje se realizó en la misma hoja de trabajo por lo que el modelo de simulación ya está definido, además la red PGA se ajusta a esta definición ya que posee la misma complejidad de interconexiones, el fluido de estudio sigue siendo una mezcla de varios compuestos orgánicos e inorgánicos con componentes condensables y resultados deben ajustarse a las unidades trabajadas en la empresa.

3.1.2.2 Selección de componentes presentes en el fluido de trabajo

Se trabajó con la misma cromatografía utilizada para la elaboración del modelo de simulación de la red actual.

3.1.2.3 Elaboración de las redes PGA en el simulador

➤ Fuentes y sumideros del sistema

Las fuentes, en el paquete de simulación, están representadas por las descargas de la producción al sistema, en la red de tuberías PGA, están representados por las válvulas multipuertos futuras, ubicadas en cada estación de recolección.

Los datos volumétricos cargados en la simulación en cada estación de recolección, fueron tomados de la memoria de cálculo emitida por la consultora Tecnoconsult para el Proyecto Gas Anaco, durante la ingeniería de detalle, la cual representa el 1.2%, del flujo máximo de PDO 2005 - 2024 (el cual se muestra en el

anexo E), y están reflejados en las tablas 3.5 y en la tabla 3.6, se aprecian las condiciones de presión y temperatura asociados a las estaciones durante dicho diseño.

Tabla 3.5 Volumetría usada para el modelo de simulación PGA^[16,17]

Estación	Año	Máxima producción de gas (PDO 2005 – 2024)			Flujo de diseño (1,2% de flujo máximo PDO)		
		Gas (MMPND)	Crudo (BNP)	Agua (BNPD)	Gas (MMPND)	Crudo (BNP)	Agua (BNPD)
ZEF-7	2016	11,17	249,10	425,90	13,40	298,92	511,08
ZEF-8	2014	27,02	298,95	460,58	32,43	358,74	552,69
ZEF-10	2012	20,80	226,09	315,92	24,96	271,31	379,10
ZED-7	2005	26,79	396,80	393,18	32,14	476,16	471,81
ZEF-11	2015	11,58	194,48	315,48	13,90	233,38	378,57
ZEF-14	2016	49,51	611,69	1045,83	59,41	734,03	1255,00
ZEF-9	2015	16,80	205,04	332,61	20,16	246,05	399,12
W-4	2011	97,63	968,02	1290,95	117,16	1161,63	1549,14
X-8	2010	102,36	1204,36	1534,79	122,83	1445,49	1841,74
B-12	2007	21,62	190,97	211,68	25,94	229,16	254,01

Tabla 3.6 Presiones y temperatura de cada fuente de las estaciones^[16,17]

Estación	Temperatura de gas (°F)	Temperatura de crudo (°F)	Temperatura de agua (°F)	Presiones asumidas en la ingeniería
ZEF-7	125	126	127	300
ZEF-8	102	100	100	300
ZEF-10	102	100	99	300
ZED-7	91	91	90	300
ZEF-11	97	96	98	300
ZEF-14	96	96	95	300
ZEF-9	97	98	98	300
W-4	122	120	119	300
X-8	112	112	113	300
B-12	93	97	96	300

En cuanto a los sumideros, representan la descarga de la producción, del sistema. Para la red PGA, está representado por las llegadas al Centro Operativo, de los flujos provenientes de los Campos Zapato y Mata R, los datos cargados a los sumideros fueron los que se muestran en la tabla 3.7

Tabla 3.7 Datos de los sumideros de la red PGA^[16,17]

Sumidero	Presión (psi)	Flujo (lb/hr) utilizados en la ingeniería
Zapato	250	32.063.729,94
Mata R	250	3.793.105,17

➤ **Equipos, gasoductos y accesorios del sistema**

En el Área Zapatos se ubicarán siete (7) Estaciones de Recolección (ZEF-14, ZEF-11, ZED-7, ZEF-7, ZEF-8, ZEF-9, ZEF-10), en las cuales solo se realizarán pruebas de pozo, por tal motivo en sus instalaciones se encontrarán dos separadores destinados a la prueba tanto del nivel de 60 psi como para el nivel de 250 psi.

Por otro lado, desde las estaciones de recolección, del campo Zapato, se enviará el flujo multifásico a la Estación de Flujo Zapatos, en la cual se realizarán operaciones de separación bifásica y bombeo de líquido (crudo + agua) hacia la estación centralizada Zapatos - Mata R, la cual formará parte del nuevo Centro Operativo Zapatos - Mata R, conjuntamente con el área de compresión de gas.

Y el desde las estaciones del campo Mata R (B-12, W-4, X-8), se enviara directamente el flujo multifásico a el centro operativo, por gasoductos de 12” y de 20”, como se tiene previsto hasta la fecha.

En la estación centralizada se realizara todas las operaciones restantes necesarias para la producción que actualmente se realiza en las plantas compresoras, y estaciones de descarga y de flujo existentes en los campos zapato y mata R, que ayudan a cumplir con la producción requerida por el mercado interno. ´

Se consideró la infraestructura que debería existir desde las válvulas multipuertos ubicadas en cada estación de recolección hasta las llegadas a las trampas del Centro Operativo zapato Mata R.

En las figuras 3.27 se observa las diez estaciones que conforman los campos Zapato y Mata R que estarán involucradas en el Centro Operativo, a demás se distingue toda la red de recolección, las líneas en construcción y los gasoductos que se encuentran en uso actualmente que pertenecen a la red diseñada por el Proyecto Gas Anaco.

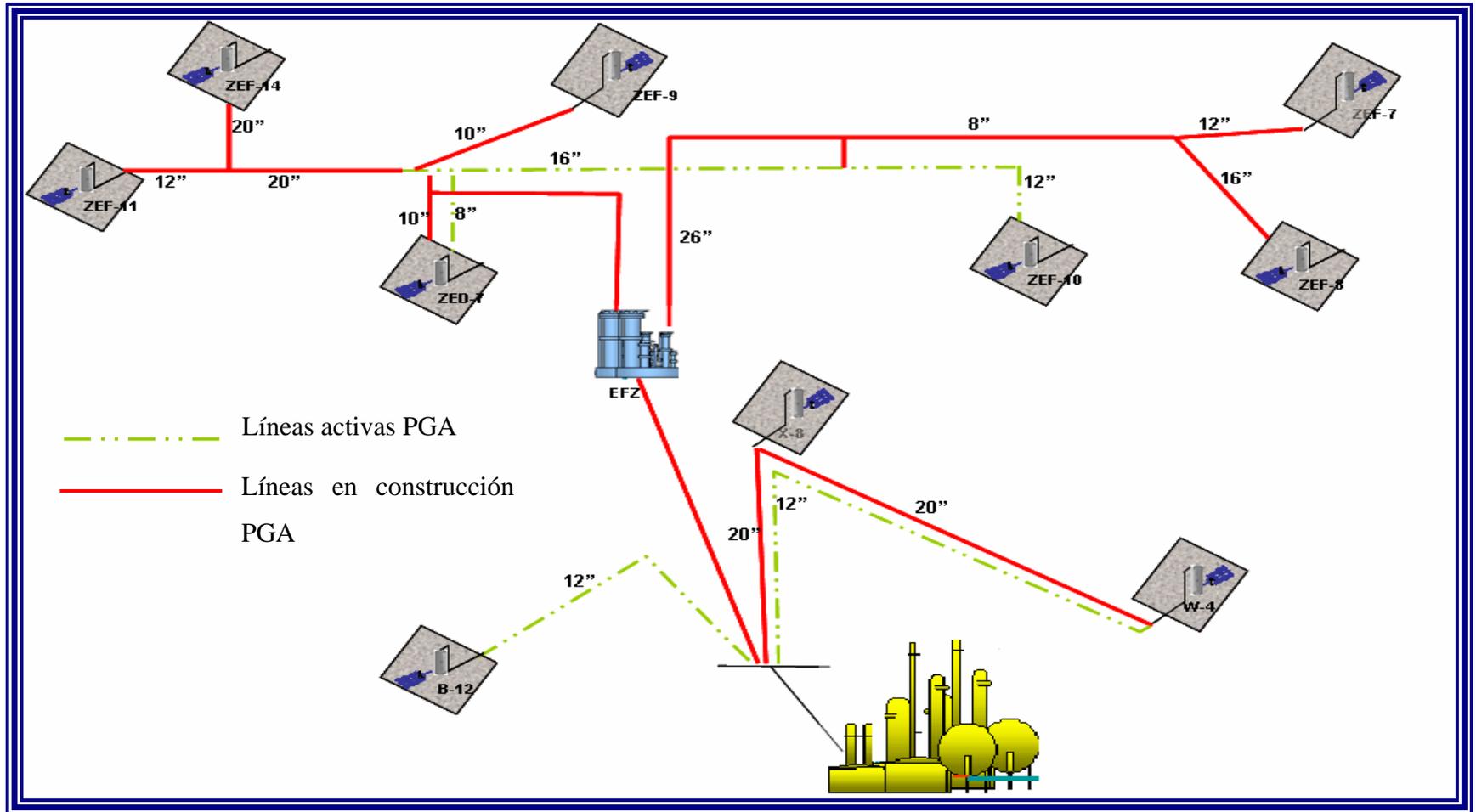


Figura 3.27 Esquemático del Centro Operativo Zapato Matar, detallando líneas en uso.

Toda esta red esta formada por una cantidad de accesorios, gasoductos y equipos que ejercen un efecto considerable en la caída de presión del sistema, por lo que debieron ser incorporados al modelo de red elaborado. Y se realizó del mismo modo como fueron cargados los accesorios de las estaciones y líneas tradicionales.

La información necesaria para elaborar estaciones y líneas de recolección en la simulación se obtuvo de planos facilitados por el departamento de Proyecto Gas Anaco, como el que se muestra en la figura 3.28, ya que gran parte de los gasoductos y las estaciones de recolección están en construcción.

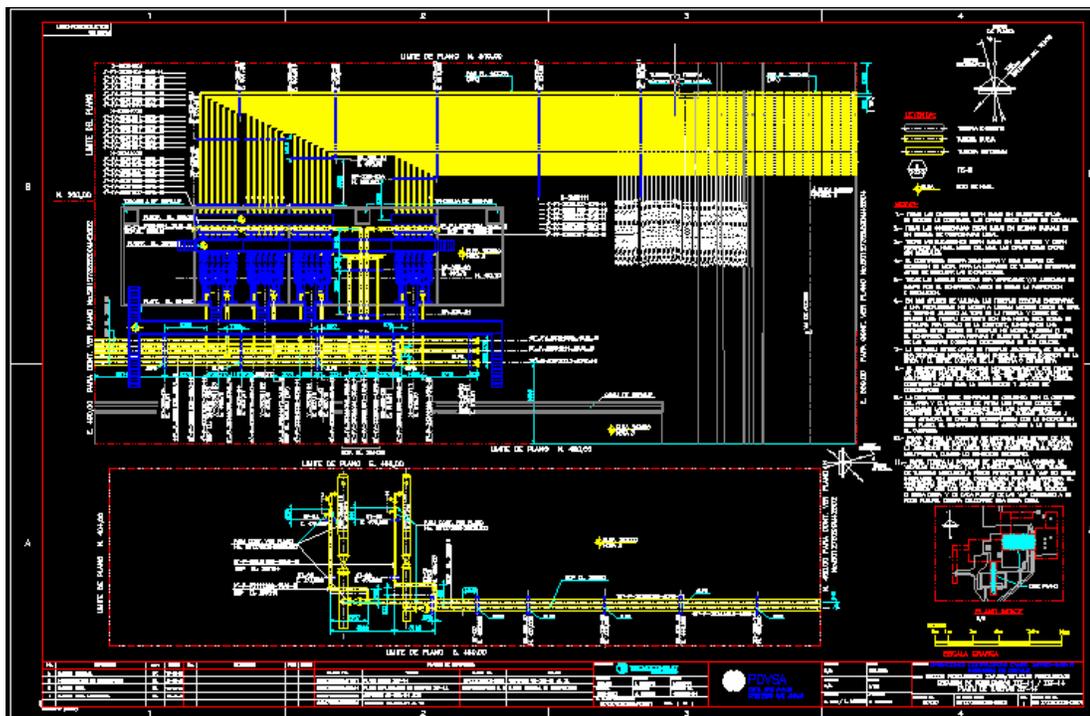


Figura 3.28 Imagen de uno de los planos utilizados para conocer las especificaciones de las estación de recolección propuestas por PGA

Es importante destacar que las llegadas al centro operativo, debía ser simulada hasta el cabezal de succión de los separadores, por requerimientos de la empresa, pero el personal del departamento de PGA, no cuenta con esta información por retrasos en el diseño del COZMR, y no había ninguna seguridad con respecto a las dimensiones de dicho cabezal por lo que se realizó hasta la entrada a las trampas tomando cada llegada de manera independiente resultando por tal motivo 4 sumideros. Independiente en vez de uno como debió ser.

La simulación se dio por terminada, cuando el simulador después de hacer cálculos e iteraciones logró conseguir las presiones de salida de las fuentes y los volúmenes a la llegada al COZMR, que satisfacen el balance hidráulico.

3.1.2.4 Validación del modelo de simulación representativo del sistema de recolección propuesto por PGA

Los datos usados en el caso de la red propuesta por PGA, fueron los parámetros de diseño reflejados en la etapa de ingeniería de detalles, ya que se necesitaba la red ajustada al diseño de detalles donde se usaron los flujos de PDO 2005 – 2024. Los valores establecidos en el diseño para cada estación de recolección fueron los señalados en la tabla 3.8.

Tabla 3.8 Parámetros de diseño de la red PGA usados para la validación ^[18]

Estación	Volúmenes			Presiones (psig)
	Gas (MMPCND)	Crudo (BNPD)	Agua (BPND)	
ZEF-7	13,4	298,92	511,08	280,80
ZEF-8	32,43	358,74	552,69	279,40
ZEF-10	24,96	271,31	379,10	270,40
ZED-7	32,14	476,16	471,81	267,80
ZEF-11	13,90	233,38	378,57	275,60
ZEF-14	59,41	734,03	1255,00	280,40
ZEF-9	20,16	246,05	399,12	272,40
W-4	117,16	1161,63	1549,14	271,87
X-8	122,83	1445,49	1841,74	261,98
B-12	25,94	229,16	254,01	266,13

3.1.3 Evaluación de los parámetros hidráulicos frente al impacto del PDO 2006-2025

Para llevar a cabo la evaluación, se utilizaron los flujos a manejar según el nuevo periodo de operaciones del centro operativo, reflejados en las tablas 3.9 y 3.10, (extraídos del Portafolio de Oportunidades de 2006-2025, aprobado por la Gerencia de Producción Gas Anaco) realizando corridas con el simulador para los flujos picos, (máximo representado por el año 2014 y mínimo que corresponde al último año de operaciones) y verificando los valores de velocidad de la mezcla, velocidad erosional, caída de presión, acumulación de líquido y regímenes de flujo, comparándolos con las normas PDVSA, de las tuberías más importantes.

Tabla 3.9 Máximos flujos estimados del PDO 2006 – 2025 (año 2014)

Estación.	Volumetría		
	Gas (MMPCNG)	Crudo (BNPD)	Agua (BNPD)
ZEF-11	21,16	226,00	222,00
ZEF-7	23,41	112,00	110,00
ZEF-14	12,75	338,00	333,00
ZEF-8	0,00	0,00	0,00
ZED-7	25,58	240,00	236,00
ZEF-10	10,19	247,00	243,00
ZEF-9	12,34	115,00	113,00
W-4	50,90	268,00	264,00
X-8	61,60	410,00	403,00
B-12	5,30	146,00	143,00

Tabla 3.10 Flujo mínimos estimados, del PDO 2006 – 2025 (año 2025)

Estación	Volumetría		
	Gas (MMPCNG)	Crudo (BNPD)	Agua (BNPD)
ZEF-11	5,20	19,00	29,00
ZEF-7	5,70	10,00	14,00
ZEF-14	3,10	37,00	56,00
ZEF-8	0,00	0,00	0,00
ZED-7	7,70	21,00	31,00
ZEF-10	2,50	21,00	32,00
ZEF-9	3,00	10,00	15,00
W-4	13,90	36,00	54,00
X-8	15,10	35,00	53,00
B-12	3,60	35,00	52,00

Los parámetros obtenidos fueron comparados con las siguientes especificaciones:

➤ **Velocidad de la mezcla y velocidad erosional**

La experiencia indica que un importante límite superior de velocidad de proceso, es la llamada “velocidad de erosión”, que equivale presumiblemente a una velocidad por encima de la cual ocurriría una erosión excesiva, la cual puede producir que la tubería falle en las “tes”, codos, etc.

Los efectos erosivos se mencionan en la literatura; pero el mecanismo nunca se describe. Existe una corrosión por velocidad inducida; las partículas de virutas, arena o afines podrían convertirse en agente de erosión. Mientras que en el flujo bifásico, que es el caso del flujo de estudio, las pequeñas gotas de líquido podrían ser las responsables. Independientemente del mecanismo, no cabe duda de que la erosión puede ocurrir en tuberías de producción.

Los sistemas de flujo bifásico están casi siempre acompañados por erosión, especialmente en el caso de líneas de proceso diseñadas para transportar flujos a alta velocidad dentro de los regímenes anulares o de neblina. Si embargo dentro del paquete de normas que posee PDVSA (LTP 1.5) recomienda utilizar el siguiente criterio empírico se utiliza para evitar la posibilidad de erosión en una tubería de acero al carbono bifásica.

$$V_{sm} \pi \frac{160}{\sqrt{\rho m}}, \text{pies} / \text{seg}$$

donde:

V_{sm} : velocidad de la mezcla.

P_m: densidad de la mezcla homogénea.

La norma PDVSA, también especifica que no existen mecanismos completamente recomendables o más específicos para evitar la erosión ya que las características del sistema bifásico, el tipo de servicio y el material de la tubería tienen una relación importante en las consideraciones de erosión, pero son muy difíciles de correlacionar.

Sin embargo, en el Departamento de Optimización y Arranque utiliza una de las recomendaciones señaladas en otra de las normas (PDVSA 90616.1.024) por las cuales se rige la empresa PDVSA, en ella se indica que: “las reglas para limitar las velocidades erosivas son pocas y carecen de fundamento experimental. Pero cuando la limitación de ruido sea una consideración importante, se recomienda velocidades comprendidas entre 50 y 60% de la velocidad de erosión”^[9].

Por recomendación y basándose en la experiencia del personal que labora en el Departamento de Optimización y Arranque, se trabajó con esta última norma mencionada, limitando la velocidad de la mezcla al 60% de la velocidad de erosión.

➤ **Caída de presión**

La caída de presión afecta el rendimiento efectivo del flujo hasta su punto de descarga, puede llegar a disminuir la velocidad de la mezcla y causar acumulaciones de líquido a lo largo de un tramo de tubería. Se establece el rango permitido para la caída de presión^[9]. En la tabla 3.11, se muestra las máximas caídas de presión recomendadas por PDVSA, según la presión de un sistema determinado. Considerando que el sistema con el que se trabajó fue de 250 psig, entonces la máxima caída de presión que se puede alcanzar por cada 100 pies es de 1,5psi.

Tabla 3.11 Máxima presión recomendada por cada 100 pies de tuberías.

Presión del sistema	ΔP máximo (psi/ 100 pies)
0-50	0,10
50 - 150	0,50
150-200	0,60
200-500	1,50
>500	2,00

➤ **Acumulación de líquido**

La acumulación de líquido también causa una incidencia en la velocidad del fluido, causando taponamiento y por ende reducción del diámetro de la línea, y esto afecta directamente la caída de presión en un tramo de tubería. Para este punto no existe un parámetro con el cual comparar o una norma que lo rijan, simplemente se determinaron las líneas con mayor acumulación de líquido, comparando longitud de la tubería y cantidad acumulada.

➤ **Regímenes de flujo**

En flujo bifásico (líquido/vapor), las interacciones entre la fase líquida y el vapor, por estar influenciadas por sus propiedades físicas y caudales de flujo y por el tamaño, rugosidad y orientación de la tubería, causan varios tipos de patrones de flujo. Estos patrones se llaman regímenes de flujo. En un determinado punto en una línea, solamente existe un tipo de flujo en cualquier tiempo dado. Sin embargo, como las condiciones de flujo cambian, el régimen de flujo puede cambiar de un tipo a otro.

Existen varios regímenes de flujo que puede ocasionar fluctuaciones de presión y vibración, especialmente en la entrada de recipientes y en codos, válvulas y otras restricciones de flujo. Esto pudiera traer serios deterioros al equipo y problemas de operación. Por lo que resulta importante determinar los flujos que dominan en un

tramo de tubería para aplicar medidas en el caso de que se presente algún conveniente y verificar su efecto en la norma ^[20].

3.2 Mejoras en la red de recolección propuesta por PGA, que garanticen la eficiencia de las operaciones del centro operativo Zapato Mata R

Para presentar propuestas se debió analizar los resultados arrojados por el simulador con respecto a la velocidad máxima de la mezcla, a la acumulación excesiva de líquido y a la caída de presión Para verificar el cumplimiento de los criterios establecidos en las normas PDVSA 90616.1.024 y LTP 1.5.

Se procedió a presentar dos tipos de propuestas una relacionada con cambios de diámetros, realizando un estudio de sensibilidad a manera de obtener parámetros adecuados para las operaciones del centro operativo, semejante a las soluciones planteadas por el personal de TECNOCONSULT, empresa encargada de estudiar el impacto de la variación de PDO anterior (2005-2024), y la segunda asociadas a desvíos de producción por gasoductos ya diseñados en la red, con el fin de continuar con las construcciones previstas y afectar lo menos posible el avance del proyecto. Las propuestas planteadas fueron las siguientes:

3.2.1 Cambios de diámetros.

Para conocer y entender los cambios que se plantean en la red se deben conocer los diámetros y definiciones dadas a las líneas por el simulador. Una red tan compleja como la que se estudio presenta una gran cantidad de tuberías y gasoductos, pero los que se muestran en las figuras 3.29 y 3.30 y tablas 3.12 y 3.13, a los gasoductos de recolección de producción tanto principales como los de salida de cada estación.

Tabla 3.12 Datos de las líneas del campo Mata R.

Líneas	Diámetro (pulgadas)	Origen	Destino	Longitud (m)
L193	12	B-12	COZMR	2060
L089	26	X-8	Trampa X-8	200
L222	20	Trampa W-4	Trampa X-8	550
L205	12	Trampa W-4	COZMR	2450
L239	12			2450
L013	26	Trampa X-8	COZMR	2200

Tabla 3.13 Datos de las líneas del campo Zapato.

Líneas	Diámetro	Origen	Destino	Longitud (m)
L104	12"	ZEF-11	Unión con ZEF-14	359.00
L318	20"	ZEF-14	Unión con ZEF-11	3784.29
L105	20"	Unión entre ZEF-11 y ZEF-14	J003	4819.24
L196	16"	ZED-7	Trampas ZED-7	283.00
L326	10"	ZEF-9	J003	2083.80
L045	10"	Trampas ZED-7	J003	1056.56
L060	8"	Trampa ZED-7	J003	1056.56
L049	26"	J003	EFZ	3803.17
L298	20"	J004	EFZ	1362.05
L023	16"	J003	J004	3170.83
L295	8"	J005	J004	1300.00
L030	16"	J005	J004	1192.69
L306	16"	ZEF-8	J005	5042.04
L031	12"	ZEF-7	J005	4030.01
L061	36"	EFZ	COZMR	4500.00

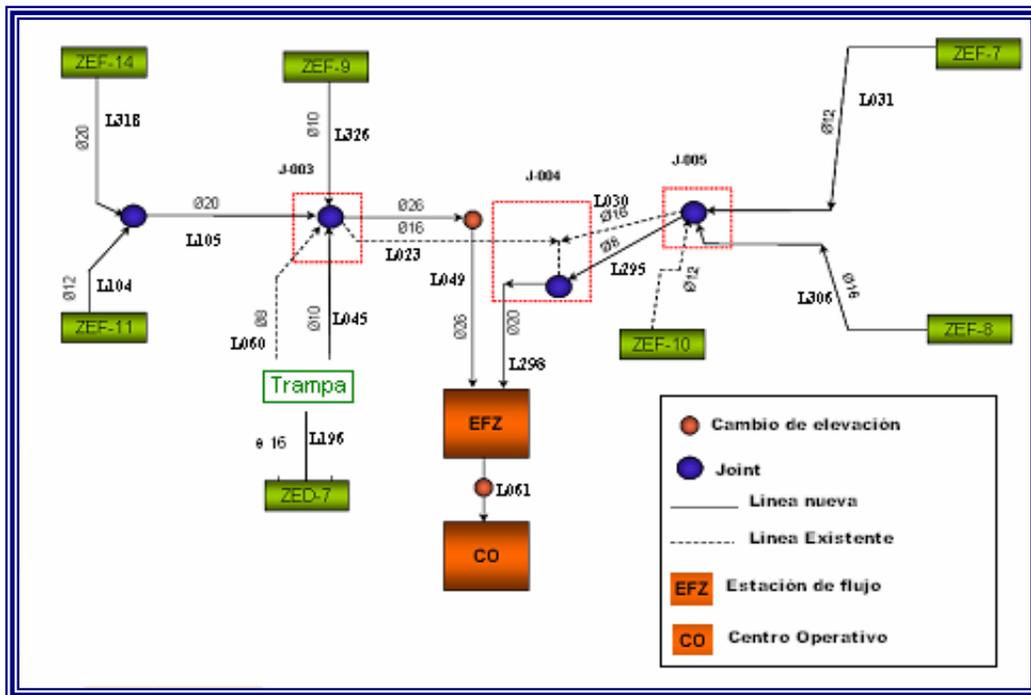


Figura 3.29 Esquemático del Campo Zapato al nivel de presión 250 psig, diseñado por el Proyecto Gas Anaco.

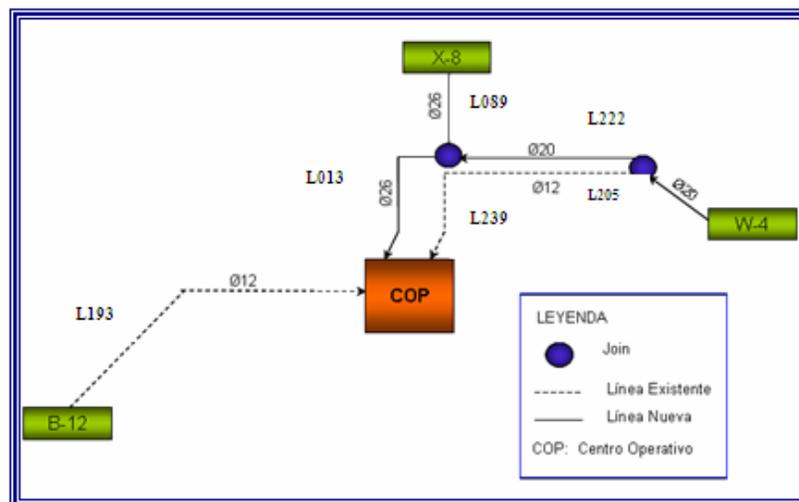


Figura 3.30 Esquemático del campo Mata R, para el nivel de presión 250 psig, diseñado por el Proyecto Gas Anaco.

Las líneas que se sometieron a sensibilidad fueron las que se muestran en la tabla 3.14, las cuales se obtuvieron de la evaluación anteriormente realizada.

Tabla 3.14 Líneas sujetas a sensibilidad de los campos Zapato y Mata R.

Campo	Líneas	Diámetros (pulgada)
ZAPATO	L318	20
	L105	20
	L049	26
	L061	36
	L023	16
MATA R	L013	26

Una vez determinada las líneas sujetas a estudio, se utilizó el simulador PIPEPHASE versión 9.2, evaluando tanto los flujos máximos como los mínimos del PDO 2006-2025. La selección del diámetro de las líneas se realizó tomando en cuenta el régimen de flujo, la velocidad de la mezcla, la velocidad erosional, la caída de presión máximas permitidas considerando como parámetro de evaluación las normas PDVSA 90616.1.024 y LTP 1.5.

3.2.2 Desvíos de producción

Esta parte del proyecto consistió en determinar que gasoductos podrían dejarse activos, con base al diseño ya establecido por PGA, sin afectar las operaciones del Centro Operativo, mejorar las condiciones de trabajo de las tuberías y resolver los problemas detectados tras la evaluación del impacto producto de la variación del PDO.

Para cumplir con este objetivo se planteó una serie de posibles desvíos, que consistió en eliminar gasoductos de la red de producción diseñada durante la ingeniería de detalles del proyecto, y enviar la producción de varias estaciones por otros cabezales, y luego se procedió al estudio de estas propuestas, haciendo uso de las simulaciones elaboradas considerando el diseño relanzado por TECNOCONSULT y la nueva volumetría a utilizar por el Centro Operativo.

Las propuestas planteadas se muestran en las figuras 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 y 3.35.

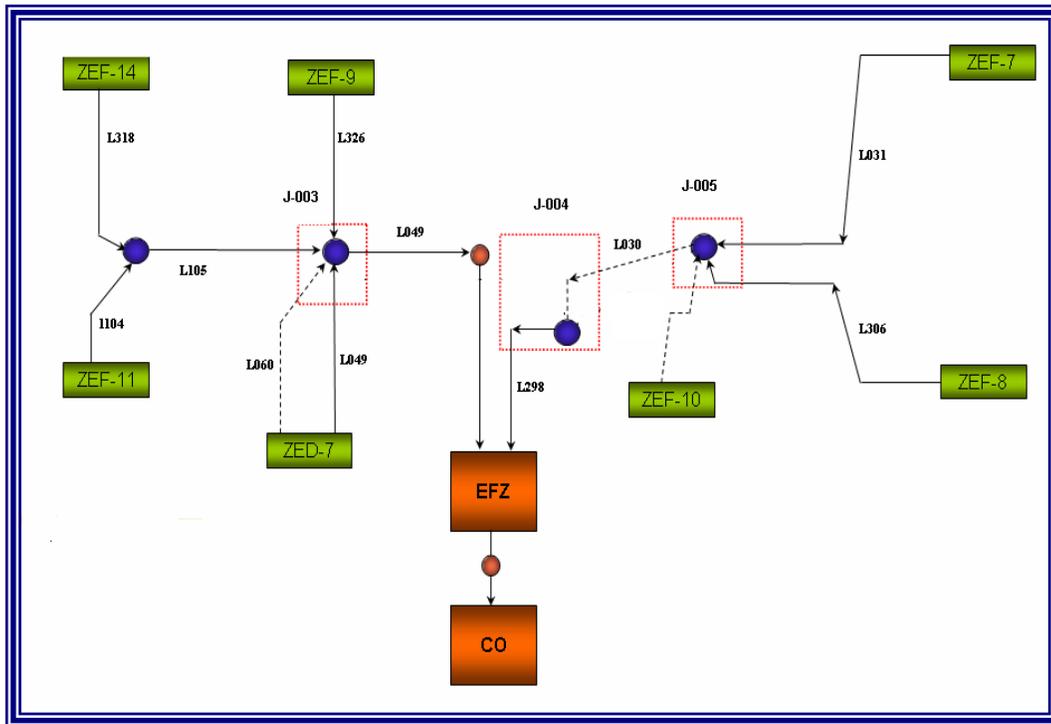


Figura 3.31 Primer esquema de recolección propuesto para el campo Zapato.

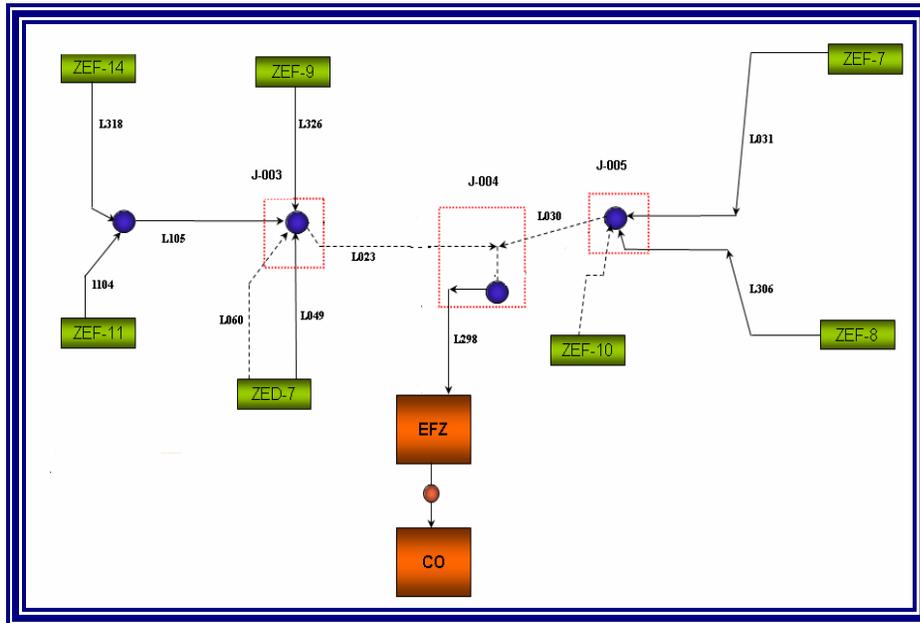


Figura 3.32 Segundo esquema de recolección propuesto para el campo Zapato.

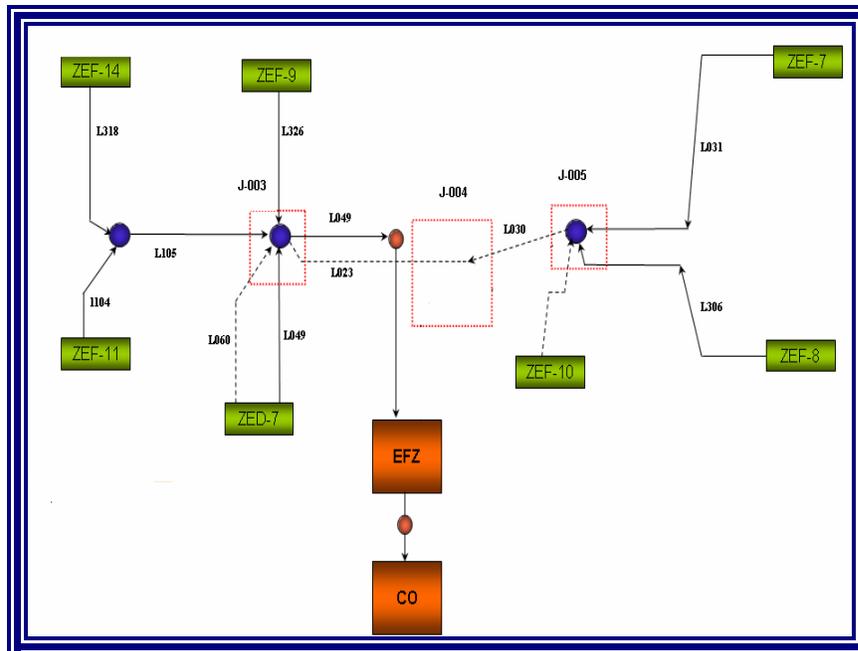


Figura 3.33 Tercer esquema de recolección propuesto para el campo Zapato.

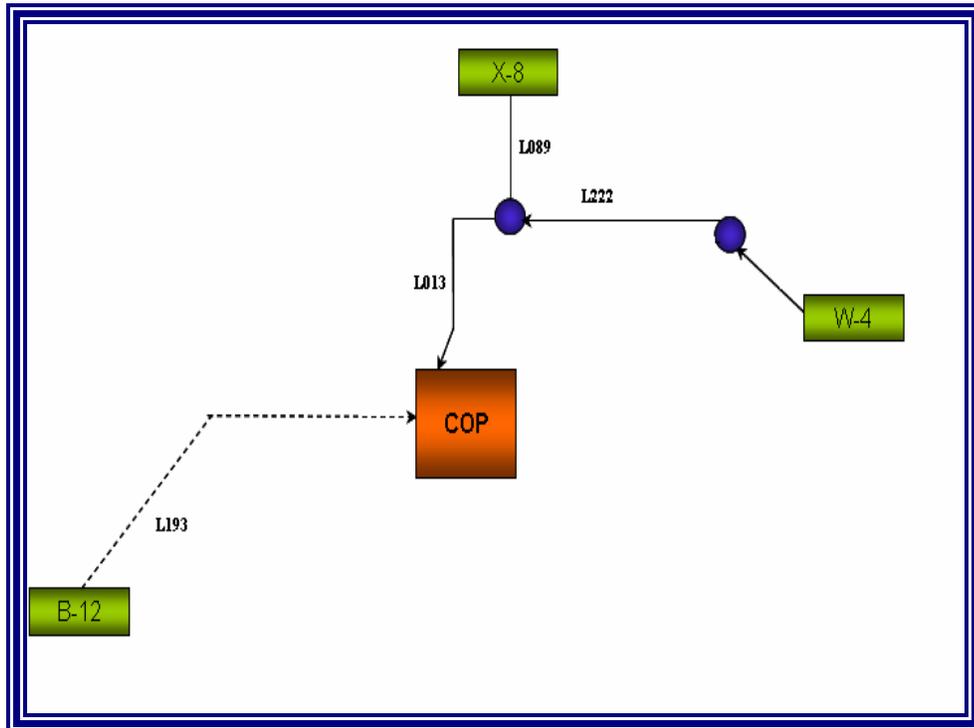


Figura 3.34 Primer esquema de recolección propuesto para el campo Mata R.

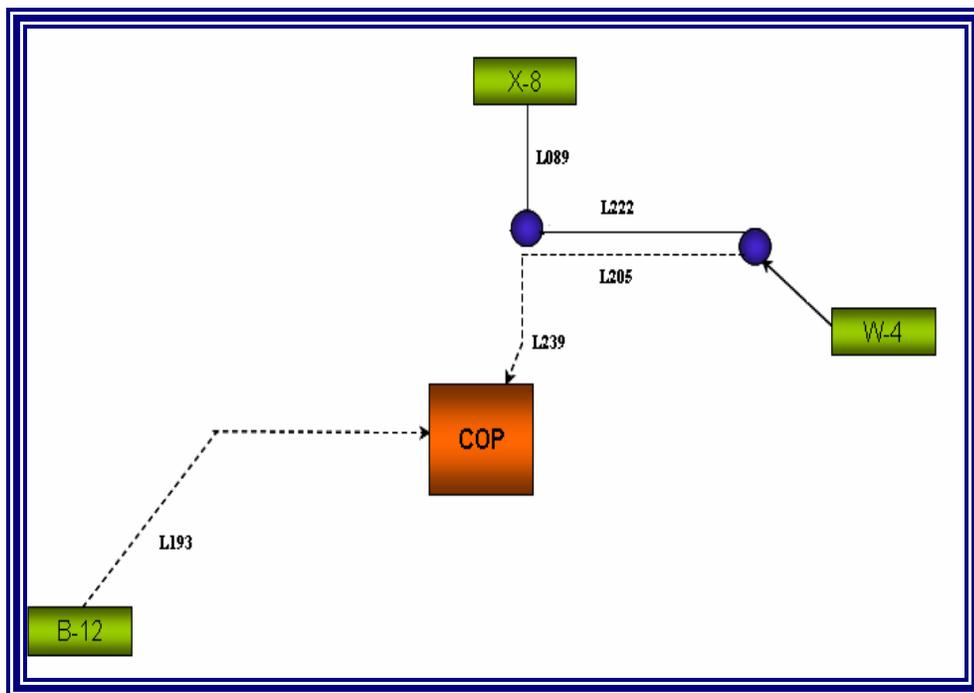


Figura 3.35 Segundo esquema de recolección propuesto para el campo Mata R.

Los esquemas planteados se evaluaron tanto para el máximo como para el mínimo flujo del nuevo PDO 2006 – 2025, a manera de determinar cual seria la mejor opción.

3.3 Interconexiones entre las estaciones de recolección propuesta por GA, y las estaciones de flujo y descarga existentes, en los campos Zapato y Mata R para el periodo de prearranque del centro operativo

Previo a las operaciones de arranque normal de la planta, para verificar que los equipos están en capacidad de operar a las condiciones requeridas por el proceso deben llevarse a cabo tanto en la Estación Centralizada Zapatos Mata R, como en las estaciones de recolección ciertas pruebas.

Durante el periodo de prueba, o preparación para el arranque, se realizaran las siguientes actividades^[21]:

➤ Prueba hidrostática.

Esta prueba se realiza con la finalidad de detectar si existe alguna falla en el diseño, fugas o en la fabricación del sistema. La prueba debe realizarse a todos los equipos. Los fabricantes de estos equipos deben presentar al cliente el procedimiento para su realización.

- Prueba hidrostática.
- Lavado (flushing)
- Prueba de fuga.

Luego de finalizada la etapa de prueba de los equipos, se inicia el arranque normal de la estación, desplazando con gas el nivel de agua que permanece en los equipos al finalizar la prueba de fuga. El desplazamiento con gas se realiza con la finalidad de establecer las condiciones de operación en los sistemas y arrancar el proceso. Para esta fase se deben contar con conexiones provisionales a los sistemas existentes, a manera de utilizar los trenes de separación gas – líquido, con los cuales no cuenta las estaciones de recolección futuras, y mantener la continuidad de operaciones del campo para cumplir con las responsabilidades de entrega de gas al mercado interno.

Para determinar los puntos más idóneos de las interconexiones entre las estaciones de recolección propuestas por PGA y las estaciones actuales, se utilizarán los planos aprobados para construcción de las estaciones, debido a que no existe infraestructura de PGA construida en el campo Zapato-Mata R, tomando las medidas exactas de los tramos de tubería y demás accesorios como válvulas y codos.

Una vez determinado los puntos de las conexiones, las distancias y accesorios, se procedió hacer un análisis hidráulico de las propuestas realizadas siguiendo los pasos realizados anteriormente para la evaluación hidráulica, utilizando la volumetría correspondiente al año de inicio de las operaciones centralizadas, el cual según la información que se maneja en el departamento de Optimización y Arranque será para finales del 2011. En la tabla 3.15 se muestra dichos flujos.

Tabla 3.15 Flujos usados para seleccionar la opción más apropiada para las interconexiones.

Estaciones	Máximo flujo, asociado al año 2011		
	Gas (MMPCND)	Crudo (BND)	Agua (BND)
ZEF-11	3,30	61,00	58,00
ZEF-7	8,90	131,00	122,00
ZEF-14	11,70	296,00	277,00
ZEF-8*	5,50	49,00	34,00
ZED-7	23,50	82,00	77,00
ZEF-10*	10,20	261,00	251,00
ZEF-9*	11,70	95,66	91,98
W-4	64,00	311,00	291,00
X-8	90,50	801,00	750,00
B-12	0,50	2,00	2,00
TOTAL	3,30	61,00	58,00

* Corresponden a años diferentes al año de arranque del COZMR debido a carencia de producción en el caso de ZEF-8 y ZEF-10 y para ZEF-9 se hizo una aproximación de producción de Agua y crudo.

Se realizó una matriz de evaluación con los parámetros hidráulicos como caída de presión, velocidad erosional, velocidad de la mezcla, acumulación de líquido y régimen de flujo.

La evaluación consistió en realizar una sensibilidad, realizando varias corridas con diferentes diámetros para las interconexiones planteadas, usando diámetros menores al diámetro de la línea PGA en cuestión en cada estación y de esta manera seleccionar la más apropiada de acuerdo a las normas recomendadas por la empresa. Los diámetros tomados para las simulaciones se muestran en la tabla 3.16.

Tabla 3.16 Diámetros plantados para la evaluación.

Estación	Dirección	Diámetro (pulgadas)
ZEF-11	PGA - ACTUAL	12
		10
		8
		6
	ACTUAL PGA	12
		10
		8
		6
ZEF-14	PGA - ACTUAL	12
		10
		8
	ACTUAL PGA	12
		10
		8
ZEF-9	PGA - ACTUAL	10
		8
		6
	ACTUAL PGA	10
		8
		6
ZED-7	PGA - ACTUAL	16
		12
		10
	ACTUAL PGA	16
		12
		10
ZEF-10	PGA - ACTUAL	12
		10
		8
ZEF-8	PGA - ACTUAL	12
		10
		8
	ACTUAL PGA	12
		10
		8

Tabla 3.16 Diámetros planteados para la evaluación (continuación).

Estación	Dirección	Diámetro (pulgadas)
W-4	PGA - ACTUAL	16
		12
		10
X-8	PGA - ACTUAL	16
		20
		10
	ACTUAL PGA	16
		12
		10
		20
B-12	PGA - ACTUAL	10
		8
		6
ZEF-7	PGA - ACTUAL	12
		10
		8
		6
	ACTUAL PGA	12
		10
		8
		6

CAPITULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.1 Problemas operacionales de la red de recolección propuesta por PGA, de los campos Zapato – Mata R, ante la nueva volumetría establecida para las operaciones centralizadas.

Anteriormente el cambio de Portafolio de Oportunidades (PDO), provocó un rediseño en las tuberías como se muestran en la tabla 4.1, producto de un incremento de producción. Pero el nuevo PDO 2006-2025, presenta un descenso de gas del 32.38% para el campo Zapato y un 48,37% para el campo Mata R^[15], como se muestra en la figura 4.1, el cual representa el producto primordial en las operaciones centralizadas propuestas.

Tabla 4.1 Tabla comparativa entre diámetros calculados durante la ingeniería básica y de detalle para las líneas de recolección del COZMR^[15]

Línea		Ing. de detalles	Ing. básica
Origen	Destino	Diámetro (pulg)	Diámetro (pulg)
ZEF-14	ZEF-11	20	8
ZEF-14	J-003	20	16
ZEF-11	Línea de 20 proveniente de ZEF-14	12	8
ZEF-9	J003	10	No se contemplaba producción desde ZEF-9.
J003	J004	16 (existente)	16 (existente)
J003	Estación de flujo Zapato	26	10
ZED-7	J003	8 (existente)	8 (existente)
ZED-7	J003	10	8
ZEF-7	J005	12	8
ZEF-8	J005	16	8
ZEF-10	J005	12 (existente)	12 (existente)
J005	Estación de flujo Zapato	20	16
J005	J004	8	No se contemplaba esta línea.
W-4	W-4 *	20	16
W-4	X-8	20	10
W-4	COZMR	12 (existente)	12 (existente)

*Línea de recolección de la estación.

Tabla 4.2. Tabla comparativa entre diámetros calculados durante la Ingeniería básica y de detalle para las líneas de recolección del COZMR (continuación).

Línea		Ing. de detalles	Ing. básica
Origen	Destino	Diámetro (pulg)	Diámetro (pulg)
X-8	COZMR	26	16
B-12	COZMR	12 (existente)	12 (existente)

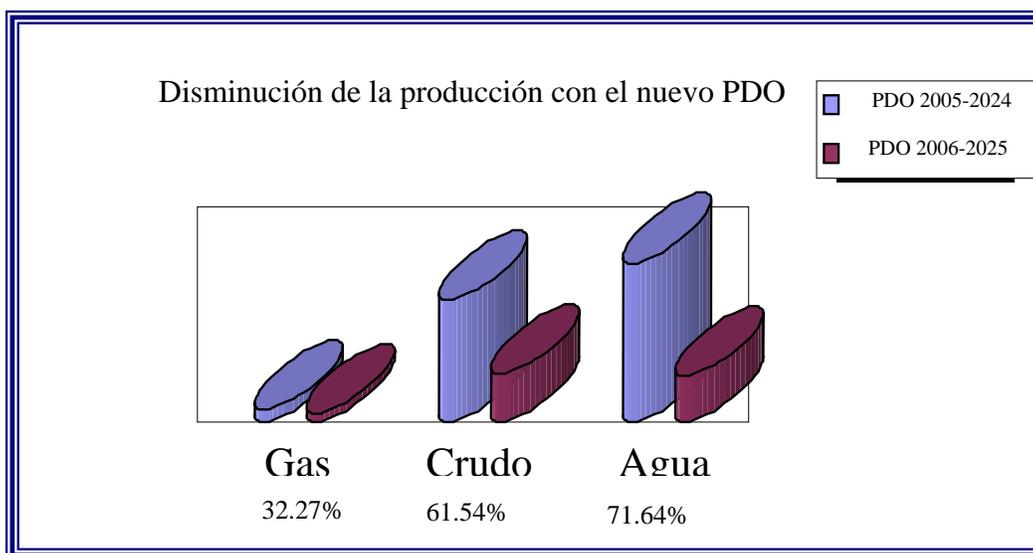


Figura 4.1. Porcentaje de disminución de la volumetría estimada para las operaciones centralizadas

Esta disminución y cambio de la volumetría pronosticada para las operaciones centralizadas, es producto de declinación de pozos y retardos en la construcción del COZMR, por tal motivo se realizó la evaluación hidráulica del sistema de recolección propuesto por PGA, ya que resultó imprescindible determinar si existía algún problema operacional falla, como taponamientos, excesiva retención de líquido, riesgos de erosión, pérdidas de presión en las líneas, exceso de velocidad de la

mezcla, etc. Todo con la finalidad de desarrollar propuestas que garanticen la continuidad de las operaciones del COZMR, y que se pueda cumplir con las entregas al mercado interno sin atrasos ni contratiempos.

Resultó necesario la elaboración de un modelo de simulación con el cual se pudiera evaluar el sistema de recolección propuesto por el Proyecto Gas Anaco, establecido en la ingeniería de detalles, el cual es actualmente considerado para la construcción del Centro Operativo Zapato Mata R, para la realización de esta simulación se debió considerar no solo las condiciones de diseño, sino también los efectos de operación temprana de una serie de gasoductos pertenecientes a esta red, pero que por la situación en la que se encuentran los gasoductos actuales, debieron ser activados para mantener las operaciones normales de los campos, es por tal motivo que se debió previamente realizar el modelo de simulación representando la red de recolección actual, desde los múltiples de producción hasta los cabezales de succión de las plantas compresoras ajustando toda la red a los parámetros operacionales actuales. Los resultados de cada montaje fueron los siguientes:

4.1.1.1 Modelo de simulación actual

Una vez incorporada toda la geometría de la red, incluyendo estaciones y plantas compresoras y obtenidos los resultados del balance hidráulico del simulador *pipephase*, con los datos de cada estación de recolección, se procedió a buscar la correlación de flujo que acercará las presiones arrojadas por el paquete de simulación en las fuentes de la simulación, a las condiciones de operación actuales en las estaciones de los campos.

Para ello se elaboró una matriz de evaluación, realizando corridas para cada una de las ecuaciones con las que cuenta *Pipephase* para definir la caída de presión del sistema, hasta obtener la que proporcionaba un porcentaje de desviación menor.

En la tabla 4.2, se muestra los resultados reportados por el simulador tras usar las correlaciones con las que cuenta el simulador, y se indica el porcentaje de desviación correspondiente con los valores de presión operación actual. En esta tabla se observa que existe una serie de correlaciones para las cuales la simulación no converge esto debido a que son ecuaciones que no fueron diseñadas para definir flujos bajo condiciones multifásicas o monofásicos en tuberías horizontales, o exceden las tasas de flujos con las cuales trabaja correctamente.

De las ecuaciones que definen el comportamiento de los campos de estudio, el porcentaje de desviación no excede el 20.53%, pero se seleccionó la ecuación de correlación de flujo **Beggs – Brill – Mobby**, primero porque presenta la desviación mas baja con un 7.66% con respecto a las demás, valor menor al 10% recomendado en el manual del simulador para considerar los resultados como aceptables, también es una de las ecuaciones más utilizadas en la evaluación y diseño de redes multifásicas horizontales y ligeramente inclinadas al nivel de ingeniería, a demás, de acuerdo a su definición cubre varios rangos de tasas de flujo y diámetros internos de la tubería.

Tabla 4.2 Matriz de evaluación de correlación para caída de presión del sistema de recolección actual

Correlaciones utilizadas.	Presiones (psig)														
	ZEF-7	%DES	ZEF-10	%DES	ZED-7	%DES	X-8	%DES	W-4	%DES	ZEF-8	%DES	ZEF-11	%DES	B-12
Beggs & Brill - Mobby	250,8	-7,66	251	-7,57	262,1	-3,01	303,7	1,22	305,7	1,86	250,8	-3,67	250,1	-9,96	304,3
Beggs & Brill	250	-8,00	250,2	-7,91	257,7	-4,77	288,2	-4,09	286,5	-4,71	250	-4,00	249,3	-10,31	286,9
Beggs & Brill - No Slip	249,7	-8,13	250,1	-7,96	256,8	-5,14	283,4	-5,86	285,9	-4,93	249,8	-4,08	249,3	-10,31	284,7
Beggs & Brill - Mobby- Eaton	250,7	-7,70	250,9	-7,61	259	-4,25	285,9	-4,93	288,9	-3,84	250,7	-3,71	249,9	-10,04	286,9
Beggs & Brill - Mobby - Dukler	249,7	-8,13	250,2	-7,91	256,8	-5,14	283,5	-5,82	285,9	-4,93	249,8	-4,08	249,4	-10,26	284,7
Beggs & Brill - Mobby -Hagedom - Brown	248,7	-8,56	249,1	-8,39	258,6	-4,41	279,9	-7,18	282,2	-6,31	248,8	-4,50	248,3	-10,75	281,1
Beggs & Brill - High velocity	250	-8,00	250,1	-7,96	257,7	-4,77	286,4	-4,75	288,2	-4,09	250	-4,00	249,3	-10,31	286,9
Mikherjee & Brill	249,5	-8,22	249,9	-8,04	257,3	-4,94	281,3	-6,65	283,7	-5,75	249,6	-4,17	249	-10,44	282
Mikherjee & Brill - Eaton	249,4	-8,26	249,8	-8,09	255,9	-5,51	280,2	-7,07	282,5	-6,19	249,5	-4,21	249,1	-10,40	281,3
Orkiszewski	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Dun & Ros	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Hagedom & Brown	249,4	-8,26	249,9	-8,04	255,9	-5,51	248,9	-20,53	282,4	-6,23	249,5	-4,21	248,9	-10,49	281,1
Hagedom & Brown - Beggs & Brill	249,2	-8,35	249,5	-8,22	254,3	-6,17	276,7	-8,42	278,2	-7,84	249,2	-4,33	248,5	-10,66	276,2
Azis	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Gray	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Mbody	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Angel- Welchon - Ross	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Eaton	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Eaton - Flannigan	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Lockhart - Flannigan	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Dukler	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Dukler - Flannigan	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
Lochart & Martinelli	249,7	-8,13	250,1	-7,96	256	-5,47	280,7	-6,88	283,2	-5,93	249,8	-4,08	249,3	-10,31	281,1
Olimens	249,7	-8,13	250,1	-7,96	256,6	-5,22	280,9	-6,80	283,2	-5,93	249,8	-4,08	249	-10,44	281,8

Por otro lado, es una de las ecuaciones recomendadas *Pipephase*, porque este funciona razonablemente bien para una amplia gama de condiciones de flujo. Como se observa en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Catalogo de los métodos de caída de presión recomendados para el flujo multifásico en tubos horizontales e inclinados^[14]

Method	Pipe					
	Horizontal and Inclines <10°	Upward Incline	Downward Incline	Riser	Tubing	Annulus
Beggs & Brill	✓	✓	✓	X	X	X
Beggs & Brill - Moody ¹	✓	✓	✓	X	X	X
Beggs & Brill - No slip	X	X	X	X	X	X
Beggs & Brill - Moody-Eaton ³	X	X	X	X	X	X
Beggs & Brill - Moody-Dukler ³	X	X	X	X	X	X
Beggs & Brill - Moody-Hagedorn & Brown	✓	✓	✓	X	X	X
Mukherjee & Brill ²	✓	✓	✓	X	X	X
Mukherjee & Brill-Eaton ³	✓	✓	✓	X	X	X
Ansari	X	✓	X	X	X	X
Orkiszewski	X	X	X	✓	✓	X
Duns & Ros	X	X	X	X	X	X
Hagedorn & Brown	X	X	X	✓	✓	X
Hagedorn & Brown - Beggs & Brill	X	X	X	✓	✓	X
Aziz	X	X	X	✓	✓	X
Gray (not applicable for Compositional)	X	X	X	✓	X	X
Gray - Moody (not applicable for Compositional)	X	X	X	✓	✓	X
Angel-Welchon-Ross	X	X	X	✓	✓	X
Eaton	X	X	X	X	X	X
Eaton-Flannigan	✓	✓	✓	X	X	X
Dukler	X	X	X	X	X	X
Dukler-Flannigan	✓	✓	✓	X	X	X
Lockhart & Martinelli	X	X	X	X	X	X
Dukler-Eaton-Flannigan	✓	✓	✓	X	X	X
Olimens	✓	✓	✓	X	X	X
OLGA ⁴	✓					
TACITE ⁴	✓					

Una vez determinada la correlación, se vario el porcentaje de eficiencia de flujo y rugosidad de la tubería, hasta obtener los valores más cercanos posibles a las condiciones de operación actual. Se hicieron muchas variaciones independientes y algunos cambios de rugosidad en gasoductos importantes, pero los que importan para efectos del proyecto realizado son los que se muestran en la tabla 4.4, por corresponder a gasoductos diseñados por el Proyecto Gas Anaco y encontrarse activos formando parte de la red actual.

Tabla 4.4 Líneas PGA operativas en la actualidad pertenecientes a los campos Zapato y Mata R.

Línea	Inicio	Destino	Distancia (m)	Diámetro (pulg)	Rugosidad	Eficiencia (%)
L193	B-12	PCMR	6029,0	12	$9,3 \times 10^{-3}$	90
L023	J003	J004	3600,0	16	$9,3 \times 10^{-3}$	90
L030	J005	J004	1192,0	16	$9,3 \times 10^{-4}$	90
L038	ZEF-10	J005	460,0	12	$9,3 \times 10^{-4}$	70
L060	ZED-7	J003	1056,5	8	$9,3 \times 10^{-3}$	90

Estos cambios o ajustes se debieron hacer a estas líneas son considerables ya que en los documentos del Proyecto Gas Anaco definen una eficiencia general del 100% y una rugosidad de $1,3 \times 10^{-3}$. Lográndose obtener una desviación máxima de 1,06% de las presiones en cada estación (fuente) de la simulación en comparación a las reales, lo que hace los resultados confiables. En la tabla 4.5, se observan las presiones y flujos de gas, crudo y agua que según el reporte emitido por el departamento de Producción de San Tomé existían para el mes de enero de 2009, en las estaciones de los Campos Zapato y Mata R al nivel de presión 250 psig, así como también se muestran las presiones arrojadas por el simulador en las fuentes

representativas de las estaciones y la desviación entre ambas. Y en la figura 4.2, se muestra la red de recolección integrando los campos y las plantas compresoras La Ceibita y Zapato.

Tabla 4.5 Porcentaje de desviación con respecto a la presión para la validación de la red de recolección actual, nivel 250 psig.

Estación	Volúmenes			Presiones Real (psi)	Presión Obtenida (psi)	% de Desviación
	Gas (MMPCND)	Crudo (BNPD)	Agua (BPND)			
ZEF-7	2,22	7	13	270	269,50	-0,19
ZEF-8	1,01	17	26	260	262,30	0,88
ZEF-10	5,33	77	32	270	266,90	-1,16
ZED-7	19,94	136	247	270	272,90	1,06
ZEF-11	3,05	154	107	275	274,10	-0,33
W-4	26,44	77	153	300	303,10	1,02
X-8	40,32	99	321	300	301,50	0,50
B-12	16,98	123	153	310	309,30	-0,23

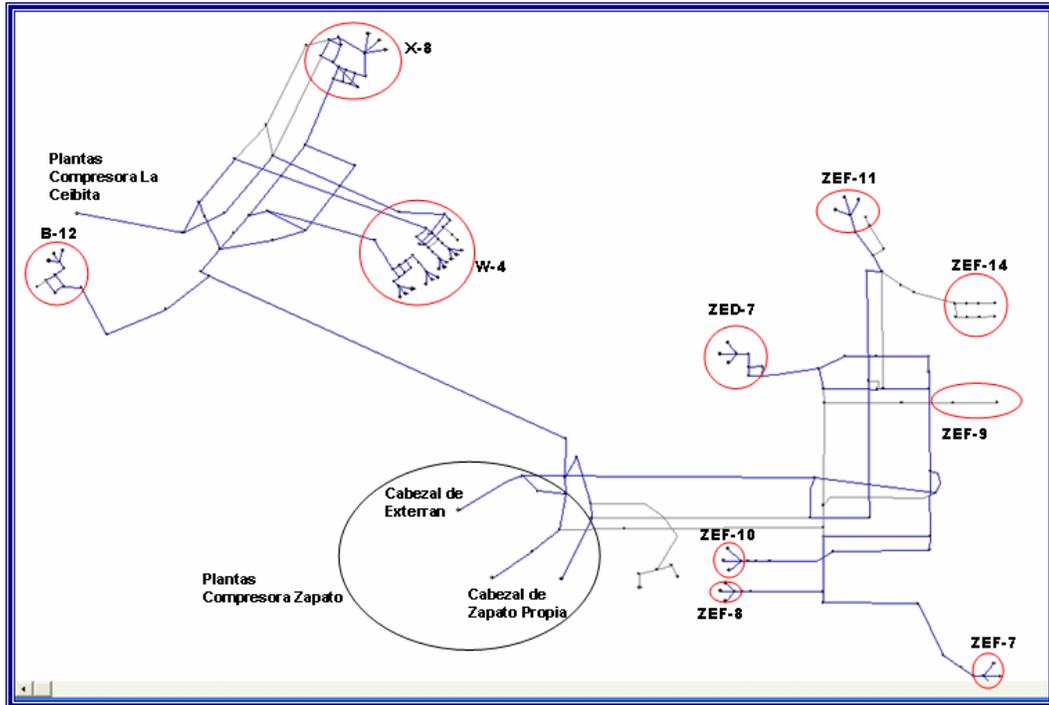


Figura 4.2 Modelo de simulación de la red de recolección actual Zapato - Mata R, nivel 250 psi.

4.1.1.2 Modelo de simulación PGA

Para el montaje del modelo de simulación PGA, se utilizó los parámetros de diseño establecidos en los documentos de la ingeniería de detalles del proyecto, emitido por TECNOCONSULT, en su memoria de cálculo:

Eficiencia de flujo: **100%**

Correlación de caída de presión: **Beggs – Brill – Mobby**

Rugosidad general: **$1,3 \times 10^{-3}$**

Estos parámetros se aplicaron a cada línea que conforma la red de tuberías diseñada para el Centro Operativo Zapato Mata R, exceptuando las tuberías que pertenecen a esta red, pero por deficiencias en los gasoductos actuales se encuentra operativos, los cuales sufrieron cambios diferentes a estos como se reflejan en la tabla 4.4

En la tabla 4.6, se muestran las comparaciones de las presiones obtenidas y las desviaciones, las cuales aseguran una alta confiabilidad en los resultados ya que no llega a ser mayor a 0.69%, aun con los cambios hechos a las líneas antes mencionadas (ver tabla 4.4).

Tabla 4.6 Porcentaje de desviación con respecto a la presión para la validación de la red de recolección PGA, nivel 250 psi.

Estación	Volúmenes			Presiones de diseño (psi)	Presión Obtenida (psi)	% de Desviación
	Gas (MMPND)	Crudo (BNPD)	Agua (BPND)			
ZEF-7	13,40	298,92	511,08	280,80	280,80	0,00
ZEF-8	32,43	358,74	552,69	279,40	277,50	-0,68
ZEF-10	24,96	271,31	379,10	270,40	271,80	0,52
ZED-7	32,14	476,16	471,81	267,80	267,30	-0,19
ZEF-11	13,90	233,38	378,57	275,60	273,80	-0,66
ZEF-14	59,41	734,03	1255,00	280,40	281,20	0,28
ZEF-9	20,16	246,05	399,12	272,40	272,40	0,00
W-4	117,16	1161,63	1549,14	271,87	273,00	0,41
X-8	122,83	1445,49	1841,74	261,98	263,80	0,69
B-12	25,94	229,16	254,01	266,13	265,10	-0,39

En cuanto al modelo de simulación final, se puede observar en la figura 4.3, donde se representa tanto la red actual como la PGA,

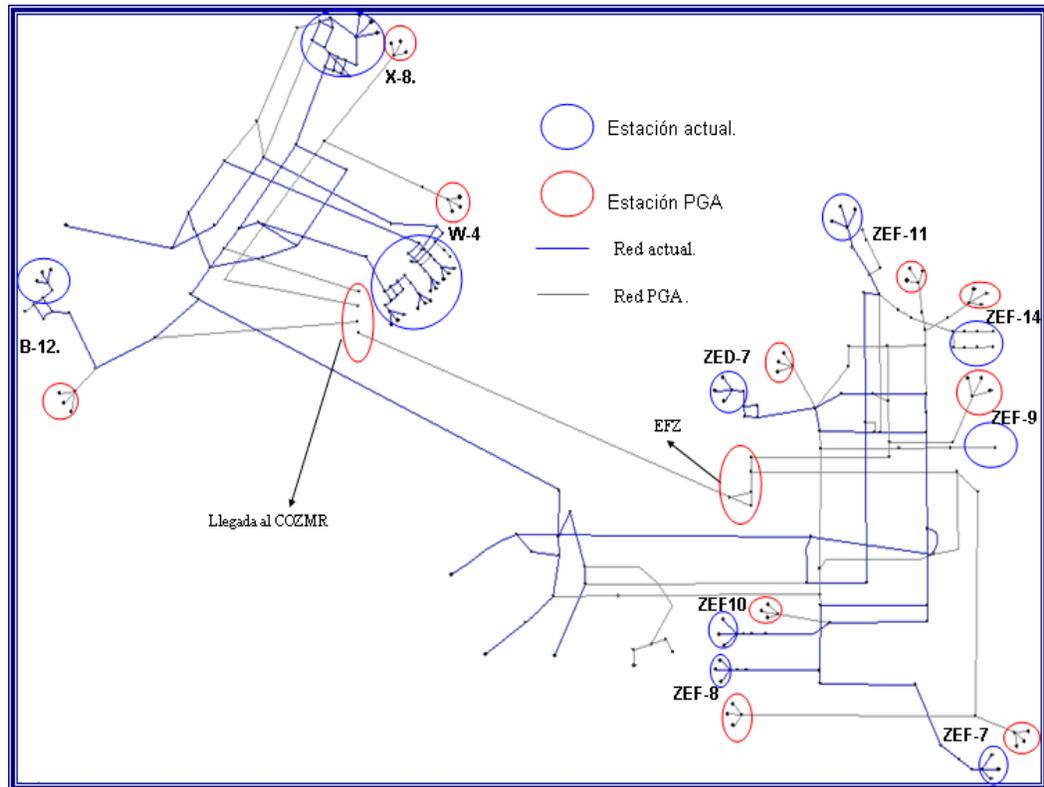


Figura 4.3 Red de recolección PGA y actual, nivel de presión 250 psi.

4.1.1.3 Evaluación de los parámetros hidráulicos frente al impacto del PDO 2006- 2025

Para verificar el comportamiento de la red de recolección PGA, frente a la variación de la producción estimada para el nivel 250 psi, se utilizaron los flujos picos, es decir, máximo y mínimos flujos pronosticados para el periodo 2006-2025, esto debido a que se consideró que si la red no presenta problemas operativos en estos años entonces no existiría contratiempos en las operaciones normales del centro operativo, por lo menos producto de los flujos manejados, determinando para tal fin caída de presión, acumulación de líquido, velocidad máxima y mínima de la mezcla a

ser comparados con los parámetros establecidos en normas PDVSA y API correspondientes, además se observó el régimen de flujo presente en las líneas a manera de determinar flujos peligrosos que generan baches y por ende caídas de presión considerables en las líneas.

4.1.1.3.1 Maxima producción del PDO 2006-2025

Los resultados arrojados por el paquete de simulación, se muestran en la tabla 4.7. En esta tabla se observa que, las velocidades de la mezcla máxima establecida en la norma no debe no exceder el 60% de la velocidad erosional, para garantizar la integridad de la tuberías evitando así la erosión en las mismas, y ruidos intensos que perturben o afecten al personal que labore en las cercanías a las tuberías, esta norma o recomendación es cumplida por todo el sistema de recolección PGA ya que la velocidades alcanzadas con los máximos flujos de PDO 2006-2025 no alcanzan el valor de velocidad erosional.

El segundo parámetro a evaluar es la velocidad mínima la cual no debe ser menor de 10pie/s, para evitar acumulaciones de líquidos que generan tapones o baches en las líneas, que no solo generan caídas de presión en las tuberías sino que a lo largo del tiempo causan problemas de corrosión; en la red propuesta por el Proyecto Gas Anaco, se observa que en los tramos L318, L023 y L061, acumulación de líquido considerable producto de diámetros muy grandes.

En los tramos L105, L049 y L013, se observa acumulación de líquido, producto de, una expansión en las líneas aunado al poco flujo manejado en estas tuberías; en el caso de L015, que es una línea de 20", maneja flujo proveniente de una línea de 12" (descarga de ZEF-11) y una línea que maneja un flujo con velocidad de 4,091pie/s (descarga de ZEF-14); L049, gasoducto de 26", maneja el flujo proveniente de L318, línea de 20", que a demás presenta problemas del mismo tipo y que distribuye la

producción también a el gasoducto de 16", L023 el cual maneja una velocidad de 1,156 pie/s; y por último L013 es un gasoducto de 25,25" del campo Mata R, que maneja la descarga de X-8 (línea de 20") y W-4 (línea de 20").

Tabla 4.7 Resultados obtenidos para la red PGA, al manejar la volumetría máxima estimada en el PDO 2006-2025

Campo	Líneas importantes	Diámetros (pulg)	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional (pie/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
ZAPATO	L104	12"	17,193	53,7466	32,25	-0,0014	-0,14	2,709	Segregado	Estratificado
	L318	20"	4,091	45,1351	27,08	-0,0003	-0,03	402,406	Segregado	Estratificado
	L105	20"	10,965	47,9728	28,78	-0,0001	-0,01	358,577	Segregado	Estratificado
	L196	16"	13,126	55,0669	33,04	-0,0003	-0,03	9,196	Segregado	Estratificado
	L326	10"	14,910	54,2967	32,58	-0,0006	-0,06	30,287	Segregado	Estratificado
	L045	10"	18,817	57,178	34,31	-0,0012	-0,12	13,466	Segregado	Estratificado
	L060	8"	18,499	92,3655	55,42	-0,0012	-0,12	0,498	Segregado	Estratificado
	L049	26"	12,517	50,6633	30,40	0	0,00	466,244	Segregado	Estratificado
	L298	20"	10,303	52,8982	31,74	0,00000	0,00	76,624	Segregado	Estratificado
	L023	16"	1,156	49,2437	29,55	-0,01100	-1,10	167,164	Segregado	Estratificado
	L295	8"	16,895	55,3053	33,18	-0,001	-0,10	11,526	Segregado	Estratificado
	L030	16"	12,977	88,6553	53,19	-0,002	-0,16	2,101	Segregado	Estratificado
	L031	12"	18,889	55,5447	33,33	-0,0032	-0,32	57,975	Segregado	Estratificado
	L061	36"	9,314	78,7416	47,24	0	0,00	170,650	Segregado	Estratificado
MATA R	L193	12"	4,184	44,6967	26,82	0,001	0,10	76,375	Segregado	Estratificado
	L089	26"	10,931	56,2621	33,76	-0,0001	-0,01	18,266	Segregado	Estratificado
	L222	20"	14,371	61,1662	36,70	-0,0002	-0,02	66,416	Segregado	Intermitente
	L205	12"	7,270	55,6183	33,37	-0,0004	-0,04	30,429	Segregado	Estratificado
	L239	12"	7,397	58,7642	35,26	-0,0001	-0,01	40,001	Segregado	Estratificado
	L013	25.25"	18,428	59,0855	35,45	-0,0002	-0,02	164,145	Segregado	Estratificado

En cuanto a las caídas de presión están dentro de lo que establece la norma, 1,5psi/100 pies^[9].

Por otro lado en la línea L222, el patrón de flujo observado es desfavorable por ser del tipo segregado – intermitente, generando por ende baches en esta líneas, que podría causar problemas operativos por caídas de presión en las líneas, acumulaciones de liquido, etc. Sin embargo, este patrón de flujo se ve corregido en el gasoducto siguiente de 25,25” (L013), debido a la incorporación del flujo proveniente de la estación X-8 que provoca un aumento de velocidad, no obstante se presenta problemas de acumulación de líquido.

En general el flujo máximo del nuevo PDO puede ser manejado por esta infraestructura, sin embargo presenta problemas considerables de acumulación de líquido y problemas de baches que sin duda generarán serios problemas al transcurrir de los años. Para los cuales, más adelante se presentaran posibles soluciones, para evitar los contratiempos que podría presentar el sistema de recolección.

4.1.1.3.2 Mínima producción del PDO 2006-2025

En la tabla 4.8, se observan los resultados del comportamiento de la red propuesta por el PGA, para el COZMR para el nivel de presión 250 psi frente a la mínima volumetría estimada del PDO 2006-2025 correspondiente al último año de producción (2025). Es notorio que los problemas de acumulación de líquido siguen siendo en las mismas tuberías L105, L318, L061, L013 y L049, sin embargo, también es importante resaltar que se manejan velocidades por debajo de lo establecido en la norma antes mencionada, en todas las líneas, pero no se excede el 60% la velocidad erosional. La caída de presión está por debajo de la máxima recomendada, sin embargo, en las líneas que presentan la más altas caídas de presión, están dentro de las que se estiman podrían tener problemas por patrones de flujo de tipo intermitente,

que causarían problemas operacionales, con mayor impacto en la línea L061, de 36”, por ser ésta la descarga a los cabezales de succión del COZMR.

Esta infraestructura propuesta por PGA, también podría trabajar con este flujo, es decir la mínima volumetría estimada en el PDO 2006-2025, pero presentaría problemas operativos continuamente, ya que para esta fecha las líneas llevarían un aproximado de trece años en funcionamiento, porque se estima que su arranque sea para finales del 2011, y todo este periodo de operación causaría cierto impacto en las líneas como taponamientos, acumulación de líquidos y otros elementos corrosivos en las líneas, que por estar haciéndose un estudio del tipo estacionario, no se ven reflejados, considerando todos estos factores y los patrones de flujo obtenidos se tendría que estar haciendo mantenimiento continuo a las líneas, lo que causaría disminución en la producción de los campos y por ende a los compromisos con el mercado interno.

Tabla 4.8 Resultados obtenidos para la red PGA, al manejar la volumetría mínima estimada en el PDO 2006-2025

Campo	Líneas importantes	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psi/pie)	Caída de Presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
Zapato	L104	1,709	55,85	33,51	-0,0001	-0,01	4,57	Segregado	Estratificado
	L318	1,002	45,02	27,01	0,0002	0,02	394,72	Segregado	Estratificado
	L105	2,692	48,61	29,17	0,0002	0,00	339,23	Segregado	Estratificado
	L196	4,029	59,89	35,93	-0,0003	0,00	0,00	Segregado	Estratificado
	L326	3,606	61,95	37,17	-0,004	-0,43	32,28	Segregado	Intermitente
	L045	6,349	94,67	56,80	-0,004	-0,38	0,20	Segregado	Estratificado
	L060	4,577	61,95	37,17	-0,001	-0,10	10,20	Segregado	Intermitente
	L049	6,530	55,19	33,11	0,0001	0,01	356,96	Segregado	Estratificado
	L298	3,690	52,73	31,64	-0,0001	-0,01	76,79	Segregado	Intermitente
	L023	10,589	60,30	36,18	-0,007	-0,70	86,63	Segregado	Intermitente
	L295	0,128	46,64	27,98	0,000	0,00	18,45	Segregado	Estratificado
	L030	4,394	91,51	54,91	-0,001	-0,11	0,94	Segregado	Intermitente
	L031	4,668	57,76	34,66	-0,001	-0,10	48,37	Segregado	Estratificado
	L061	2,396	79,73	47,84	0,004	0,40	151,55	Segregado	Intermitente
Mata R	L193	2,840	50,16	30,10	0,010	0,98	56,11	Segregado	Estratificado
	L089	2,649	57,76	34,66	0	0,00	16,393	Segregado	Estratificado
	L222	6,929	61,35	36,81	-0,0002	0,00	63,342	Segregado	Estratificado
	L205	4,550	58,76	35,26	-0,0002	-0,02	25,05	Segregado	Estratificado
	L239	4,550	57,19	34,31	-0,0001	-0,01	44,51	Segregado	Estratificado
	L013	6,240	60,13	36,08	0,0000	0,00	152,16	Segregado	Estratificado

El problema que presenta el sistema de recolección propuesto por PGA, tanto para el máximo como para el mínimo flujo del Portafolio de Oportunidades 2006-2025, radica en el diseño de las líneas, ya que fueron diseñadas para flujos bastante altos y los tamaños de los diámetros están entre 20 y 36 pulgadas, dimensiones muy grandes para manejar la nueva volumetría pronosticada y aunque las caídas de presión no son muy altas, las acumulaciones de líquido y patrones obtenidos son considerables y a lo largo del tiempo causarían paradas no planificadas.

4.1.2 Mejoras en la red de recolección propuesta por PGA, que garanticen la eficiencia de las operaciones del Centro Operativo Zapato Mata R

Luego de la evaluación hecha a la red de recolección propuesta por el Proyecto Gas Anaco se determinó que aunque converge para la nueva volumetría establecida podría presentar problemas de acumulación de líquido y generación de caídas de presión producto de patrones de flujo intermitente. Por lo que se procedió a elaborar propuestas para resolver estos problemas.

4.2.1.1 Cambios de diámetro

Se realizó una sensibilidad a las tuberías que presentan más problemas (ver tabla 3.13) a manera de determinar que diámetros serían los más convenientes para manejar la nueva volumetría, y corregir las fallas detectadas.

La manera en la que se seleccionó el diámetro mas adecuado de operación, fue comparando los resultados arrojados por el simulador con lo reflejado en las normas:

- Velocidad mínima > 10pie/s
- Caída de presión < 1,5 psi/ 100 pie

- Velocidad máxima < 60% de la velocidad erosional
- Se fijó la acumulación de líquido no mayor a 100 bbls, ya que no hay una norma que refleje la máxima acumulación permitida. Quedando claro que después debería hacerse un estudio en estado transitorio a manera de determinar la acumulación de líquido mensual o anual en las tuberías estudiadas.
- Y el patrón de flujo recomendado para manejar flujo multifásico es estratificado- anular o segregado – estratificado. Aunque generan acumulaciones de líquido, las velocidades de gas y líquido son similares y pueden ser controladas sin generar baches en las líneas.

Para este fin se realizó el estudio en primer lugar usando el flujo máximo, para no exceder la máxima capacidad de las líneas, los resultados se presentan en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Sensibilidad de las tuberías para el flujo máximo del nuevo PDO.

Corrida	Campo	Líneas importantes	Diámetros (pulg)	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional.	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psig/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo.
Corrida 1	Zapato	L318	16	6,167	44,369	26,62	-0,0003	-0,03	241,022	Segregado	Estratificado
		L061	30	13,573	80,012	48,0100	-0,0001	-0,01	170,654	Segregado	Estratificado
		L105	16	16,781	49,130	29,480	-0,0006	-0,06	211,387	Segregado	Estratificado
		L049	24	12,477	51,258	30,760	-0,0001	-0,01	342,180	Segregado	Estratificado
		L023	16	5,071	44,911	26,950	-0,0008	-0,08	144,569	Segregado	Estratificado
	Mata R	L013	20	28,695	60,481	36,290	-0,0009	-0,09	89,251	Segregado	Estratificado
Corrida 2	Zapato	L318	14	7,608	43,405	26,040	-0,0003	-0,03	182,825	Segregado	Estratificado
		L061	24	21,096	80,818	48,490	-0,0003	-0,03	63,068	Segregado	Estratificado
		L105	14	21,362	49,572	29,740	-0,0013	-0,13	158,126	Segregado	Estratificado
		L049	20	14,888	51,751	31,050	-0,0004	-0,04	228,799	Segregado	Estratificado
		L023	16	10,261	46,645	27,990	-0,0009	-0,09	131,452	Segregado	Estratificado
	Mata R	L013	18	33,667	60,846	36,510	-0,0014	-0,14	70,470	Segregado	Estratificado
Corrida 3	Zapato	L318	12	8,731	42,549	25,530	-0,0002	-0,02	151,854	Segregado	Estratificado
		L105	12	25,258	49,838	29,900	-0,0021	-0,21	129,091	Segregado	Estratificado
		L049	18	16,329	52,093	31,260	-0,0005	-0,05	180,371	Segregado	Estratificado
		L023	16	13,251	47,327	28,400	-0,0010	-0,10	126,941	Segregado	Estratificado
Corrida 4	Zapato	L318	10	10,679	40,155	24,090	-0,0002	-0,02	112,646	Segregado	Estratificado
		L105	10	35,017	50,566	30,340	-0,0051	-0,51	91,134	Segregado	Anular
		L049	16	17,492	52,234	31,340	-0,0007	-0,07	140,864	Segregado	Estratificado
		L023	16	16,641	47,862	28,720	-0,0012	-0,12	123,740	Segregado	Estratificado

Como se observa se realizaron corridas variando los diámetros, empezando a disminuir poco a poco las dimensiones de las tuberías partiendo de los valores iniciales y deteniendo la sensibilización de las líneas al conseguirse un diámetro para el cual los resultados obtenidos se encontraban fuera de norma.

La primera corrida muestra todas las tuberías que luego de la evaluación mostraron presentar problemas con los parámetros evaluados, tanto del campo Zapato como para el campo Mata R

En esta tabla se resalta en amarillo los diámetros recomendados, aunque la acumulación de líquido en algunas líneas sigue siendo alta, disminuyeron en gran porcentaje en comparación con los obtenidos inicialmente.

Luego de determinar los mejores diámetros, se procedió a verificar el comportamiento de todo el sistema con la finalidad de comprobar que la red funcione sin problemas. En la tabla 4.10 se observan los resultados.

Como se observa, se logró alcanzar velocidades por encima de la mínima permitida, excepto en la línea L193, sin embargo esta no causa problemas pues excede el 60% de la velocidad erosional, la caída de presión en todas las tuberías se encuentra por debajo de la máxima permitida y los patrones de flujo son aceptables. Y las acumulaciones de líquido se corrigieron considerablemente.

Luego se procedió a observar el comportamiento del sistema de recolección con estos diámetros propuestos al manejar la volumetría mínima estimada. Los resultados se muestran en la tabla 4.11

En esta tabla se observa que las velocidades siguen siendo bajas, las acumulaciones de líquido no son tan altas y el patrón de flujo obtenido es

recomendable, y se conserva caídas de presión adecuadas ajustadas a la norma, pero por el patrón de flujo observado no existen problemas operativos.

Tabla 4.10 Resultados de la red con los diámetros seleccionados, usando la máxima volumetría del PDO 2006-2025

Campo	Líneas importantes	Distancia (m)	Diámetros (pulg)	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional (pie/sec)	60% de la velocidad erosional.	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (bbl)	Régimen de flujo	Patrón de flujo.
ZAPATO	L104	359,00	12	12,792	47,896	28,738	-0,001	-0,100	6,720	Segregado	Estratificado
	L318	3784,29	10	10,680	40,160	24,096	-0,002	-0,200	112,610	Segregado	Estratificado
	L105	4819,24	12	35,040	50,580	30,348	-0,005	-0,500	91,098	Segregado	Anular
	L196	2083,79	16	12,490	54,020	32,412	0,000	-0,030	9,550	Segregado	Estratificado
	L326	1056,56	10	14,130	53,177	31,906	-0,004	-0,400	31,690	Segregado	Estratificado
	L045	1056,56	10	18,950	56,260	33,756	-0,006	-0,600	13,840	Segregado	Estratificado
	L060	3803,17	10	16,010	89,890	53,934	-0,001	-0,100	0,532	Segregado	Estratificado
	L049	1362,05	16	17,550	52,230	31,338	-0,001	-0,100	140,860	Segregado	Estratificado
	L298	3170,83	20	21,510	53,950	32,370	-0,006	-0,600	72,560	Segregado	Estratificado
	L023	1300,00	16	16,640	47,860	28,716	-0,002	-0,200	123,740	Segregado	Estratificado
	L295	1192,69	8	20,870	55,900	33,540	-0,001	-0,100	11,125	Segregado	Estratificado
	L030	4500,00	16	11,740	88,330	52,998	-0,002	-0,200	2,119	Segregado	Estratificado
	L031	5042,04	12	18,770	55,410	33,246	-0,003	-0,310	58,220	Segregado	Estratificado
	L061	4030,01	24	20,978	80,630	48,378	0,000	-0,030	63,296	Segregado	Estratificado
MATA R	L193	0,21	12	4,180	44,696	26,818	-0,011	-1,100	76,370	Segregado	Estratificado
	L089	200,00	26	9,883	57,560	34,536	-0,004	-0,400	17,930	Segregado	Estratificado
	L222	550,00	20	10,057	59,300	35,580	0,000	-0,010	72,220	Segregado	Estratificado
	L205	2450,00	12	16,902	58,530	35,118	-0,001	-0,100	25,718	Segregado	Estratificado
	L239	2450,00	12	17,113	61,790	37,074	-0,001	-0,100	34,265	Segregado	Estratificado
	L013	2200,00	18	33,550	60,820	36,492	-0,001	-0,100	70,560	Segregado	Estratificado

Tabla 4.11 Resultados de la red con los diámetros propuestos manejando la mínima volumetría establecida en el PDO 2006-2025

Campo	Líneas importantes	Diámetros (pulg)	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional.	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo.
Zapato	L104	12	1,689	55,88	33,53	-0,0001	-0,01	4,623	Segregado	Estratificado
	L318	10	3,480	44,78	26,87	-0,0001	-0,01	87,530	Segregado	Estratificado
	L105	12	6,635	51,83	31,10	-0,0001	-0,01	113,060	Segregado	Estratificado
	L196	16	4,016	59,84	35,90	0,00003	0,00	7,146	Segregado	Estratificado
	L326	10	3,593	53,86	32,32	-0,004	-0,40	32,395	Segregado	Estratificado
	L045	10	4,513	60,77	36,46	-0,001	-0,05	10,890	Segregado	Estratificado
	L060	10	7,222	94,75	56,85	-0,0001	-0,01	0,201	Segregado	Estratificado
	L049	16	7,151	55,62	33,37	-0,0001	-0,01	133,420	Segregado	Estratificado
	L298	20	3,737	55,49	33,29	-0,0001	-0,01	65,634	Segregado	Estratificado
	L023	16	1,709	47,58	28,55	-0,0001	-0,01	121,190	Segregado	Estratificado
	L295	8	4,263	57,54	34,52	-0,0003	-0,03	10,045	Segregado	Estratificado
	L030	16	3,167	91,43	54,86	-0,00002	0,00	0,970	Segregado	Estratificado
	L031	12	4,653	58,19	34,91	-0,001	-0,10	48,438	Segregado	Estratificado
L061	24	5,474	81,95	49,17	-0,00020	-0,02	55,860	Segregado	Estratificado	
Mata R	L193	12	2,826	50,15	30,09	0,000	0,00	56,140	Segregado	Estratificado
	L089	26	2,647	57,77	34,66	-0,001	-0,14	16,390	Segregado	Estratificado
	L222	20	6,133	61,71	37,03	-0,0001	-0,01	62,74	Segregado	Estratificado
	L205	12	2,515	57,45	34,47	-0,0002	-0,02	27,37	Segregado	Estratificado
	L239	12	2,502	55,36	33,22	0,0000	0,00	49,79	Segregado	Estratificado
	L13	18	12,130	62,93	37,76	-0,0001	-0,01	62,04	Segregado	Estratificado

4.2.1.2 Desvío de producción

En vista de los adelantos en la construcción de algunos gasoductos, se planteo la posibilidad de hacer desvíos de producción utilizando las líneas de producción ya diseñadas, con el fin de contar con alternativas para manejar de manera adecuada la producción, que elimine o por lo menos reduzca los problemas operativos detectados

Se plantaron varias alternativas, las cuales se muestran en las figuras de 3.33 a 3.37, para seleccionar la mas viable, tomando como premisa corregir la mayor cantidad de fallas que presentaron los gasoducto para manejar la nueva volumetría establecida por la gerencia de Producción del Distrito Anaco. Excepto para la tercera opción del campo Zapato ya que la simulación no convergió para este desvío planteado.

En las tablas 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 se presentan los resultados de esta evaluación, se resaltó en color amarillo los valores que se encuentran tanto fuera de norma como los que podrían causar problemas operacionales en la red, tal es el caso de la acumulación de liquido, para la cual no se cuanta con un patrón definido de acumulación de líquido, sin embargo se fijo que una acumulación mayor a los 100 bbls es excesiva y debería corregirse o evitarse tal problema.

De estos resultados, es claro que la opción más viable para manejar la máxima volumetría, es la primera planteada para ambos campos ya que a parte de que cumple con todas las normas, se logra corregir los problemas de patrones de flujo, velocidades bajas y acumulación de líquido que presento al principio las redes de recolección al evaluar la red de recolección frente a la nueva volumetría establecida en el PDO 2006-2025.

De igual manera se evaluaron los esquemas de producción propuestos para la red de recolección del Centro Operativo Zapato Mata R, para el flujo mínimo establecido en el PDO 2006-2025, que corresponde al último año de operaciones, (2025). Con el fin de contar con alternativas que ayuden a corregir los problemas observados después de la evaluación hecha a la red propuesta por el Proyecto Gas Anaco ante esta volumetría.

En las tablas 4.16 a 4.19, se observa que para el manejo de la mínima producción se podría utilizar cualquiera de las opciones, excepto la tercera opción planteada para el campo Zapato, pero sigue siendo viable cambiar los diámetros planteados ya que como se observa problemas con los patrones de flujo en líneas importantes como L061, la cual es la descarga al COZMR, del campo Zapato.

Tabla 4.12 Evaluación del primer esquema propuesto para el campo Zapato manejando el máximo flujo del PDO2006-2025 (figura3.31)

Líneas importantes	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
L104	17,202	53,85	32,31	-0,0014	-0,14	5,228	Segregado	Estratificado
L318	4,086	45,14	27,08	-0,0003	-0,03	402,400	Segregado	Estratificado
L105	10,967	47,98	28,79	-0,0001	-0,01	358,480	Segregado	Estratificado
L196	13,107	55,08	33,05	-0,0003	-0,03	9,190	Segregado	Estratificado
L326	14,900	54,28	32,57	-0,0006	-0,06	30,300	Segregado	Estratificado
L045	20,670	57,56	34,54	-0,0060	-0,60	13,249	Segregado	Estratificado
L060	15,860	92,16	55,30	0,0000	-0,20	0,500	Segregado	Estratificado
L049	12,250	50,69	30,41	0,0000	0,00	466,950	Segregado	Estratificado
L298	11,110	53,36	32,02	-0,0001	-0,01	74,950	Segregado	Estratificado
L030	18,250	89,55	53,73	-0,0020	-0,2 0	2,050	Segregado	Estratificado
L031	19,160	55,85	33,51	-0,0030	-0,30	57,400	Segregado	Estratificado
L061	9,400	79,06	47,44	0,0000	0,00	169,497	Segregado	Estratificado

Tabla 4.13 Evaluación del primer esquema propuesto para el campo Mata R manejando el máximo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.34)

Líneas importantes	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional.	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
L193	4,188	44,71	26,83	-0,0110	-1,10	76,310	Segregado	Estratificado
L216	10,918	56,23	33,74	-0,0001	-0,01	18,285	Segregado	Estratificado
L171	17,435	61,86	37,12	-0,0004	-0,04	64,201	Segregado	Estratificado
L013	20,010	59,54	35,72	0,0000	-0,03	160,030	Segregado	Estratificado

Tabla 4.14 Evaluación del segundo esquema propuesto para el campo Zapato manejando el máximo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.32)

Líneas importantes	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
L104	14,957	50,9729	30,58	-0,002	-0,17	4,093	Segregado	Estratificado
L318	3,540	42,8747	25,72	-0,00024	-0,02	450,587	Segregado	Estratificado
L105	9,504	45,4171	27,25	-0,0001	-0,01	403,938	Segregado	Estratificado
L196	11,521	52,355	31,41	-0,0003	-0,03	10,148	Segregado	Estratificado
L326	12,924	51,3796	30,83	-0,004	-0,42	34,169	Segregado	Estratificado
L045	14,712	53,8594	32,32	-0,006	-0,58	15,144	Segregado	Estratificado
L060	18,739	86,5801	51,95	-0,002	-0,16	0,583	Segregado	Estratificado
L298	34,422	54,898	32,94	-0,002	-0,18	68,959	Segregado	Estratificado
L023	36,930	50,0174	30,01	-0,004	-0,35	113,186	Segregado	Estratificado
L030	17,480	87,5416	52,52	-0,003	-0,27	2,172	Segregado	Estratificado
L031	18,325	54,892	32,94	-0,003	-0,28	59,215	Segregado	Estratificado
L061	9,532	79,6514	47,79	-0,00005	0,00	166,652	Segregado	Estratificado

Tabla 4.15 Evaluación del segundo esquema propuesto para el campo Mata R manejando el máximo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.35)

Líneas importantes	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
L193	4,184	44,6967	26,82	0,011	1,07	76,375	Segregado	Estratificado
L089	5,627	42,952	25,77	-0,0001	-0,01	32,799	Segregado	Estratificado
L222	10,677	44,4552	26,67	-0,0002	-0,02	139,470	Segregado	Estratificado
L205	88,257	68,7983	41,28	-0,023	-2,27	15,158	Segregado	Estratificado
L239	64,591	60,075	36,05	-0,018	-1,81	30,988	Segregado	Estratificado

Tabla 4.16 Evaluación del primer esquema de producción propuesto para el campo zapato, manejando el mínimo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.33)

Líneas	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
L104	4,258	56,190	33,714	-0,0001	-0,0100	4,563	Segregado	Estratificado
L318	1,01	45,07	27,0396	-0,0001	-0,0100	393,750	Segregado	Estratificado
L105	2,68	48,54	29,124	-0,0002	-0,0200	339,160	Segregado	Estratificado
L196	4,06	60,09	36,0516	0,0000	0,0000	7,087	Segregado	Estratificado
L326	3,62	54,01	32,406	-0,0010	-0,1000	32,197	Segregado	Intermitente
L045	3,78	60,42	36,252	-0,0040	-0,4000	11,047	Segregado	Estratificado
L060	8,44	95,32	57,192	-0,0010	-0,1000	0,198	Segregado	Estratificado
L049	3,23	52,79	31,674	0,0000	0,0000	4,410	Segregado	Estratificado
L298	2,70	55,36	33,216	-0,0001	-0,0100	65,770	Segregado	Intermitente
L030	4,43	91,50	54,9	-0,0010	-0,1000	0,968	Segregado	Estratificado
L031	4,66	58,22	34,932	-0,0010	-0,1000	48,386	Segregado	Estratificado
L061	2,45	80,49	48,294	-0,0010	-0,1000	149,169	Segregado	Intermitente

Tabla 4.17 Evaluación del primer esquema de producción propuesto para el campo Mata R, manejando el mínimo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.36)

Líneas	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional.	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
L193	2,87	50,78	30,468	-0,0010	-0,1000	56,004	Segregado	Estratificado
L089	2,65	57,78	34,668	0,0000	0,0000	16,390	Segregado	Estratificado
L222	5,07	61,63	36,978	0,0000	0,0000	61,600	Segregado	Estratificado
L013	5,27	60,17	36,102	0,0000	0,0000	151,900	Segregado	Estratificado

Tabla 4.18 Evaluación del segundo esquema de producción propuesto para el campo zapato, manejando el mínimo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.34).

Líneas	Velocidad erosiona (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
L104	4,195	55,87	33,52	0	-0,01	4,622	Segregado	Estratificado
L318	0,990	44,83	26,90	-0,0001	-0,01	398,530	Segregado	Estratificado
L105	2,651	48,26	28,96	-0,00002	0,00	343,560	Segregado	Estratificado
L196	3,970	59,55	35,73	-0,00003	0,00	7,210	Segregado	Estratificado
L326	3,577	53,69	32,21	-0,003	-0,30	32,640	Segregado	Intermitente
L045	9,407	62,94	37,76	-0,004	-0,40	9,640	Segregado	Intermitente
L060	0,002	93,86	56,32	-0,00002	0,00	0,216	Segregado	Estratificado
L298	8,878	56,81	34,09	-0,001	-0,10	61,251	Segregado	Estratificado
L023	10,131	52,59	31,55	-0,001	-0,10	93,099	Segregado	Intermitente
L030	4,418	91,38	54,83	-0,001	-0,10	0,001	Segregado	Estratificado
L031	4,646	58,15	34,89	0	0,00	48,500	Segregado	Estratificado
L061	2,421	80,05	48,03	0,00100	0,10	150,890	Segregado	Intermitente

Tabla 4.19 Evaluación del segundo esquema de producción propuesto para el campo Mata R, manejando el mínimo flujo del PDO2006-2025 (figura 3.37).

Líneas	Velocidad erosiona (pie/sec)	Velocidad erosional. (pie/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psi/pie)	Caída de presión (psi/100)	Acumulación de líquido (BBL)	Régimen de flujo	Patrón de flujo
L193	2,873	50,02	30,01	0	0,00	56,004	Segregado	Intermitente
L089	2,461	55,96	33,58	0	0,00	17,584	Segregado	Estratificado
L222	4,618	57,18	34,31	-0,0010	-0,10	79,126	Segregado	Estratificado
L205	24,481	62,64	37,58	-0,001	-0,10	20,123	Segregado	Estratificado
L239	23,812	64,57	38,74	-0,002	-0,20	27,703	Segregado	Estratificado

4.1.3 Interconexiones entre las estaciones de recolección propuesta por PGA, y las estaciones de flujo y descarga existentes, en los campos Zapato y Mata R para el periodo de prueba del centro operativo

El diseño de estas interconexiones radica en la necesidad de utilizar los separadores que se encuentran en las estaciones de flujo y descarga actuales. Para ello se debió primero que nada, revisar la ruta crítica de las estaciones para verificar que los separadores puedan manejar la volumetría que se provee manejará en el momento del pre-arranque las estaciones de recolección. Esta información se obtuvo visitando cada una de las estaciones y verificando la cantidad de separadores y la máxima capacidad que pueden manejar. En la tabla 4.20 se ve la información mencionada.

Tabla 4.20 Capacidad de los separadores y volumetría a manejar, por cada estación

Estación	Separadores	Capacidad (C/U)		Flujos estimados para el arranque		
		Gas (MMPCND)	Líquidos BND	Gas (MMPCND)	Crudo (BPD)	Agua (BPD)
ZEF-11	2	24	6400	3,30	61,0	58,00
ZEF-7	1	24	6400	8,90	131,00	122,00
ZEF-14	2	24	6400	11,70	296,00	277,00
ZEF-8	2	24	6400	5,50	49,00	34,00
ZED-7	3	24	6400	23,50	82,00	77,00
ZEF-10	1	24	6400	10,20	261,00	251,00
ZEF-9	1	24	6400	11,70	95,66	91,98
W-4	4	24	6400	64,00	311,00	291,00
X-8	5	24	6400	90,50	801,00	750,00
B-12	2	24	6400	0,50	2,00	2,00

Luego de comprobar que los separadores son aptos para manejar la volumétrica se procedió a medir y determinar las distancias y accesorios necesarios para las hacer las interconexiones y. haciendo uso de los planos aprobados para construcción.

Una vez establecidos estos parámetros, se ubicaron los puntos seleccionados para las interconexiones en el paquete de simulación. Es importante destacar que existen estaciones en las cuales sólo se necesitan hacer la interconexión de las válvulas multipuertos a los cabezales de succión de los separadores de la infraestructura actual, ya que cuentan con la interconexión de la descarga de los separadores actuales a las líneas de descarga PGA (B-12, ZEF-10 y W-4) y el resto de las estaciones de recolección necesitan de ambas interconexiones. En las figuras 4.4 y 4.5 se muestra las interconexiones hechas a la estación X-8, y el resto se presentan en los anexos

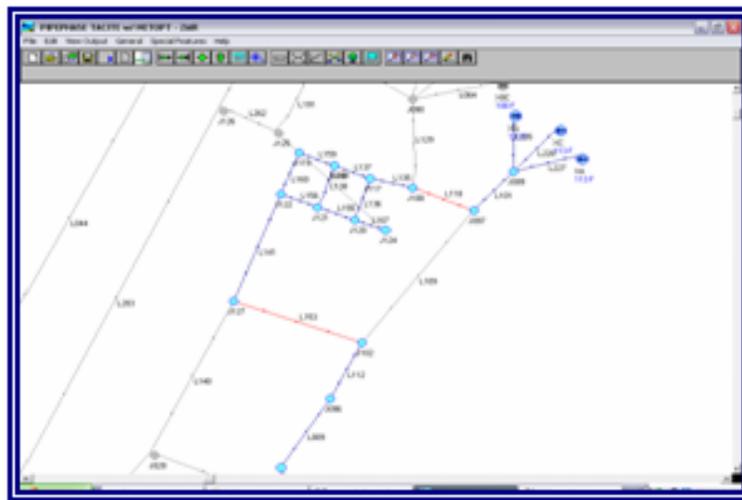


Figura 4.4 Interconexión incorporada a la simulación de la estación X-8.

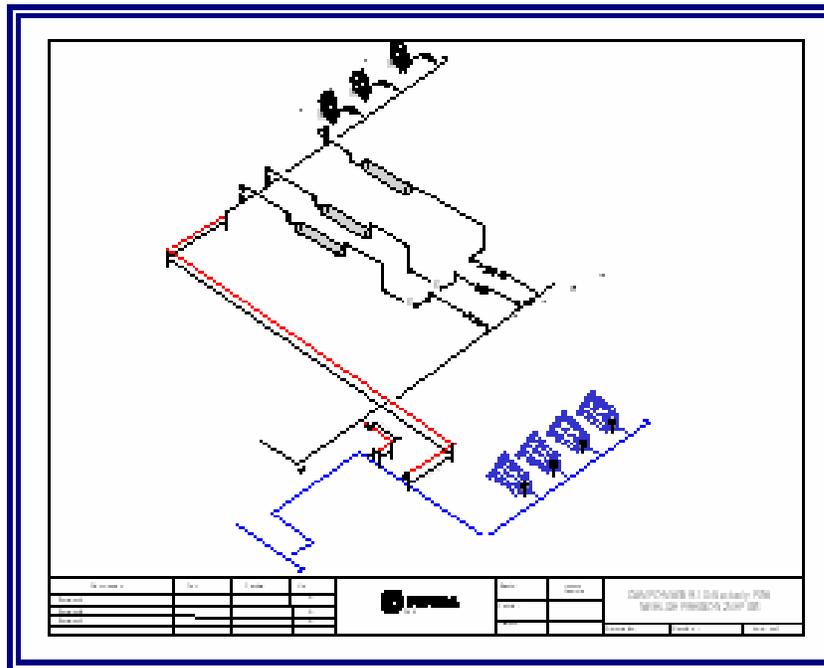


Figura 4.5 Esquemático de X-8 y la interconexión planteada.

Luego se suministró la información requerida por el simulador y procedió a realizar la sensibilidad para dimensionar las interconexiones requeridas, como se muestra en la tabla 4.21. Utilizando el mismo criterio de selección anterior, donde los resultados arrojados por el simulador ante cada diámetro escogido, son comparados con las normas API y PDVSA correspondientes.

Tabla 4.21 Resultados de la sensibilidad realizada a las interconexiones planteadas entre la infraestructura actual y la futura.

Estación	Dirección	Distancia (m)	Diámetro (pulg)	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional (ft/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psig)	Caída de presión (psig/100)	Acumulación de liquido (BBL)	Régimen de flujo
ZEF-11	PGA - ACTUAL	24,01	12	2,662	47,044	28,226	-0,00002	-0,0021	0,633	SEGR STRT
			10	3,775	48,311	28,986	-0,00005	-0,0051	0,413	SEGR STRT
			8	5,947	49,983	29,990	-0,00016	-0,0157	0,238	SEGR STRT
			6	10,287	51,975	31,185	-0,00071	-0,0707	0,122	SEGR STRT
	ACTUAL PGA	37,20	12	2,715	56.6	33.96	-0,02200	-2,2000	0,232	SEGR ANNU
			10	3,851	58.3	34.98	-0,02100	-2,1000	0,151	SEGR ANNU
			8	6,070	59,344	35,606	-0,01983	-1,9830	0,087	SEGR ANNU
			6	10,502	58,450	35,070	-0,00100	-0,1000	0,065	SEGR STRT
ZEF-14	PGA - ACTUAL	101,78	12	9,527	45,449	27,269	-0,00024	-0,0236	3,516	SEGR STRT
			10	13,490	46,682	28,009	-0,00072	-0,0723	2,300	SEGR STRT
			8	21,138	48,232	28,939	-0,00233	-0,2332	1,328	SEGR STRT
	ACTUAL PGA	203	12	9,511	69,724	41,834	-0,00020	-0,0203	1,663	SEGR STRT
			10	13,497	70,735	42,441	-0,00053	-0,0528	1,086	SEGR STRT
			8	21,286	71,958	43,174	-0,00190	-0,1895	0,624	SEGR STRT
ZEF-9	PGA - ACTUAL	9,87	10	11,605	53,773	32,264	-0,0004	-0,0400	0,005	SEGR STRT
			8	18,268	55,426	33,256	-0,0016	-0,1600	0,003	SEGR STRT
			6	31,665	63,706	38,223	-0,007	-0,7330	0,030	DIST ANNU
	ACTUAL PGA	7,4	10	11,664	60,589	36,353	-0,0193	-1,9300	0,001	SEGR STRT
			8	18,384	62,572	37,543	-0,019	-1,9000	0,001	SEGR STRT
			6	36,340	82,852	49,711	-0,00990	-0,9900	0,003	SEGR STRT

Tabla 4.21. Resultados de la sensibilidad realizada a las interconexiones planteadas entre la infraestructura actual y la futura (continuación)

Estación	Dirección	Distancia (m)	Diámetro (pulg)	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional (ft/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psig)	Caída de presión (psig/100)	Acumulación de liquido (BBL)	Régimen de flujo
ZED-7	PGA - ACTUAL	287,70	16	11,943	63,756	38,253	-0,00241	-0,2407	0,002	SEGR STRT
			12	18,800	64,756	38,853	-0,00244	-0,2442	0,002	SEGR STRT
			10	26,760	65,978	39,586	-0,00207	-0,2075	2,343	SEGR STRT
	ACTUAL PGA	4,5	16	5,835	87,199	52,319	-0,00006	-0,0057	0,017	SEGR STRT
			12	9,117	87,917	52,750	-0,00018	-0,0176	0,010	SEGR STRT
			10	11,862	88,267	52,960	-0,00030	-0,0303	0,006	SEGR STRT
ZEF-10	PGA - ACTUAL	32,23	12	7,514	63,200	37,920	0,01060	1,0603	1,169	SEGR STRT
			10	10,657	44,823	26,893	0,01015	1,0146	0,764	SEGR STRT
			8	16,761	46,406	27,843	0,00821	0,8208	0,440	SEGR STRT
ZEF-7	PGA - ACTUAL	14,00	12	7,501	34,456	20,673	-0,05861	-5,8609	0,360	SEGR STRT
			10	10,633	35,879	21,527	-0,05427	-5,4268	0,235	SEGR STRT
			8	16,679	37,755	22,653	-0,04979	-4,9794	0,136	SEGR STRT
			6	20,366	39,950	23,970	-0,005	-0,5000	0,006	SEGR ANNU
	ACTUAL PGA	101,94	12	7,469	81,991	49,195	-0,01911	-1,9106	0,870	SEGR STRT
			10	10,605	82,759	49,655	-0,01771	-1,7707	0,563	SEGR STRT
			8	16,703	83,454	50,072	-0,01709	-1,7092	0,321	SEGR STRT
6"			29,336	89,610	53,766	-0,006	-0,6000	0,013	SEGR STRT	

Tabla 4.21. Resultados de la sensibilidad realizada a las interconexiones planteadas entre la infraestructura actual y la futura (continuación)

Conexión	Dirección	Distancia (m)	Diámetro (pulg)	Velocidad de la mezcla (pie/sec)	Velocidad erosional (ft/sec)	60% de la velocidad erosional	Caída de presión (psig)	Caída de presión (psig/100)	Acumulación de liquido (BBL)	Régimen de flujo
F-8	PGA - ACTUAL	45,12	12	4,502	54,990	32,994	-0,00010	-0,0100	0,95	SEGR STRT
			10	6,450	55,300	33,180	-0,00010	-0,0100	0,621	SEGR STRT
			8	10,176	58,170	34,902	-0,00030	-0,0300	0,039	SEGR STRT
	ACTUAL PGA	97,5	12	4,540	83,950	50,370	0,00010	0,0100	0,316	SEGR STRT
			10	6,490	84,360	50,616	-0,00010	-0,0100	0,007	SEGR STRT
			8	10,14	85,570	51,342	-0,00020	-0,0200	0,006	SEGR STRT
PGA - ACTUAL	56,69	16	33,534	64,774	38,864	-0,00210	-0,2101	1,062	SEGR STRT	
		12	52,581	73,458	44,075	-0,00802	-0,8023	0,381	DIST AN	
		10	74,409	73,837	44,302	-0,02035	-2,0349	0,256	DIST AN	
PGA - ACTUAL	99,85	16	45,324	57,786	34,671	-0,00441	-0,4412	2,618	DIST STR	
		20	28,554	56,077	33,646	-0,00135	-0,1350	4,644	SEGR STRT	
		10"	97,253	63,467	38,0802	-0,03824	-3,8238	0,749	DIST STR	
	ACTUAL PGA	68,19	16	47,749	87,5918	52,55508	-0,00561	-0,5605	0,120	SEGR STRT
			12	75,264	86,8055	52,0833	-0,01885	-1,8848	0,072	DIST STR
			10	105,345	85,9604	51,57624	-0,04812	-4,8123	0,049	DIST AN
20	30,268	87,3923	52,43538	-0,002	-0,1677	0,202	DIST STR			
PGA - ACTUAL	29,79	10	0,568	49,14	29,484	0,00000	0,0000	0,682	SEGR STRT	
		8	0,896	50,8424	30,50544	0,00000	0,0000	0,392	SEGR STRT	
		6	1,550	52,8931	31,73586	0,00000	0	0,201	SEGR STRT	

En verde se resaltan los valores seleccionados para las interconexiones. Cumpliéndose con todas las normas requeridas, excepto en B-12, donde la velocidad obtenida está por debajo de la mínima permitida, pero no causa acumulaciones de líquido.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

1. La correlación que más se ajusta al comportamiento tanto del sistema de recolección actual como para la red PGA, para los campos Zapato y Mata R al nivel de presión 250 psi, es *Beggs & Brill - Mobby*.
2. La desviación del modelo de simulación de la red de recolección actual con respecto al comportamiento real del campo es en promedio de 0.19% y del modelo de simulación de la red de recolección PGA con respecto a los valores de diseño es en promedio de 0,001%.
3. El patrón de flujo predominante en la red de recolección de los campos Zapato y Mata R, para el manejo de la producción actual (enero 2009) es el segregado - estratificado, el cual es considerado estable. Sin embargo, las líneas de descarga de 8" de diámetro de ZED-7 presentan un régimen de tipo distribuido - estratificado el cual se considera sin afectación por no pertenecer a la succión de equipos (separación o compresión), mientras que el tramo de gasoducto de 16" de diámetro (entre J004 y J005) presenta un patrón de flujo intermitente lo cual genera la formación de baches de líquido en el sistema.
4. Las velocidades de la mezcla obtenida en el campo Zapato - Mata R para el manejo de la producción actual, no exceden el 60% de la velocidad erosional y

aunque en promedio se obtiene velocidades por debajo de la mínima permitida no se observa acumulación considerable de líquido.

5. La producción máxima de gas pronosticada en el PDO 2006-2025 para el campo Zapato - Mata R disminuyó un 32,27%, con respecto a PDO 2005-2024.

6. Los valores de velocidad de la mezcla obtenidos, en la evaluación de la red propuesta por PGA para la máxima producción, no superan el 60% de la velocidad erosional, lo cual garantiza la integridad de las tuberías, además se encuentran por encima de la mínima establecida en la norma API 14E (10 pie/s) exceptuando los gasoductos de 20" de ZEF-11, el de 36" de EFZ a COZMR, de 12" de B-12, el de 20" de X-8 y el de 12" de W-4 solo generándose acumulación de líquido en los dos primeros

7. Para el máximo flujo pronosticado en el PDO 2006-2025, se observa una acumulación de líquido en los gasoductos 26" de J003 a EFZ, y de 20" de ZEF-14 a J003, esto debido a una pérdida de velocidad causada por una expansión de diámetro.

8. El patrón de flujo predominante en la red PGA para la máxima volumetría estimada en el PDO 2006- 2025 es el segregado - estratificado considerado estable. Sin embargo, en la línea de 20" que va desde W-4 a X-8 el patrón de flujo es segregado- intermitente, el cual causa baches en dicho tramo, corrigiéndose al conectarse con la línea de 26" de X-8, debido al incremento del volumen.

9. En promedio las velocidades obtenidas en la red PGA para la mínima producción estimada en el PDO 2006-2025 esta por debajo de la establecida en norma API 14E, generando acumulaciones de líquido en los gasoductos de 20" de X-8, 20" de ZEF-14, de 20" de ZEF-14 a J003, de 26" de J003 a EFZ, y de 36" de EFZ a COZMR. Sin embargo, no exceden el 60% de la velocidad erosional

10. Las velocidades obtenidas en las interconexiones propuestas para la transición y arranque del COZMR no exceden el 60% de la velocidad erosional, evitándose así problemas de desgaste en las tuberías. Y se mantienen por encima de la mínima establecida en la norma API 14E, excepto en B-12, pero no causa problemas operacionales ni acumulación de líquido.

11. Las adecuaciones requeridas para garantizar la operatividad durante la transición y arranque de COZMR están identificadas en las estaciones ZEF-10, W-4 y B-12 (con interconexiones desde VMP hasta la succión de separadores actuales); ZEF-11, ZEF-9, ZEF-14, ZEF-7 y X-8 (con interconexiones desde las VMP PGA al sistema de separación de la estación actual y desde la descarga del sistema de separación actual a las líneas de recolección PGA).

12. Los valores de caída de presión por cada 100 pies obtenidos en las interconexiones no exceden el 1,5 psi, establecido en la norma PDVSA LTP 1,5.

13. El patrón de flujo obtenido en las interconexiones propuestas para la transición y arranque del COZMR es segregado estratificado, lo cual garantiza una operación adecuada a la hora de las pruebas.

5.2. Recomendaciones

1. Realizar un estudio en estado transitorio a manera de determinar la continuidad con la que deben hacerse mantenimiento a las líneas que arrojaron una gran acumulación de líquido.

2. Establecer la filosofía de operación para el arranque en las estaciones que no existen interconexiones entre la infraestructura tradicional y la propuesta por PGA.
3. Verificar antes del arranque el correcto funcionamiento de los separadores existentes en cada estación actual.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ramos, Jorge **“Análisis del comportamiento hidráulico, bajo un incremento de la producción, del sistema de recolección de flujo multifásico para los niveles de presión 60 y 450 psi, del campo San Joaquín-Guario-El Roble”**, Trabajo de Grado, Universidad de Oriente, Barcelona, Octubre (2006).
2. Díaz, Jean **“Evaluación del manejo del fluido desde las estaciones de flujo hasta la planta compresora del campo Mata R, Área Mayor Oficina”**, Trabajo de Grado, Universidad de Oriente, Barcelona (2005).
3. Hernández, Gustavo **“Análisis hidráulico del gasoducto Zapato Viejo – Extracción San Joaquín de 36” para manejar el volumen de gas proveniente de las estaciones X-8 y W-4 comprimido a 1200 psig”**, Trabajo de Grado, Universidad Metropolitana, Caracas, Noviembre (2003).
4. Superintendencia de Infraestructura, **“Portafolio de Oportunidades”**(2003).
5. Martínez, M., **“Ingeniería de Gas. Principios y Aplicaciones”**, Ingenieros Consultores F.R.L, Venezuela. (1999).
6. Gerencia de Ingeniería de Petróleo, **“Curso de Ingeniería de Producción”**, Tercer Modulo, Tomo I, PDVSA, Maracaibo; mayo (199).
7. CIED, **“Flujo Multifásico en Tuberías”** , Centro internacional de educación y desarrollo. (1992).

8. Velázquez, J., **“Flujo Multifásico en Tuberías”**. Tecnopetrol de Venezuela SA, Maracaibo. (1984)
9. Manual de Ingeniería de Diseño PDVSA n° L-TP 1.5, **“Calculo Hidráulico de Tuberías”**, Volumen 13-III, Petróleos de Venezuela (1994).
10. Brill. J y Beggs , H., **“Two phase Flow in Pipes”**, Tulsa (1995).
<http://speonline.spe.org/cgi-bin/elibrar>.
11. Norma API 14E (RP 14E) “recomended Practice for Desing and Installation of Offshore Plataform Piping Systems”, 5^a edición, octubre (1991).
12. Beggs, D., **“Production Optimization Using Nodal Analysis”**, Editorial Oil and Gas Consultans International INC, Tulsa (1991).
13. Crane **“Flujo de fluidos en Válvulas y Accesorios y tuberías”**. Editorial Mc Graw Hill, (1989).
14. Simulation Science, **“Pipephase® User’s Manual”**, México. (1999).
15. Tecnoconsult, **“Operaciones Centralizadas Campo Zapatos-Mata R”**, Caracas. (2006).
16. Tecnoconsult, **“Memoria de Cálculo Líneas de Recolección Campo Mata R”**, Caracas. (2006)
17. Tecnoconsult, **“Memoria de Cálculo Líneas de Recolección Campo Zapato”**, Caracas. (2006).

18. Tecnoconsult, **“Bases y Criterios de Diseño”**, Caracas. (2006).
19. Manual de Ingeniería de Diseño PDVSA 90616.1.024, **“Dimensionamiento de Tuberías de Procesos”** Volumen 13-III, Petroleos de Venezuela (1993).
20. Manual de Diseño de Proceso, PDVSA MDP-02-FF-05, **“Flujo Bifasico-Vapor”**. Petroleos de Venezuela (1996).
21. Tecnounconsult, **“Guía de Operación Del Centro Operativo Zapato Mata R”**, Caracas (2006)

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	“Evaluación de sistema de recolección de producción para nivel de presión de 250 psi, propuesto por el Proyecto Gas Anaco (PGA), para el centro operativo Zapato Mata R”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CVLAC / E MAIL
Cabrera Matute, Jofdys del Valle	CVLAC: 17.420.470 EMAIL: jofdysc@hotmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Gas natural

Compresor

Separador

Flujo

Caída de presión

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÁREA	SUB ÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

La finalidad de este proyecto es garantizar la continuidad de las operaciones de Centro Operativo Zapato Mata R (COZMR), para lo cual se debió evaluar el sistema de recolección de producción para el nivel de producción de 250 psi propuesto por el Proyecto Gas Anaco (PGA), con ello se desea determinar los problemas operativos que presenta la red de recolección ante la nueva volumetría establecida por la gerencia de producción del Distrito Anaco, reflejada en el Portafolio de Oportunidades 2006-2025, la cual es diferente a la utilizada para el diseño de dicho Centro Operativo, ésto para plantear si es necesario mejoras en la red de recolección que permitan mantener la eficiencia de las operaciones; y diseñar las interconexiones entre las estaciones de recolección propuestas por PGA, y las estaciones de flujo y descarga existentes, de tal manera que el periodo de pre-arranque del centro operativo transcurra sin contratiempos. Para lograr estos planteamientos se trabajó con el programa de simulación Pipephase 9.2, comparando los resultados obtenidos con las normas API y PDVSA, obteniéndose que la red puede funcionar con la nueva volumetría pero presentaría problemas con el tiempo que acarrearían continuos gastos por mantenimiento de las tuberías, por lo que se planteó dos soluciones una de ellas desvío de la producción en la misma red ya diseñada por PGA, y la segunda el redimensionamiento de las tuberías, en cuanto a las interconexiones se determinó que las adecuaciones necesarias entre las estaciones actuales y las planteadas por PGA, en los campos Zapato y Mata R oscilan entre los 6" y 20" de diámetro

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E-MAIL				
	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
De Las Casas, Christiam	CVLAC:	V- 16.816.535			
	e-mail:	christiamgransi@gmail.com			
	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
Silva, Tomás	CVLAC:	V- 8.292.216			
	e-mail:	silvate@pdvsa.com			
	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
Hernán, Raven	CVLAC:	V- 4.136.007			
	e-mail:	Hraven1@yahoo.com			
	ROL	CA	AS	TU	JU(X)
Salas, Yraima	CVLAC:	V-8.478.649			
	e-mail:	Yrasal57@yahoo.es			
	ROL	CA	AS	TU	JU(X)

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2009	10	28
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis.Evaluación_sistema250psi_ZapatoMataR.doc	Aplicación/msword

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

ALCANCE

ESPACIAL: **PDVSA-Gas Anaco** (OPCIONAL)

TEMPORAL: **6 meses** (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

DERECHOS

De acuerdo al artículo 44 del Reglamento de Trabajo de Grado:

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

Cabrera Matute, Josdys Del Valle.

AUTOR

Ing. Christiam De Las Casas

TUTOR

Ing. Hernán Raven

JURADO

Ing. Yraima Salas

JURADO

Ing. Tomás Silva

TUTOR

Prof. Yraima Salas

POR LA SUBCOMISION DE TESIS